171032

Н. Н. УШАКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

Н.Н. УШАКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

Издание третье,
переработанное
и дополненное

Допущено Государственным комитетом СССР
по народному образованию в качестве учебника
для студентов вузов, обучающихся по специальности
«Вычислительные машины, комплексы, системы и сети»

02

РИТЬ Таджикской ССР
Инв. № 171032

МОСКВА
«ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1991

94г

ББК 32.97
У93
УДК 681.3.002(075.8)

Рецензенты:

кафедра «Вычислительная техника» Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина) (зав. кафедрой проф. Д. В. Пузанков);

д-р техн. наук, проф. В. Н. Черняев (кафедра «Технология производства радиоэлектронной аппаратуры» Московского авиационного технологического института)

Ушаков Н. Н.

У93 Технология производства ЭВМ: Учеб. для студ. вузов по спец. «Вычислит. машины, комплексы, системы и сети».— 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1991. — 416 с.; ил.
ISBN 5-06-000711-1

В книге изложены теоретические основы проектирования технологических процессов производства ЭВМ; типовые технологические процессы изготовления деталей и сборки; технология производства функциональных элементов и общая сборка ЭВМ.

В 3-м издании (2-е — 1976 г.) более подробно изложены вопросы автоматизации подготовки производства и технологических процессов на основе гибкой технологии, производства микропроцессорных схем, моделирования и оптимизации технологических процессов.

У $\frac{2405000000(4309000000)-229}{001(01)-91}$ 178—91

ББК 32.97
6Ф7.3

ISBN 5-06-000711-1

© Н. Н. Ушаков, 1991

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга представляет собой третье издание учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

Учебник состоит из трех частей. В первой части рассмотрены конструктивно-технологические особенности ЭВМ, общие вопросы проектирования технологических процессов, автоматизации подготовки производства, теории точности и надежности производства. Во второй части, освещающей типовые технологические процессы, применяемые при изготовлении ЭВМ, наиболее подробно изложены процессы изготовления печатных плат и электрического монтажа. Рассмотрены методы получения контактных соединений пайкой, сваркой, микросваркой, накруткой, а также технология тонкопроводного электрического монтажа на печатных платах. Третья часть книги посвящена технологическим процессам изготовления функциональных элементов и общей сборки ЭВМ. Большое внимание уделено изложению технологических процессов, применяемых для изготовления элементов ЭВМ третьего и четвертого поколений. Рассмотрены технологические процессы изготовления элементов памяти, больших интегральных микросхем и микросборок, приемочный контроль и испытания элементов ЭВМ.

Учебник написан на основании материалов, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, периодической печати и других изданиях.

Ряд технологических процессов, изложенных в книге, еще не получил достаточного освещения в учебной литературе, поэтому учебник может быть полезен студентам смежных специальностей и работникам промышленности.

Автор выражает благодарность коллективу кафедры вычислительной техники Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина), а также д-ру техн. наук, проф. В. Н. Черняеву за ценные замечания, сделанные при рецензировании книги.

Замечания и пожелания, способствующие улучшению книги, просим направлять в издательство «Высшая школа» по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Электронные вычислительные машины являются одним из наиболее важных средств автоматизации производства и повышения качества продукций, а также служат основой наиболее перспективных технологий. Эффективное использование современных вычислительных и управляющих машин определяет уровень научно-технического прогресса во всех отраслях промышленности, сельском хозяйстве, научных исследованиях и др.

Фундаментальный вклад в создание ЭВМ и внедрение их в народное хозяйство внесли советские ученые С. А. Лебедев, В. М. Глушков, Г. И. Марчук, В. С. Семенихин, Б. Н. Наумов и др. Большие работы по созданию и внедрению в производство комбинированных (гибридных) ЭВМ проводят советские ученые В. А. Трапезников, В. А. Котельников, В. Б. Смолов и др.

Первая отечественная ЭВМ была разработана в 1950 г. За прошедшее время в конструкции машин произошли большие изменения. Время существования ЭВМ определенной конструкции принято разделять на этапы (поколения). В основе такого деления лежат конструкция основных схемных деталей и технология, используемая для их изготовления и монтажа.

Можно выделить пять поколений ЭВМ, отличающихся элементной базой, техническими характеристиками и конструктивным исполнением. Каждой смене поколения соответствуют увеличение быстродействия, повышение надежности и уменьшение стоимости ЭВМ.

К первому поколению (1952 г.) относятся ЭВМ БЭСМ-2; «Минск-1», «Урал-1» и др. В качестве основных схемных деталей в этих машинах использовались электронные лампы, а электрический монтаж осуществлялся при помощи проводов.

Характеристики ЭВМ первого поколения: быстродействие до 20 000 опер/с; малая скорость ввода исходных данных (20 ... 30 чисел/с); большая мощность источников питания (до 150 кВт). Они размещались на площади 170 м², содержали до 18 тыс. электронных ламп и имели большую массу. Такие технические характеристики были достаточны для решения задач, поставленных в тот период времени, так как машины предназначались для работы в лабораториях и научных организациях. На этом этапе проверялись основные идеи построения ЭВМ и отрабатывались конструкции для серийного производства.

Ко второму поколению (1955—1965 гг.) относятся ЭВМ «Минск-22», М-220, БЭСМ-6 и др. Они построены на полупроводниковых приборах и печатных платах. Полупроводниковые приборы потребляют в 10...20 раз меньше энергии, чем электронные лампы, имеют малые размеры и более высокий срок службы (в 7...14 раз). Размеры ЭВМ, построенных на полупроводниковых приборах, значительно уменьшились и на порядок возросла скорость обработки информации. Недостатком ЭВМ второго поколения является большое число схемных деталей.

Получение высоконадежных ЭВМ, содержащих большое число схемных деталей, решается путем отказа от использования дискретных элементов и замены их интегральными схемами.

К третьему поколению (1964 г.) относятся ЭВМ, построенные на интегральных микросхемах с применением многослойного печатного монтажа и параллельной работы различных устройств в режиме разделения времени. Быстродействие этих ЭВМ повысилось до 5 млн. опер/с.

Для организации массового производства средств вычислительной техники была разработана Единая система электронных вычислительных машин (ЕС ЭВМ). Она реализована на микроэлектронной базе, что обеспечивает высокие эксплуатационные показатели и представляет собой семейство программно-совместимых машин. Серийный выпуск машин ЕС ЭВМ был начат в 1972 г.

К четвертому поколению относятся ЭВМ, построенные на больших интегральных схемах (БИС) и микропроцессорах. Создание микропроцессора (1971 г.) является важным достижением в электронной технике. Особенность микропроцессора состоит в том, что его функции определяются гибкой программой, находящейся в запоминающем устройстве. Объединение микропроцессора с памятью и устройствами ввода-вывода позволяют получить микроЭВМ. Выпуск семейства программно-совместимых микро- и мини-ЭВМ является большим достижением. На их основе строят отдельные вычислительные системы и мощные структуры для автоматизации и управления производством, разрабатывают персональные компьютеры.

Пятое поколение ЭВМ представляет класс вычислительной техники, в котором реализованы принципы искусственного интеллекта. Такие ЭВМ позволят решать задачи, точный метод решения которых неизвестен. Для этого потребуются машины высокой производительности (св. 1 млрд. опер/с) и с большим объемом памяти. В качестве элементной базы используют сверхбольшие интегральные микросхемы, для разработки которых требуются мощные системы автоматического проектирования.

Особенности производства ЭВМ на современном этапе. Основной особенностью производства ЭВМ является использование большого количества стандартных и нормализованных элементов, интегральных схем, радиоде-

талей и др. Выпуск этих элементов в больших количествах высокого качества — одно из основных требований вычислительного машиностроения. Важным вопросом, решаемым в настоящее время, является массовое производство стандартных блоков с использованием новых элементов. Унификация отдельных элементов создает условия для автоматизации их производства.

Другой особенностью является высокая трудоемкость сборочных и монтажных работ, что объясняется наличием большого числа соединений и сложностью их выполнения вследствие малых размеров контактных соединений и высокой плотности монтажа.

Повышение качества и экономичности производства во многом зависит от уровня автоматизации технологического процесса. Предпосылки для широкой автоматизации производства элементов и блоков ЭВМ обеспечиваются высоким уровнем технологичности конструкции, широким внедрением типовых и групповых технологических процессов, а также средств автоматизации.

Автоматизация развивается в направлении от автоматизации отдельных операций (пайка, сварка и др.) к широкому использованию автоматизированных линий.

Особенностью производства ЭВМ является также большая трудоемкость контрольных операций. На отдельных предприятиях количество контролеров достигает до 30 ... 40% от общего числа рабочих. Используют следующие методы контроля: ручной, неразрушающий, активный.

Производительность *ручного контроля* крайне низка и не отвечает современным требованиям. Поэтому возникла необходимость в создании высокопроизводительных методов контроля с использованием ЭВМ и автоматических измерительных устройств.

Важное значение приобрели методы *неразрушающего контроля*, которому можно подвергать 100% изделий на всех стадиях производства.

Весьма эффективны *активные методы контроля*, при которых проверяются режимы технологического процесса и исключается возможность появления брака. Такой контроль осуществляется по ходу технологического процесса и облегчает внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) с применением ЭВМ.

Полное решение проблемы качества возможно лишь на основе системного подхода к планированию, организации, управлению проектно-конструкторскими работами, производству, испытаниям и эксплуатации.

Решение сложных технических задач на всех этапах конструирования и производства ЭВМ существенно повышает требования к подготовке инженеров. Они должны обладать комплексом знаний, обеспечивающих качественное изготовление всех компонентов современной ЭВМ и ее периферийных устройств.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ГЛАВА 1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭВМ

1.1. Классификация ЭВМ

Электронно-вычислительная машина представляет собой вычислительное устройство или комплекс устройств, основные функциональные элементы которых выполнены на электронных или микроэлектронных изделиях.

По способу обработки представляемой информации ЭВМ делят на аналоговые, цифровые и гибридные (рис. 1.1).

В **аналоговых ЭВМ** исходные данные вводятся в виде непрерывных функций (электрических, механических и др.). Точность решения у них ограничена. Это объясняется тем, что исходные физические величины могут быть представлены с ограниченной точностью, которая определяется точностью изготовления отдельных элементов машины. Основным преимуществом машин непрерывного действия является быстродействие, что позволяет использовать их в качестве управляющих в системах автоматического управления.

В **цифровых ЭВМ** вся информация представляется в дискретной (цифровой) форме и математические операции осуществляются непосредственно над числами. Основные преимущества вычислительных машин дискретного действия — высокая точность вычислений и универсальность. Точность вычислений не связана с точностью изготовления самих элементов.

В **гибридных ЭВМ** вся информация может быть реализована двумя способами: 1) входная и выходная информации представляются в аналоговой форме, а вычисления проводятся над дискретными величинами; 2) вычисления выполняются в аналоговой форме, а входная информация представляется в дискретной форме.

Преимущество гибридных ЭВМ заключается в значительной экономии машинного времени и снижении требований к объему оперативной памяти. Применение гибридных ЭВМ вызвано сложностью проблем, возникающих при моделировании в реальном масштабе времени таких задач, как полет космических аппаратов, управление производственными процессами и др.

По характеру выполняемых операций ЭВМ делят на моделирующие, универсальные и специализированные.

Моделирующие ЭВМ предназначены для воспроизведения на моделях физических процессов, описываемых уравнениями.

Универсальные ЭВМ общего назначения применяют для решения различных вычислительных и логических задач. Наиболее широкое применение получили четыре системы ЭВМ общего назначения, выпускаемых серийно: единая система ЭВМ (ЕС ЭВМ), система малых ЭВМ (СМ ЭВМ), микроЭВМ и персональные ЭВМ.

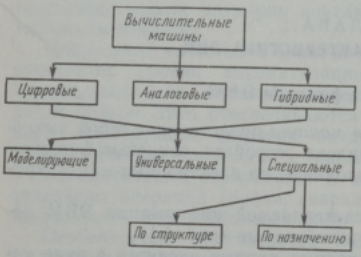


Рис. 1.1. Классификация вычислительных машин

Единая система ЭВМ объединяет ряд моделей с производительностью от нескольких тысяч до миллионов операций в секунду. Машины ЕС ЭВМ работают в режиме разделения времени, при котором несколько абонентов, удаленных от машины на достаточно большие расстояния, могут обращаться к ней независимо друг от друга.

Первая очередь ЕС ЭВМ, получившей условное название «Ряд-1», объединяет шесть моделей ЭВМ: ЕС 1010, ЕС 1020, ЕС 1021, ЕС 1030, ЕС 1040, ЕС 1050.

За выпуском первой очереди ЕС ЭВМ была проведена их модернизация и созданы новые машины: ЕС 1011, ЕС 1022, ЕС 1033 и др. Выпуск моделей первой очереди был прекращен в 1979 г.

Вторая очередь ЕС ЭВМ («Ряд-2») включает в себя восемь моделей (ЕС 1015, ЕС 1025 и др.). Они отличаются большей производительностью, емкостью памяти и возможностью создания вычислительных комплексов.

Третья очередь ЭВМ включает модели ЕС 1036, ЕС 1045, ЕС 1066. При разработке этих моделей значительно улучшены технико-экономические характеристики и проведена подготовка к переходу на новую элементную базу с использованием больших и сверхбольших интегральных микросхем.

Система малых ЭВМ первой и второй очередей (1976—1979 и 1979—1983 гг.) отличается от больших ЭВМ ограниченными вычислительными возможностями. Они имеют меньшую стоимость и предназначены для построения вычислительных комплексов в системах управления технологическими процессами и для выполнения небольших расчетов при научных исследованиях.

В настоящее время разработаны и освоены в производстве вычислительные средства СМ ЭВМ третьей очереди, которые построены на основе базовых моделей (СМ 1300, СМ 1420 и др.).

Система микроЭВМ построена на больших интегральных схемах и может функционировать без автономных источников питания. МикроЭВМ имеют небольшую стоимость и просты в эксплуатации.

Примеры отечественных микроЭВМ: семейства машин «Электроника 60», «Электроника С-5», «Электроника К-1», «Электроника НЦ», «Электроника 85» и др.

По конструктивному выполнению микроЭВМ можно разделить на однокристальные, одноплатные и многоплатные. Они используются как встраиваемые и как настольные.

Встраиваемые микроЭВМ не требуют периферийного оборудования и используются в станках с ЧПУ, промышленных роботах, контрольно-измерительных устройствах и др.

Настольные микроЭВМ являются машинами индивидуального пользования. Кроме ЦП с достаточно большим объемом оперативной памяти в состав микроЭВМ входят алфавитно-цифровой дисплей и накопитель на гибких магнитных дисках.

Мини- и микроЭВМ совместимы между собой на уровне языка программирования БЕЙСИК.

Системы малых и микроЭВМ построены как агрегатные системы технических средств, позволяющих компоновать управляющие вычислительные комплексы с различным составом оборудования и обеспечивать замену одного устройства комплекса другими аналогичного назначения без изменения общего функционирования системы.

Измерительно-вычислительные комплексы (ИВК), создаваемые на базе мини- и микроЭВМ, представляют собой автоматизированные средства измерения электрических величин, на основе которых могут быть созданы информационно-измерительные системы (ИИС).

Измерительно-вычислительные комплексы выполняют следующие функции: осуществляют прямые, косвенные и совокупные измерения; управляют процессом измерений; воздействуют на объект измерения; представляют результаты измерений в заданном виде.

Информационно-измерительная система КАМАК предназначена для автоматизации научных исследований. Она включает в себя систему из функциональных модулей, служащую для связи с объектом. Основным конструктивным элементом системы КАМАК является крейт (от англ. crate — корзина), представляющий собой каркас для установки сменных блоков, неотъемлемой частью которого является магистральный канал для передачи данных. Крейт имеет 25 мест для установки сменных блоков, выполненных на печатных платах. Для управления функциональными блоками в

крейтах используется контроллер или процессор. Система КАМАК имеет преимущество перед специализированными измерительными комплексами. Располагая набором блоков, можно создавать различные сложные измерительно-вычислительные системы (ИВС).

Комплекс технических средств (КТС) для локальных информационно-управляющих систем (ЛИУС) построен на базе микросхем с повышенной степенью интеграции и микропроцессоров. Он предназначен для реализации локальных систем управления технологическими агрегатами и процессами в различных отраслях промышленности и непромышленной сфере.

Комплекс технических средств выполняет следующие функции: сбор и обработку информации, контроль за ходом технологического процесса, непосредственное управление технологическим процессом, передачу данных между территориально рассредоточенными локальными подсистемами. Основой для выбора конструктивной базы КТС ЛИУС-2 является общепромышленная часть системы унифицированных типовых конструкций.

Персональные ЭВМ (ПЭВМ). Они представляют собой миниатюризованный аналог мини-ЭВМ и обладают такими же функциональными возможностями. Однако ПЭВМ значительно дешевле, имеют меньшие габаритные размеры, более гибки в применении и лучше приспособлены для индивидуального пользования. Малая трудоемкость изготовления позволяет выпускать ПЭВМ миллионными тиражами. Среди отечественных ПЭВМ наиболее широко используют персональные ЭВМ ЕС 1840; ПЭВМ «Электроника МС 0501» и др.

Специализированные ЭВМ обладают меньшими вычислительными возможностями и используются для решения определенного класса задач.

По способу эксплуатации их делят на стационарные и транспортируемые (возимые). **Стационарные ЭВМ** устанавливают в помещениях и на открытом воздухе. Это могут быть большие универсальные, настольные и встраиваемые машины.

Транспортируемые ЭВМ эксплуатируются на автомобилях, железнодорожном транспорте, кораблях и т. д. К этому классу относят бортовые цифровые вычислительные машины (БЦВМ), размещенные на борту летательных аппаратов. Как правило, эти машины являются специализированными. Промежуточное положение между транспортируемыми и стационарными ЭВМ занимают портативные ЭВМ (микрокалькуляторы и др.), транспортировку которых осуществляет человек.

Бортовые вычислительные машины (БЦВМ) являются управляющими. К таким машинам предъявляются высокие требования в отношении надежности, быстродействия, устойчивости к механическим, температурным воздействиям и способности к длительной работе в автономном режиме. Их используют в составе сложных бортовых вычислительных систем для решения навигационно-пило-

тажных задач, обеспечения работы радиолокационных средств, контроля бортовых систем, автоматического управления летательными аппаратами и ряда других задач. Они получают информацию от различных датчиков. Физические величины, измеряемые датчиками (скорость, высота и др), являются непрерывными и для ввода в БЦВМ необходимо их преобразование в цифровую форму. Дискретные результаты из БЦВМ должны быть преобразованы в аналоговые величины, так как большинство исполнительных устройств работает от непрерывных сигналов. Различный физический характер информации усложняет всю систему и требует создания преобразователей, обладающих высокой точностью.

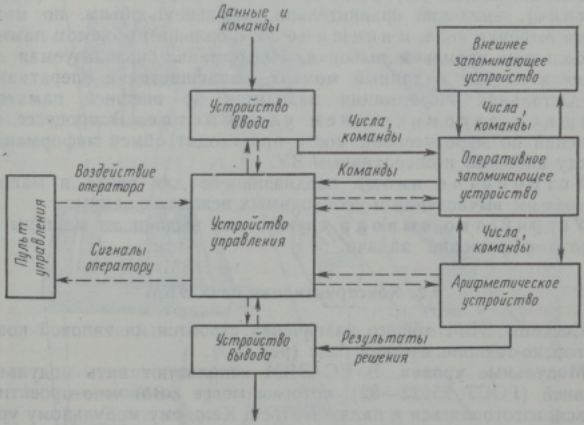


Рис. 1.2. Структурная схема ЭВМ

Габариты, масса и потребление энергии часто определяют возможность использования БЦВМ на борту заданного объекта управления. Для машин среднего быстродействия (200 ... 500 тыс. опер/с) характерны следующие параметры: масса 5 ... 25 кг, объем 6 ... 30 дм^3, потребление электропитания 100 ... 300 Вт.

Структура ЭВМ. Несмотря на различие в конструкции, ЭВМ состоят из пяти основных устройств (рис. 1.2).

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) предназначено для выполнения различных операций над числами (арифметических и др.). Исходные числа поступают в АЛУ из запоминающих устройств.

Устройство управления (УУ) осуществляет управление автоматической работой машины в соответствии с заданной программой вычислений. Прохождение сигналов управления показано на рис. 1.2 штриховыми линиями, а прохождение чисел и команд — сплошными линиями.

Арифметико-логическое устройство и устройство управления образуют **центральный процессор (ЦП).**

Запоминающее устройство (ЗУ) служит для хранения и выдачи исходных данных, промежуточных и окончательных результатов вычислений. Каждая ячейка ЗУ хранит (запоминает) некоторый набор цифр, а номер ячейки называют адресом.

Запоминающие устройства делят на оперативные (внутренние), имеющие сравнительно небольшой объем, но малое время выборки кода, и внешние ЗУ с большим объемом памяти, но большим временем выборки. Информация, используемая для решения задачи в данный момент, размещается в оперативном ЗУ. Остальная информация находится во внешней памяти — внешнем запоминающем устройстве. В процессе вычислений по мере необходимости происходит обмен информацией между внешним и оперативным ЗУ.

Устройство ввода предназначено для ввода в машину программы вычислений и необходимых исходных данных.

Устройство вывода служит для выдачи из машины результатов решения задачи.

1.2. Конструктивная база ЭВМ

Системы ЭВМ общего назначения строятся на типовой конструкторско-технологической базе (рис. 1.3).

Модульные уровни. В ЕС ЭВМ используют пять модульных уровней (ГОСТ 25122—82), которые могут автономно проектироваться, изготовляться и налаживаться. Каждому модульному уровню соответствует типовая конструкция, имеющая несколько вариантов исполнения. Типовые конструкции построены по принципу входимости модуля предыдущего уровня в модуль последующего уровня. Это позволяет выполнять компоновку машин единой системы в виде возрастающих конструкций по модульному принципу.

Модуль первого уровня — интегральная микросхема (ИС) и электрорадиоэлементы.

Модуль второго уровня — типовой элемент замены (ТЭЗ), осуществляющий операции логического преобразования информации. Основу конструкции ТЭЗ составляет двусторонняя или многослойная печатная плата. Интегральные схемы устанавливают с одной стороны платы.

Модуль третьего уровня — панель, содержащая элементы установки, крепления и электрического объединения ТЭЗ.

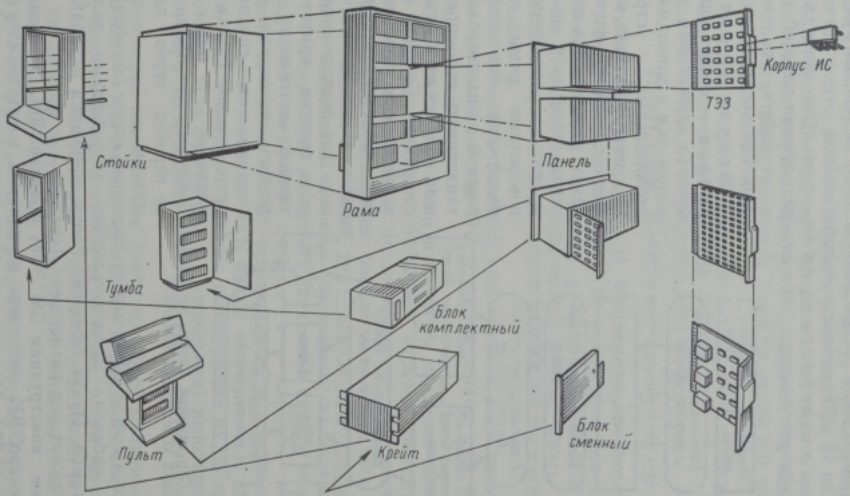


Рис. 1.3. Типовые модули ЭВМ

Несущим элементом является металлическая рамка, на которой крепится кожух с направляющими. Панели могут быть с двухрядным или однорядным расположением ТЭЗ. В каждом ряду размещается до 18 ... 20 типовых элементов замены.

Модуль четвертого уровня — рама. Она имеет сварной каркас, в котором имеются окна для размещения панелей (до 9) и устройств охлаждения (вентиляторов).

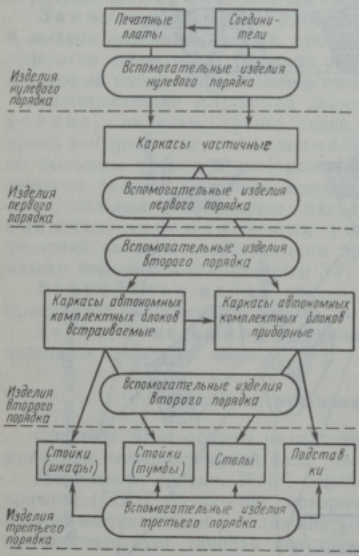


Рис. 1.4. Структурная схема построения типовых конструкций СМ ЭВМ

Модуль пятого уровня — стойка (шкаф), которая служит для размещения рам с панелями и дополнительных устройств. Она имеет несущий каркас, дверцы, щиты, фильтр, а также разъемы для подключения стоек друг к другу. В стойке размещены две поворотные рамы и одна подвижная. Фиксатор подвижной рамы позволяет устанавливать ее в определенном положении в открытом состоянии. Сварной каркас изготовлен из типового для всех моделей профилированного материала (профиля). Для подключения стойки к системе приточно-вытяжной вентиляции в ее нижнем основании предусматривается специальное окно. Типовая стойка имеет размеры 1400×1600×800 мм, что обеспечивает ее перенос через дверные проемы.

Обычно в состав ЭВМ входят несколько стоек (шкафов), соединенных кабелем. Дополнительными устройствами являются пульт и тумба. Пульт содержит блоки индикации и управления, а тумба служит для размещения панелей.

Типовые конструкции СМ ЭВМ и микроЭВМ. Системы СМ ЭВМ и микроЭВМ построены на типовых конструкциях (ГОСТ 20504—71, 26.202—81), которые делятся на пять категорий: изделия нулевого, первого, второго, третьего порядка и вспомогательные. При этом обеспечивается входимость изделий низкого поряд-

ка в изделия на порядок выше. Изделия третьего порядка допускают сопряжение друг с другом (рис. 1.4).

Изделия нулевого порядка — печатные платы, блоки элементов, платы объединительные и соединители.

Международный стандарт устанавливает единые размеры печатных плат по ширине (высоте) H и длине B. За исходные размеры принята плата, имеющая размеры $H_0 = 100$ мм и $B_0 = 100$ мм.

В качестве модуля приращения по высоте u принята величина 44,45 мм, а приращения по длине — 60 мм.

Размеры печатных плат определяют по формулам

$$H = H_0 + nu; \quad B = B_0 + n60 \quad (n = 0, 1, 2, \ldots).$$

В типовых конструкциях СМ ЭВМ применяют четыре размера плат. Платы Е1 размером 100×160 мм служат для компоновки источников питания; платы Е2 размером 233,35×220 мм — для создания функционально законченных блоков. Платы Е3 размером 233,35×100 мм и Е4 размером 100,00×220 мм являются вспомогательными.

Блоки элементов (ячейки) выполнены в виде печатных плат с размещенными на них ИС и соединителями для выполнения разъемных соединений.

Изделиями первого порядка являются частичные каркасы, блоки вентиляторов. Частичные каркасы представляют собой несущие конструкции, предназначенные для размещения и конструктивного объединения блоков элементов. Они имеют 20 типов исполнения, а каждый тип — варианты по высоте. Конструктивное исполнение каркасов обеспечивает их наращивание по высоте и объединение различных каркасов в единую конструкцию.

Изделия второго порядка — каркасы автономных комплексных блоков (АКБ) встраиваемого и приборного исполнений. Встраиваемые АКБ имеют направляющие элементы — ролики, обеспечивающие плавное перемещение их по направляющим стойки. При приборном (настольном) исполнении ролики снимаются, а АКБ закрываются кожухом с вентиляционными окнами.

Автономные комплексные блоки являются функционально законченными устройствами, имеющими индивидуальные блоки питания, системы принудительной вентиляции, блоки элементов, лицевые панели с клавиатурой и органами индикации, расположенными на несущей части каркаса. Выход сигналов обеспечивается с помощью плоских кабелей.

Изделия третьего порядка — стойки (шкафы), которые служат для установки АКБ и других изделий, электрического соединения их и защиты от механических воздействий. В стойках предусмотрены быстросъемные боковые обшивки и задняя дверь, обеспечивающие удобный доступ к АКБ.

Вспомогательные изделия делят также на четыре категории, в зависимости от того, с изделиями какого порядка их применяют. Они служат для организации межблочных связей, оформления лицевой части, обеспечения монтажа и др.

Для организации рабочего места оператора, размещения и электрического соединения средств СМ ЭВМ, не встраиваемых в стойки, служат стол и подставки.

Управляющие микроЭВМ, встраиваемые непосредственно в объект управления, имеют одну печатную плату, на которой устанавливают БИС. Плата имеет соединители и элементы крепления ее на объекте.

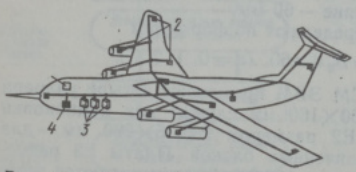


Рис. 1.5. Место БЦВМ в системе управления самолетом:

1 — панель управления; *2* — датчики и исполнительные механизмы; *3* — БЦВМ; *4* — система управления

Типовые конструкции БЦВМ. Небольшие бортовые и настольные ЭВМ монтируют из ячеек, состоящих из двух печатных плат с установленными на них микросхемами. Ячейки помещают на базовую плату и закрепляют кожухом.

Сложные БЦВМ и бортовые вычислительные комплексы имеют более высокие конструктивные уровни, эквивалентные панелям и стойкам.

На самолетах вычислительная аппаратура находится в фюзеляже (рис. 1.5). При этом на нее могут воздействовать вибрационные нагрузки, акустические шумы и удары. Поэтому к конструкциям БЦВМ предъявляют жесткие требования. Они должны иметь минимально возможные габаритные размеры и массу. Для защиты ее от вибрации и ударов применяют демпфирующие устройства, амортизаторы и др.

1.3. Периферийные устройства ЭВМ

Периферийное оборудование ЭВМ представляет собой совокупность всех устройств, не относящихся к ЦП и не связанных непосредственно с обработкой информации. К ним относятся внешние запоминающие устройства, ввода-вывода, алфавитно-цифровые печатающие устройства, устройства ввода графической информации, дисплеи, интерфейсы, устройства подготовки данных и телеобработки.

Внешние запоминающие устройства (ВЗУ). Различают ВЗУ с прямым и последовательным доступом. Устройства с прямым доступом (магнитные барабаны, магнитные диски) позволяют осуществить непосредственное обращение к требуемым данным, пропуская информацию, не требующуюся в данный момент.

Внешние запоминающие устройства с последовательным доступом позволяют реализовать память большой емкости со сменным носителем в виде магнитной ленты. Такие носители имеют большую емкость, высокую надежность и низкую стоимость.

Устройства ввода-вывода (УВВ). Различают перфокарточные и перфоленточные УВВ, алфавитно-цифровые, устройства ввода графической информации, дисплей, пишущие машинки и др.

В перфокартах и перфолентах данные представляются сочетанием пробивок (перфораций). Эти носители были основными средствами ввода информации в ЭВМ первых поколений. Устройства ввода информации с перфоленточных носителей по быстродействию можно разделить на три класса: низкоскоростные (до 300 строк/с), среднескоростные (до 1000 строк/с), высокоскоростные (более 1000 строк/с).

Алфавитно-цифровые печатающие устройства. Их используют в высокоскоростных устройствах вывода.

Устройства ввода графической информации. Эти устройства предназначены для считывания точек графического изображения с носителя записи (определения их координат) и преобразования считанной информации в цифровые коды, из которых формируется массив данных для передачи в память ЭВМ или на графопостроитель.

Дисплеи. Они являются средством отображения текстовой и графической информации на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Вывод графической информации осуществляется графопостроителями.

Интерфейсы. Интерфейсом называется совокупность унифицированных аппаратурных, программных и конструктивных средств, необходимых для реализации взаимодействия различных функциональных элементов в системах обработки информации. К ним относятся интерфейсы ввода-вывода, памяти, внешних устройств. Составными элементами связи являются электрические цепи, которые называют линиями интерфейса. Часть линий, сгруппированных по функциональному назначению, называют *шиной*, а всю совокупность — *магистралью*. Межблочное сопряжение реализуется на уровне коаксиального и оптико-волоконного кабеля гибкими печатными кабелями. Сопряжения внутри шкафа (стойки) выполняются накруткой, а внутриплатные — печатными платами.

Устройства подготовки данных используются автономно. Они включают в себя устройства подготовки, контроля и расшифровки перфокарт; устройства подготовки на магнитной ленте и диске.

Устройства телеобработки. Основными устройствами телеобработки являются абонентские пункты, мультиплексоры передачи данных, обеспечивающих сопряжения аппаратуры передачи данных с ЭВМ.

Стоимость периферийных устройств составляет до 80% стоимости всей вычислительной системы. Особенностью периферийных

РИТБ Таджикской ССР
Инв. № 171032

устройств является широкое применение механических деталей (мелкомодульных шестеренок, валиков, осей, эксцентриков, пружин, рам, кронштейнов и др.), для изготовления которых используются многие виды литья, холодной штамповки, прессования пластмасс, металлокерамики, электрофизические и электрохимические методы обработки.

Наиболее высокие требования предъявляются к деталям ВЗУ. Они должны быть высокоточными. Технология изготовления магнитных дисков, барабанов и некоторых других деталей является специализированной.

1.4. Эксплуатационные требования

Условия эксплуатации ЭВМ могут быть различными. Они зависят в основном от механических и климатических воздействий, которые необходимо учитывать при выборе элементов, готовых изделий, материалов и конструктивного оформления вычислительных машин.

Вычислительные машины, устанавливаемые на *летательных аппаратах*, должны обладать повышенной устойчивостью к механическим перегрузкам, вибрациям и резким колебаниям температуры. При этом необходимо обеспечить минимальный вес и габаритные размеры аппаратуры, ее быстрый демонтаж для ремонта и стабильность параметров при работе в условиях пониженного давления.

Вычислительная аппаратура, используемая на кораблях и других плавательных средствах, должна надежно работать при кренах и дифферентах. Размещение аппаратуры не должно нарушать нормальных условий работы обслуживающего персонала.

Переносная или передвижная аппаратура должна иметь ограниченные габаритные размеры и массу, обеспечивать простоту и надежность электрических соединений, транспортабельность отдельных частей и др.

Для определения влияния окружающей среды на работу ЭВМ рассматривают следующие характерные зоны климата: умеренную, пустынную, тропическую, арктическую и морскую. Кроме того, для ракетной и космической аппаратуры учитывают специфику условий больших высот.

Каждая из этих зон имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при конструировании ЭВМ и их элементов.

Умеренный климат характеризуется сравнительно устойчивыми температурой, влажностью и давлением. Температура воздуха изменяется от —30 до +30°С при относительной влажности воздуха 70...80%.

Пустынный климат отличается высокой дневной темпе-

ратурой (до 60°С), низкой относительной влажностью — около 5%, интенсивным солнечным излучением и песчаной пылью.

Тропический климат имеет высокую влажность воздуха (до 96...100%) и высокую дневную температуру (до 30...40°С). В этих условиях наблюдается интенсивный рост грибковых образований (плесени) и наличие опасных для электронной аппаратуры насекомых (термитов).

Арктический климат характеризуется устойчивой низкой температурой со снегопадами, ветрами и ледяной пылью. Средняя температура зимних месяцев доходит в Арктике до —40°С, а в Антарктиде — до —78°С.

Морской климат отличается насыщенностью атмосферы солью и повышенным влиянием ультрафиолетовых лучей. Температура воздуха изменяется от —40 до +50°С. Влажность воздуха может быть высокой, а при туманах достигать насыщения.

Климатические условия в верхних слоях атмосферы характеризуются пониженным атмосферным давлением, повышенным солнечным излучением, сухостью воздуха (влажность 2..3% и ниже), резким перепадом температур.

При конструировании электронной аппаратуры необходимо учитывать, что колебания температуры приводят к изменению характера посадок, ослаблению крепления, возникновению значительных напряжений, вызывающих деформацию деталей, изменению параметров отдельных элементов. Температурное влияние сказывается тем сильнее, чем больше скорость и частота изменения температуры.

При низкой температуре изменяются свойства многих изоляционных материалов: изделия из пластмассы теряют прочность, из искусственной резины — эластичность. Загустевает смазка в подшипниках и других механических узлах, уменьшается прочность паяных соединений.

При высокой температуре контакты перегреваются, а их переходное сопротивление увеличивается (за счет потери упругости пружин). Разрушаются защитные покрытия.

Особенно вредное воздействие оказывает тепловой удар, заключающийся в быстром чередовании нагрева и охлаждения, что имеет место, например, в некоторой аппаратуре самолетов при подъеме и посадке. Это приводит к растрескиванию изделий, состоящих из материалов с разными коэффициентами линейного расширения, неравномерно изменяющих свои размеры.

Повышенная температура способствует распаду органических материалов, уменьшению вязкости пропиточных и смазочных масел, ухудшает теплоотдачу и уменьшает срок службы отдельных элементов.

Большое влияние на работу электронной аппаратуры оказывает влажность воздуха. Повышенная влажность снижает надежность работы отдельных элементов.

Основными мерами защиты от влаги являются покрытие водонепроницаемыми, водостойкими и водоотталкивающими лаками и красками и герметизация.

При повышенном давлении ухудшаются электрическая прочность элементов и отвод теплоты за счет падения коэффициента теплоотдачи воздуха.

К биологическим факторам относятся грибковые образования (плесень). Наиболее благоприятным условием для развития плесени является сочетание повышенной влажности (до 75%) и теплоты (при 30—35°С). Появление плесени в электронной аппаратуре приводит к нарушению контактов, снижает сопротивление изоляции, ускоряет процесс коррозии металлов за счет выделения органических кислот, разрушает защитные покрытия и др. Наиболее восприимчивы к плесени изоляционные материалы (гетинакс, текстолит, кожа и др.).

Действие солнечной радиации складывается из теплового эффекта и эффекта за счет ультрафиолетовых лучей. При воздействии солнечного света изменяется температура и резко усиливаются процессы распада многих материалов (резины, пластмассы, лака, краски и др.). С увеличением высоты интенсивность облучения возрастает.

Пыль и песок опасны для открытых и слабо защищенных конструкций. Попадая в электронную аппаратуру, они способствуют развитию коррозии.

ГЛАВА 2

СОДЕРЖАНИЕ И ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

2.1. Основные понятия и определения

Производственный процесс — совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления или ремонта выпускаемых изделий. Он включает в себя подготовку производства; получение, транспортирование, контроль и хранение материалов (полуфабрикатов); технологические процессы изготовления деталей и сборки; изготовление технологической оснастки и др.

Производственный процесс делится на основной и вспомогательный. К основному производственному процессу относятся процессы изготовления продукции, предусмотренной государственным планом; к вспомогательному — процессы изготовления оснастки, ремонта оборудования, энергоснабжения и др.

Цехи, в которых осуществляется основной производственный процесс, называются основными, а цехи, в которых реализуется

вспомогательный производственный процесс, — вспомогательными (ремонтный, инструментальный и др.).

Технологический процесс — часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) последующему определению состояния предмета труда. К предметам труда относятся заготовки и изделия.

Основной частью технологического процесса является *технологическая операция* — законченная часть технологического процесса, выполняемая непрерывно на одном рабочем месте.

Примеры технологических операций: сверление отверстий в печатных платах, вжигание толстопленочных резисторов, термотренировка интегральных микросхем и др.

Основными элементами технологических операций являются установ, технологический переход (переход), вспомогательный переход, рабочий ход, вспомогательный ход и позиция.

Установ — часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы.

Переход — законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке.

Вспомогательный переход — законченная часть технологической операции, состоящая из действий человека и (или) оборудования, которые не сопровождаются изменением свойств предметов труда, но необходимы для выполнения технологического перехода. Например, закрепление заготовки, смена инструмента и т. д.

Рабочий ход — законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров и качества поверхности или свойств заготовки.

Вспомогательный ход — законченная часть технологического перехода, состоящего из однократного перемещения инструмента относительно заготовки и необходимого для подготовки рабочего хода.

Позиция — фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операции. Например, обработка в поворотном приспособлении.

Построение технологического процесса и степень его детализации зависят от типа производства — единичного, серийного и массового.

Единичное производство характеризуется малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматриваются.

Серийное производство характеризуется изготовлением или ремонтом изделий, периодически повторяющимися партиями. В зависимости от количества изделий в партии различают мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное производство.

Массовое производство характеризуется большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготовляемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция.

Важной характеристикой является коэффициент закрепления операции

$$K_{з.о}=O/P, \qquad (2.1)$$

где O — число различных технологических операций, выполненных или подлежащих выполнению в течение месяца; P — число рабочих мест.

При $K_{з.о} = 20 \ldots 40$ производство мелкосерийное; при $K_{з.о} = 10 \ldots 20$ — среднесерийное; при $K_{з.о}$ свыше $1 \ldots 10$ — крупносерийное. Для единичного производства $K_{з.о}$ не регламентируется; для массового производства $K_{з.о}=1$.

Программа выпуска в массовом производстве обеспечивает возможность узкой специализации рабочих мест, за которыми закрепляется выполнение только одной операции. В этом случае представляется возможным расположить оборудование в полном соответствии с ходом технологического процесса. Если производительность и количество рабочих мест рассчитаны таким образом, что переход с одной операции на другую осуществляется без задержек, то такая организация производства называется *поточной*.

Выполнение каждой операции на потоке должно осуществляться с заранее установленными тактом и ритмом выпуска.

Такт выпуска — интервал времени, через который периодически производится выпуск изделий или заготовок определенных наименований, типоразмеров и исполнений.

Ритм выпуска — количество изделий или заготовок определенных наименований, типоразмеров и исполнений, выпускаемых в единицу времени.

Для производства больших вычислительных машин характерно изменение серийности производства. На этапах изготовления элементов и блоков производство надо рассматривать как массовое или крупносерийное, а на этапах окончательной сборки (сборки всего изделия) — как мелкосерийное.

2.2. Порядок проектирования технологических процессов

Правильно разработанный технологический процесс должен обеспечить выполнение всех требований, указанных в чертеже и технических условиях, высокую производительность и высокие экономические показатели.

Исходными данными для проектирования технологических процессов являются чертеж детали и общие виды изделий, спецификация всех деталей, монтажные и полумонтажные схемы (для сборки), технические условия на наиболее ответственные детали, сборочные единицы и изделия, размер производственного задания, руководящие технические материалы (данные об оборудовании, нормали на инструмент, типовые технологические процессы и др.).

Виды технологических процессов. Различают три вида технологических процессов: единичный, типовой, групповой.

Единичный технологический процесс (ТП) разрабатывается для изготовления или ремонта изделия одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства. Разработка единичного ТП включает в себя следующие этапы.

1. Анализ исходных данных и выбор действующего типового, группового ТП или аналога единичного процесса.

2. Выбор исходной заготовки и метода ее получения.

3. Определение содержания операций, выбор технологических баз и составление технологического маршрута (последовательности) обработки.

4. Выбор технологического оборудования, оснастки, средств автоматизации и механизации технологического процесса. Уточнение последовательности выполнения переходов.

5. Назначение и расчет режимов выполнения операции, нормирование переходов и операций ТП, определение профессий и квалификации исполнителей, установление требований к технике безопасности.

6. Расчет точности, производительности и экономической эффективности ТП. Выбор оптимального процесса.

7. Оформление рабочей технологической документации.

Необходимость каждого этапа, состава задач и последовательности решения устанавливается в зависимости от типа производства. Типизация технологических процессов позволяет устранить их многообразие с обоснованным сведением к ограниченному числу типов.

Типовой технологический процесс характеризуется единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для групп изделий с общими конструктивными признаками.

Типизацию начинают с классификации изделий. *Классом* называют совокупность деталей, характеризуемых общностью технологических задач. В пределах класса детали разбивают на группы, подгруппы и т. д. до типа. Практически к одному типу относят детали, для которых можно составить один технологический процесс.

Типовой технологический процесс разрабатывают с учетом последних достижений науки и техники, опыта передовых рабочих,

что позволяет значительно сократить цикл подготовки производства и повысить производительность за счет применения более совершенных методов производства.

При изготовлении ЭВМ широко применяют типовые технологические процессы изготовления гибридных и полупроводниковых микросхем, печатных плат, типовых элементов замены, ячеек и др.

Групповой технологический процесс предназначен для совместного изготовления или ремонта групп изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

При группировании одна из наиболее сложных деталей принимается за комплексную. Эта деталь должна иметь все поверхности, встречающиеся у деталей данной группы. Они могут быть расположены в иной последовательности, чем у комплексной детали. При отсутствии такой детали в группе создается условная комплексная деталь.

Групповые технологические операции и схемы настройки станка разрабатываются для комплексной детали. По этому технологическому процессу можно обрабатывать любую деталь группы без значительных отклонений от общей схемы. Если при обработке какой-либо детали не требуется весь комплект инструментов, то пользуются только необходимым, пропуская ненужный. В отдельных случаях возможны замена одного инструмента другим и небольшие подналадки.

Групповые технологические процессы используют для механической обработки деталей на универсальном оборудовании, для электромонтажных, сборочных и других операций, что делает целесообразным применение высокопроизводительных автоматов и полуавтоматов в мелкосерийном производстве (например, для установки и пайки микросхем с планарными выводами на печатной плате).

Выбор технологических баз. Важным этапом проектирования любого технологического процесса является выбор технологических баз.

По назначению базы разделяют на конструкторские, технологические и измерительные.

Конструкторская база используется для определения положения детали или сборочной единицы в изделии; *технологическая база* — для определения положения заготовки или изделия при изготовлении; *измерительная база* — для определения относительного положения изделия или заготовки и средств измерения.

Выбор схемы базирования должен производиться с учетом требуемой точности обработки.

Погрешностью базирования называется отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при базировании от требуемого. Погрешность базирования имеет место при несовпадении технологической и измерительной базы. Она является случайной величиной и подчиняется закону распределения погреш-

ностей по размеру, определяющему положение технологической базы относительно измерительной.

Схема базирования будет обеспечивать требуемую точность при условии, что действительное значение погрешности базирования меньше допустимого. Действительное значение погрешности базирования зависит от принятой схемы, а допустимое значение находят из условия обеспечения заданной точности.

При изготовлении электронных устройств применяют установку заготовки печатной платы на два отверстия с параллельными осями и плоскость. Установочными элементами служат два стержня (рис. 2.1, *а*). Один из них выполняется цилиндрической, а другой — ромбической формы. Последняя обусловлена необходимостью учета допуска δ на расстояние l между осями отверстий. Наличие допуска приводит к тому, что одно из отверстий занимает при установке партии заготовок два предельных положения. Очевидно, что область, образованная пересечением окружностей a и b (рис. 2.1, *б*), принадлежит всем заготовкам в данной партии. Если стержень сделать круглым, то его диаметр должен быть равен $d-\delta$. В этом случае будет покачивание заготовки на стержне от среднего положения на $\pm\delta/2$.

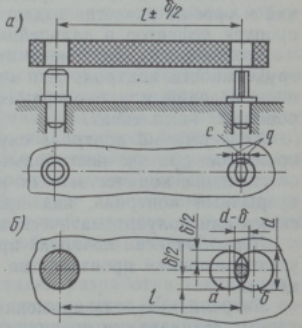


Рис. 2.1. Базирование по двум отверстиям и плоскости

Поперечное сечение ромбического стержня выполняется с небольшой ленточкой c, значение которой выбирается в зависимости от допуска δ и радиального зазора. Свободное перемещение детали $2q$ является необходимым условием для обеспечения установки всех деталей:

$$2q \geqslant \delta \quad \text{или} \quad q \geqslant \delta/2. \qquad (2.2)$$

Виды контроля. Неотъемлемой составной частью технологического процесса является технический контроль, который должен охватывать весь технологический процесс и предотвращать попадание дефектных материалов и изделий на последующие этапы изготовления или ремонта. На этапе производства устанавливают три вида контроля: входной, операционный и приемочный.

Входной контроль используют для проверки соответствия материалов, заготовок, комплектующих изделий и сборочных единиц, поступающих на предприятие; *операционный контроль* — для проверки деталей и сборочных единиц в процессе изготовления

или ремонта, а также количественных и качественных характеристик технологических процессов; *приемочный контроль* — для проверки соответствия качества готовых изделий требованиям, установленным в нормативно-технической документации.

Контроль может быть сплошной, выборочный, непрерывный, периодический, летучий.

Сплошной контроль применяют в условиях высоких требований к уровню качества изделий, у которых абсолютно недопустим пропуск дефектов в дальнейшее производство или эксплуатацию.

Выборочный контроль используют для изделий при большой трудоемкости контроля или при контроле, связанном с разрушением изделий или с операциями, выполняемыми на автоматизированных комплексах.

Непрерывный контроль служит для проверки технологических процессов при их нестабильности и необходимости постоянного обеспечения количественных и качественных характеристик. Непрерывный контроль, как правило, осуществляется автоматическими или полуавтоматическими методами контроля.

Периодический контроль применяют для проверки изделий при установившемся производстве и стабильных технологических процессах.

Летучий контроль применяют в специальных случаях, установленных стандартами предприятия.

Выбор средств контроля должен быть основан на обеспечении заданных показателей процесса контроля и анализа затрат на реализацию его процесса в установленный промежуток времени при заданном качестве изделия.

Обязательными показателями процесса контроля являются точность измерений, достоверность, трудоемкость и стоимость контроля.

При выборе средств контроля должно обеспечиваться оптимальное применение прогрессивных механизированных и автоматизированных, универсальных и стандартных средств контроля; повышение производительности и снижение трудоемкости контроля и безопасность труда.

2.3. Технологическая документация

Состав и правила выполнения технологической документации определяются (ГОСТ 3.1001—81) единой системой технологической документации (ЕСТД). Она представляет собой комплекс государственных стандартов и руководящих нормативных документов, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, комплектации, оформления и обращения технологической документации, применяемой при изготовлении и ремонте изделий (включая контроль, испытания и перемещения).

Основное назначение стандартов ЕСТД заключается в установлении во всех организациях и на всех предприятиях единых правил выполнения, оформления, комплектации и обращения технологической документации в зависимости от типа и характера производства. Эти правила обеспечивают взаимообмен технологическими документами между организациями и предприятиями без их переоформления, а также стабильность комплектности, исключающую повторную разработку и выпуск дополнительных документов.

Стандартизация обозначений и унификация последовательности размещения однородной информации в формах документации на различные виды работ позволяют использовать средства вычислительной техники для управления производством и проектирования ТП, создают условия для разработки прогрессивных типовых (групповых) процессов и предпосылки по снижению трудоемкости инженерно-технических работ в сфере технологической подготовки.

К технологическим относят графические и текстовые документы, которые определяют технологический процесс изготовления или ремонта изделия и содержат необходимые данные для организации производства.

Состав документов зависит от стадии разработки технологического процесса, типа и характера производства. В условиях серийного и массового производства используются следующие документы (ГОСТ 3.1102—81): карта эскизов (КЭ); технологическая инструкция (ТИ); карты — маршрутная (МК), технологического процесса (КТП), операционная (ОК), типового (группового) технологического процесса (КТТП), типовой (групповой) операции (КТО), комплектовочная (КК), технико-нормировочная (ТНК), наладки (КН); ведомость технологических маршрутов (ВТМ); ведомость деталей (сборочных единиц) к типовому (групповому) технологическому процессу (операции) (ВТП, ВТО).

На стадиях проектирования (предварительного проекта и опытного образца) вид документа выбирается по усмотрению заказчика. Наиболее часто используется следующая документация.

Маршрутная карта является обязательным документом. Она предназначена для маршрутного и маршрутно-операционного описания технологического процесса или указания полного состава технологических операций при операционном описании изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия), включая контроль и перемещения по всем операциям различных технологических методов в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, технологической оснастке, материальных нормативах и трудовых затратах. Допускается взамен МК использовать соответствующую карту технологического процесса.

Карта технологического процесса предназначена для операционного описания технологического процесса изготовления или ремонта изделия (составных частей) в технологической последова-

тельности по всем операциям одного вида формообразования, обработки, сборки или ремонта, с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах.

Операционная карта содержит описание технологической операции с указанием переходов, режимов обработки и данных о средствах технологического оснащения. Она используется непосредственно на рабочем месте.

Карта типового технологического процесса используется для описания типового технологического процесса изготовления или ремонта деталей и сборочных единиц, а карта типовой операции — для описания типовой технологической операции.

Общие правила оформления технологических документов приведены в ГОСТ 3.1104—81. В соответствии с этими правилами операции следует нумеровать числами ряда арифметической прогрессии (5, 10, 15 и т. д.); к числам слева допускается добавлять нули (005, 010, 015 и т. д.). Переходы следует нумеровать числами натурального ряда (1, 2, 3 и т. д.). Для обозначения позиций допускается применять римские цифры.

Условные графические обозначения опор и зажимов в технологической документации производятся в соответствии с ГОСТ 3.1107—81. Формы МК и правила ее оформления установлены ГОСТ 3.1118—82, а общие требования к оформлению комплектов документов на единичные процессы изложены в ГОСТ 3.1119—83.

Требования к безопасности труда (в том числе и требования о применении средств защиты работающих) излагают перед описанием операции или делают ссылку на ТИ.

ГЛАВА 3
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА

3.1. Организация и управление технологической подготовкой производства

Технологическая подготовка производства (ТПП) представляет собой совокупность мероприятий, обеспечивающих готовность предприятия к выпуску изделия. Под *полной технологической готовностью* понимается наличие на предприятии всей конструкторской и технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для осуществления заданного объема выпуска продукции с установленными технико-экономическими показателями.

Организация и управление технологической подготовкой производства осуществляется в соответствии с Единой системой технологической подготовки производства (ЕСТПП), предусматривающей широкое применение прогрессивных типовых технологи-

ческих процессов, стандартной технологической оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов, инженерно-технических и управленческих работ.

Основное назначение ЕСТПП заключается в решении задач обеспечения технологичности конструкции изделия; разработки технологических процессов; проектирования и изготовления средств технологического оснащения, организации и управления процессом ТПП.

Одной из важнейших составляющих частей ТПП является проектирование технологических процессов. Оно требует больших затрат времени и труда, что сдерживает освоение производства новых изделий в сжатые сроки. В процессе проектирования технолог перерабатывает большое количество информации и выполняет работы различной сложности: решает как комплексные сложные задачи, так и простые вычислительные операции, заполняет текст технологической документации, вычерчивает эскизы и т. п.

Обычное проектирование ТП ведется по методике, определяемой разработчиком. Она зависит от его опыта и навыков, наличия справочных материалов и других причин. Даже при одинаковой квалификации исполнителей нет гарантии в получении равноценных по качеству результатов.

Создание автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП) позволяет повысить производительность и качество проектных работ, сократить сроки технологической подготовки и уменьшить количество инженерно-технических работников, необходимых для ее осуществления, повысить качество проектируемых технологических процессов. В АСТПП более 60% объема инженерных работ выполняется на ЭВМ.

Технической основой создания и внедрения АСТПП является унификация технологических процессов и применяемой оснастки на основе типовых и групповых процессов.

Основным структурным элементом АСТПП являются подсистемы.

По функциональному назначению установлено два типа подсистем: общего и специального назначения.

Подсистемами общего назначения являются: информационный поиск; кодирование; контроль и преобразование информации, формирование исходных данных для автоматизированных систем управления различных уровней; оформление технической документации.

Подсистемы специального назначения включают в себя обеспечение технологичности конструкции; проектирование технологических процессов; конструирование средств технологического оснащения; управление ТПП; изготовление средств технологического оснащения. Состав подсистем специального назначения следует устанавливать для каждого предприятия с учетом специфики ТПП и экономической целесообразности.

На рис. 3.1 представлена функциональная схема АСТПП, которая устанавливает связь между отдельными подсистемами и определяет направление хода проектирования. Каждая подсистема характеризуется определенным уровнем автоматизации (диалого-

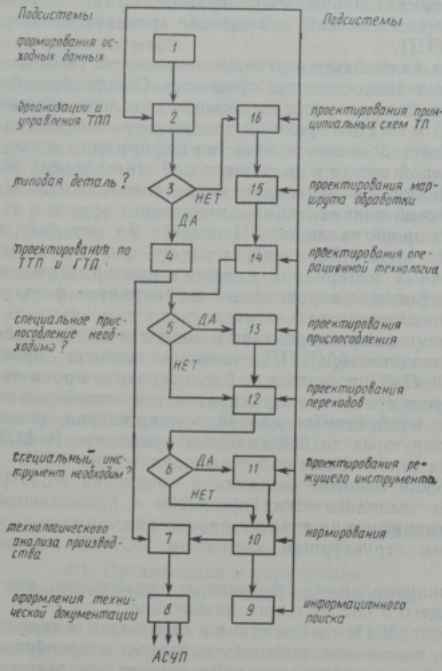


Рис. 3.1. Функциональная схема АСТПП

вая, автоматизированная и т. п.) и имеет свои алгоритмы и программы принятия решений. В процессе проектирования используются входная информация, представляющая собой формализованное описание объекта, и справочно-нормативная информация, которая содержит сведения о ранее разработанных технологических процессах, режимах обработки и др.

3.2. Технологичность конструкции элементов и деталей ЭВМ

Технологичность конструкции является одной из важнейших характеристик изделия. Под *технологичностью изделия* понимают совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

Различают производственную и эксплуатационную технологичность. *Производственная технологичность конструкции* изделия проявляется в сокращении затрат средств и времени на конструкторско-технологическую подготовку производства и процессы изготовления, включая контроль и испытания; *эксплуатационная технологичность* — в сокращении затрат времени и средств на техническое обслуживание и ремонт изделия.

Требования, предъявляемые к технологичности конструкции, меняются в зависимости от вида изделия, объема выпуска и типа производства. Изделие, технологичное в условиях мелкосерийного выпуска, может оказаться нетехнологичным при массовом изготовлении. Наиболее целесообразным является отработка технологичности конструкции во время ее проектирования.

Основное содержание работ по обеспечению технологичности конструкции изделий на всех стадиях разработки конструкторской документации приведено в ГОСТ 14.201—83. Технологичность конструкции изделия можно оценить количественно и качественно.

Качественная оценка характеризует технологичность конструкции обобщенно на основании опыта исполнителя. Такая оценка допустима на всех стадиях проектирования, когда осуществляется выбор лучшего конструктивного решения и не требуется определения степени технологичности сравниваемых вариантов. Качественная оценка в процессе проектирования предшествует количественной и определяет целесообразность ее проведения.

Количественная оценка осуществляется с помощью системы базовых показателей.

По способу выражения характеризуемых признаков показатели технологичности могут быть абсолютные и относительные, а по количеству признаков — частные и комплексные. *Частный показатель технологичности конструкции изделия* характеризует одно из входящих в нее свойств, а *комплексный показатель* — несколько входящих в него частных и комплексных свойств.

Рекомендуемый перечень показателей технологичности конструкции изделий приведен в ГОСТ 14.201—83. Наиболее важными из них являются трудоемкость изготовления изделия и технологическая себестоимость. В отраслевых стандартах, разрабатываемых на основе государственных стандартов, приводится номенклатура базовых (частных) показателей и методика их определения.

Базовые показатели технологичности для электронных блоков, определяемые на стадии разработки рабочей документации, их ранжированная последовательность по весовой значимости приведены в табл. 3.1.

Значения базовых показателей применяются в пределах $0<K_i<1$. Увеличение показателя соответствует более высокой технологичности изделия.

Таблица 3.1

Порядковый номер в ранжированной последовательности i	Показатели технологичности	Обозначение	Коэффициент φ_i
1	Коэффициент использования микросхем и микросборок в блоке	$K_{\text{имс}}$	1,000
2	Коэффициент автоматизации и механизации монтажа	$K_{\text{а.м}}$	1,000
3	Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ	$K_{\text{м.п.эрэ}}$	0,750
4	Коэффициент автоматизации и механизации операций контроля и настройки	$K_{\text{м.к.н}}$	0,500
5	Коэффициент повторяемости ЭРЭ	$K_{\text{пов.эрэ}}$	0,310
6	Коэффициент применяемости ЭРЭ	$K_{\text{п.эрэ}}$	0,187
7	Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	$K_{\text{ф}}$	0,110

Коэффициент φ_i зависит от порядкового номера основных показателей технологичности, ранжированная последовательность которых устанавливается экспертным путем:

$$\varphi=i/2^{i-1}, \qquad (3.1)$$

где i — порядковый номер показателя в ранжированной последовательности.

Коэффициент использования микросхем и микросборок в блоке

$$K_{\text{и.мс}}=H_{\text{мс}}/H_{\text{эрэ}}, \qquad (3.2)$$

где $H_{\text{мс}}$ — общее количество микросхем и микросборок в изделии, шт.; $H_{\text{эрэ}}$ — общее количество электрорадиоэлементов (ЭРЭ), шт.

К ЭРЭ относят микросхемы, микросборки, транзисторы, диоды, резисторы и т. п. Под *типоразмером* ЭРЭ понимается габаритный размер без учета номинальных значений.

Коэффициент автоматизации и механизации монтажа изделий

$$K_{\text{а.м}}=H_{\text{а.м}}/H_{\text{м}}, \qquad (3.3)$$

где $H_{\text{а.м}}$ — количество монтажных соединений, которые могут осуществляться механизированным или автоматизированным способом, шт.; $H_{\text{м}}$ — общее количество монтажных соединений, шт.

Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ к монтажу

$$K_{м.п.эрэ} = H_{м.п.эрэ}/H_{эрэ}, \quad (3.4)$$

где $H_{м.п.эрэ}$ — количество ЭРЭ, подготовка которых к монтажу может осуществляться механизированным и автоматизированным способом, шт.

Коэффициент автоматизации и механизации операций контроля и настройки электрических параметров

$$K_{м.к.н} = H_{м.к.н}/H_{к.н}, \quad (3.5)$$

где $H_{м.к.н}$ — количество операций контроля и настройки, которое можно осуществить механизированным или автоматизированным способом, шт. (В число таких операций включаются операции, не требующие средств механизации); $H_{к.н}$ — общее количество операций контроля и настройки, шт.

Коэффициент повторяемости ЭРЭ

$$K_{пов.эрэ} = 1 - H_{т.эрэ}/H_{эрэ}, \quad (3.6)$$

где $H_{т.эрэ}$ — общее количество типоразмеров ЭРЭ в изделии, шт.

Коэффициент применяемости ЭРЭ

$$K_{п.эрэ} = 1 - H_{т.ор.эрэ}/H_{т.эрэ}, \quad (3.7)$$

где $H_{т.ор.эрэ}$ — количество типоразмеров оригинальных ЭРЭ в изделии, шт.

Коэффициент прогрессивности формообразования деталей

$$K_{ф} = Д_{пр}/Д, \quad (3.8)$$

где $Д_{пр}$ — количество деталей, полученных прогрессивными методами формообразования (штамповкой, прессованием, литьем под давлением и т. п.), шт.; $Д$ — общее количество деталей (без нормализованного крепежа) в изделии, шт.

Основным показателем, используемым для оценки технологичности конструкции, является *комплексный показатель технологичности конструкции изделия*

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^{n} \varphi_i} = \frac{K_1\varphi_1 + K_2\varphi_2 + \ldots + K_n\varphi_n}{\varphi_1 + \varphi_2 + \ldots + \varphi_n}, \quad (3.9)$$

где K_i — значение показателя, определяемого по таблице состава базовых показателей; φ — коэффициент, нормирующий весовую значимость показателя в зависимости от его порядкового номера в таблице; n — общее количество частных показателей; i — порядковый номер показателя в ранжированной последовательности.

Уровень технологичности конструкции изделия при известном нормативном показателе оценивается отношением полученного комплексного показателя к нормативному, которое должно удовлетворять условию $K/K_н \geqslant 1$.

Нормативное значение показателя $K_н$ технологичности конструкций блоков электронно-вычислительной техники для условий серийного производства составляет 0,5 .. 0,8, а для опытного производства — 0,4 ... 0,7.

При анализе полученных результатов необходимо учитывать сложность изделия и уровень основного производства завода-изготовителя.

Конструкция детали должна отвечать следующим требованиям: состоять из стандартных и унифицированных элементов, изготовляться из стандартных заготовок, иметь оптимальные точность и шероховатость поверхностей, обеспечивать возможность применения стандартных и типовых процессов ее изготовления, а также возможность одновременного изготовления нескольких деталей и применения наиболее прогрессивных процессов формообразования: литья под давлением, литья по выплавляемым моделям, прессования пластмасс, металлокерамики, холодной штамповки.

3.3. Структура систем автоматизированного проектирования технологических процессов

Система автоматизированного проектирования (САПР) — организационно-техническая система, представляющая собой комплекс средств автоматизированного проектирования, взаимосвязанный с подразделениями проектной организации и выполняющий автоматизированное проектирование.

Производительность САПР в большей степени зависит от программного обеспечения (ПО), возможности которого ограничены трудностями алгоритмизации конструкторско-технологических задач. В связи с этим важное значение имеет создание диалоговых систем (рис. 3.2).

Виды программного обеспечения. В САПР различают следующие виды ПО (ГОСТ 23501.0—79): методическое, лингвистическое, математическое, программное, информационное, техническое и организационное.

Методическое обеспечение — комплекс документов, устанавливающих состав и правила отбора и эксплуатации средств обеспечения автоматизированного проектирования. Разработка таких документов является творческим процессом и выполняется человеком.

Лингвистическое обеспечение — совокупность языков проектирования, терминов, определений, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования. Оно состоит из языков программирования, проектирования и управления; четкой

границы между ними провести нельзя. В ряде случаев возможно использование одного и того же языка как для программирования, так и для описания исходных данных.

Для программирования чаще других используются алгоритмические языки высокого уровня — ФОРТРАН, АЛГОЛ, КОБОЛ, ПЛ/1, Паскаль и др. Они являются универсальными и позволяют программировать практически любые задачи.

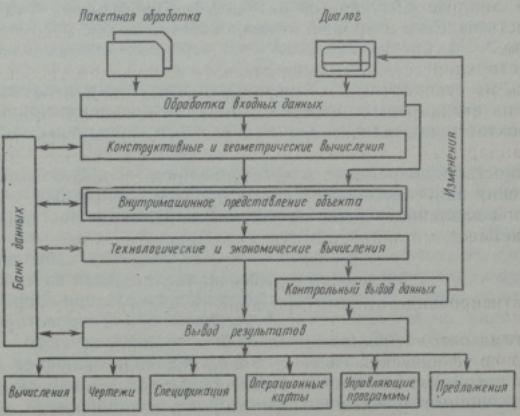


Рис. 3.2. Структурная схема САПР технологического процесса

Языки проектирования служат для связи пользователя с ЭВМ и для представления информации внутри ЭВМ. Они могут быть универсальными и специализированными. Специализированные языки принято называть проблемно-ориентированными языками (ПОЯ), которые весьма многочислены и ориентированы на конкретную ЭВМ и базу данных.

Математическое обеспечение — совокупность математических методов, моделей и алгоритмов проектирования, необходимых для выполнения проектных процедур. Основу математического обеспечения составляют алгоритмы, по которым разработано ПО САПР. По назначению и способам реализации математическое обеспечение делится на две части: первую часть составляют математические модели, вторую часть — формализованное описание технологии автоматизированного проектирования.

Программное обеспечение — комплекс программ и необходимой эксплуатационной документации к ним в виде обыч-

ных текстовых документов или записанных на машинных носителях. Программное обеспечение САПР делят на общесистемное и специализированное.

Общесистемное ПО включает в себя управление процессом вычислений; диалоговую взаимосвязь с пользователем в процессе проектирования; хранение, поиск, анализ данных и др.; специализированное ПО — прикладные программы и пакеты прикладных программ.

С развитием ЭВМ большое значение приобретают операционные системы (ОС), которые одновременно решают различные задачи на ЭВМ, распределяют каналы передачи данных и внешних устройств.

Важным компонентом ПО являются программы и пакеты прикладных программ, которые строят по модульному принципу — разделению программ на самостоятельные функциональные модули.

Информационное обеспечение — информация, используемая непосредственно для выработки проектных решений. Оно состоит из оперативной, условно-постоянной и постоянной информаций.

Оперативная информация включает в себя сведения об условиях решения задачи и подготавливается для каждого конкретного процесса. Продолжительность использования оперативной информации ограничивается завершением цикла проектирования технологического процесса детали или сборочной единицы.

Условно-постоянная информация включает в себя сведения о предмете производства, средствах производства и о продукте производства (чертежи изделия, технические условия и др.). Ее подготавливают заранее и длительное время хранят в системе проектирования. Условно-постоянная информация корректируется или полностью заменяется при переходе к другим производственным условиям или к новому классу задач.

Постоянная информация содержит сведения о машинных программах автоматизированного проектирования.

Составной частью информационного обеспечения являются автоматизированные банки данных, которые состоят из баз данных и системы управления базами данных (СУБД).

База данных (БД) представляет собой совокупность данных, организованных по определенным правилам и предусматривающих общие принципы описания, хранения и манипулирования данными независимо от прикладных программ. База данных строится по принципу информационного единства и допускает объединение любого числа баз с использованием общих данных различными подсистемами САПР.

Состав автоматизированного банка данных определяется с учетом характеристик объектов и процесса их проектирования, ти-

повых решений, описания технологических операций, действующих нормативов и справочных данных. Автоматизированный банк данных должен обладать гибкостью, надежностью, наглядностью и экономичностью.

Система управления базами данных представляет собой комплекс программ, обеспечивающих централизованное хранение, накопление, модификацию и выдачу данных, а также языковых средств, предназначенных для управления данными в БД и обеспечения взаимодействия БД ее с прикладными программами.

Техническое обеспечение — совокупность взаимосвязанных технических средств для ввода, хранения, переработки, передачи программ и данных, организации общения человека с ЭВМ, изготовления проектной документации.

Для решения сложных задач проектирования применяют вычислительные комплексы на основе многопроцессорного комплекса «Эльбрус» и ЭВМ ЕС 1066.

В комплексах, предназначенных для получения конструкторско-технологической документации и управляющих программ, ядром технических средств автоматизированного рабочего места (АРМ) и исполнительного оборудования служат мини- и микроЭВМ.

На основе микроЭВМ СМ 1810 построено АРМ «Автограф-840», которое обеспечивает в интерактивном режиме автоматизированную разработку технологических процессов и подготовку управляющих программ для станков с ЧПУ.

В САПР применяют персональные ЭВМ. Быстродействие ПЭВМ ЕС 1840 составляет до 1 млн. коротких опер/с.

Организационное обеспечение — комплект документов, устанавливающих правила автоматизированного проектирования, выпуска, использования и корректировки входных документов САПР, доступа к БД и др.

Примеры действующих САПР. Для изделий электронной техники и радиоэлектронной аппаратуры разработаны и находятся в эксплуатации ряд САПР [2, 24, 25].

Система ПРАМ-1,1. Система предназначена для автоматизированного проектирования механических конструкций радиоэлектронной аппаратуры. Она обеспечивает выпуск чертежей и текстовой документации, является универсальной. Область ее использования может быть расширена на большинство каркасно-корпусных конструкций за счет включения новых пакетов прикладных программ. В системе используется специально разработанный язык кодирования объектов ЯКОБ-2, обеспечивающий полное оформление чертежей согласно ЕСКД (рис. 3.3), а также редактор входных данных и полуавтоматический (оптический) кодировщик графической информации (ПКГИ-0).

Система может работать в режиме «Чертежник» (синтез одного чертежа) или «Конструктор» (синтез сборочного чертежа).

База данных системы хранит информацию во внешнем и внут-

реннем представлениях языка ЯКОБ-2. Внешнее представление доступно пользователю, но компоновка чертежей производится с использованием внутреннего представления.

Транслятор контролирует описания, находящиеся в файле, и формирует файл в формате внутреннего представления.

Компоновщик выполняет конструкторские программы и формирует интерфейсный файл для передачи постпроцессору и технологической системе.

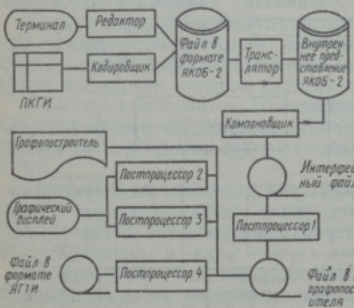


Рис. 3.3. Структурная схема системы ПРАМ-1.1

Постпроцессор *1* вывода на графопостроитель создает файл в кодах графопостроителя для дальнейшего вывода через постпроцессоры *2* и *3* на графический дисплей, что позволяет просмотреть изображение по частям перед выводом на графопостроитель. Постпроцессор *4* формирует файл в формате языка графической и текстовой информации (ЯГТИ). Система ПРАМ-1.1 построена на основе технических и программных средств АРМ на базе мини-ЭВМ.

Интегрированная система «проектирование — изготовление». В интегрированной системе (рис. 3.4) объединяются подсистемы конструирования, геометрического моделирования и разработки технологии изготовления проектируемых изделий. Основой объединения является использование общей базы данных.

Единая система автоматизированного проектирования и изготовления радиоэлектронной аппаратуры (ЕСАП-2Б). Она обеспечивает сквозной автоматизированный цикл проектирования, изготовления и наладки блоков на основе единого лингвистического обеспечения, общей БД и формирования полных комплектов конструкторско-технологической документации. В состав конструкторской документации входят функциональные и принципиальные электрические схемы, чертежи монтажных плат, таблицы соединений, спецификации и др.; технологической документации — перфоленты для управления сверлильными станками с программным управлением, фотошаблоны для печатных плат и др. Система позволяет выполнять контроль монтажных соединений на соответствие электрической схеме, тестовый контроль и т. д.

В системе широко используют устройство и технологическое оборудование с ЧПУ для автоматизации процесса изготовления, наладки и контроля блоков.

Создаются интегрированные системы в виде сквозной цепочки АСНИ—САПР—АСТПП—АСУТП и др. Примером такой системы может служить САПР КАПРИ, представляющая собой

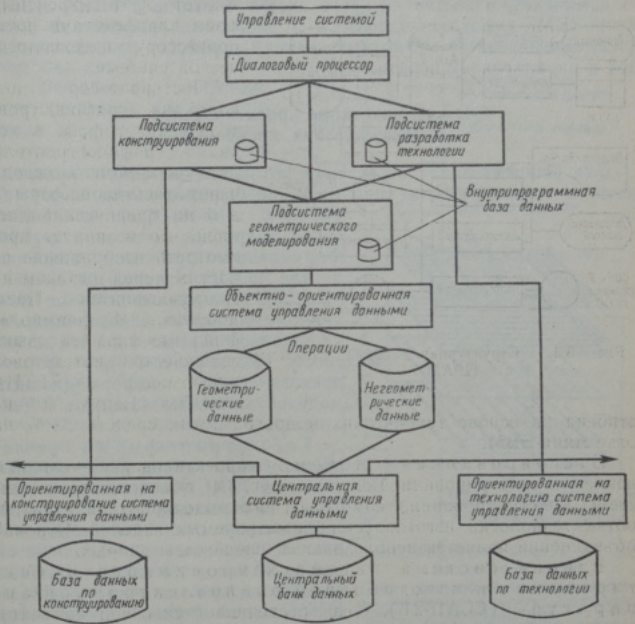


Рис. 3.4. Структура интегрированной системы «проектирование — изготовление»

замкнутый цикл: научные исследования (АСНИ) — опытное производство (АСУТП).

Система САПР КАПРИ. Система выполняет следующие автоматизированные функции:

1) проектирование сборочных узлов, типовых и оригинальных деталей;

2) проектирование технологических процессов (выбор загото-

вок, режимов обработки, формирование маршрутных и операционных технологических карт, конструирование оснастки, подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ и др.);

3) управление технологическими процессами;

4) организационно-экономическое управление.

Система реализуется на базе многомашинного вычислительного комплекса, в состав которого входят большие и малые ЭВМ, микроЭВМ, алфавитно-цифровые и растровые графические дисплеи, накопители на магнитных дисках, устройства последовательной и параллельной печати.

3.4. Автоматизация проектирования технологических процессов

Для решения задач в системах автоматизированного проектирования технологических процессов необходимо иметь информационную модель, представляющую собой подробное описание детали. Формализованные языки описания детали (ЯОД) отличаются специализацией и ограничениями по словарному составу, однозначностью, упрощенной грамматикой и синтаксисом. Установлены две формы представления информационных моделей на ЯОД: табличная и текстовая*.

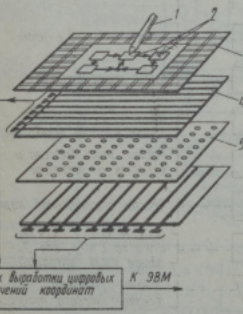


Рис. 3.5. Устройство графического ввода информации:

1 — карандаш; *2* — графическое изображение; *3* — лист полихлорвинила с сеткой; *4* — лист диэлектрика с проводящими шинами; *5* — пленка с отверстиями в местах пересечения проводников

Табличная форма реализуется в виде таблиц кодированных сведений (ТКС), содержащих массивы информации о различных свойствах детали. Пять таблиц являются основными и заполняются для всех видов деталей, остальные заполняют при наличии у детали определенной формы. Имея набор ТКС, в которых каждому элементу детали соответствует определенный набор символов (код), можно описать деталь множеством таких кодов. Содержание ТКС рекомендуется сокращать за счет изъятия параметров, не участвующих в решении конкретных задач проектирования.

Текстовая форма информационной модели содержит полное формализованное описание детали и включает в себя данные

* *Горанский Г. Н., Бендерева Э. И.* Технологическое проектирование в комплексных автоматизированных системах подготовки производства.— М.: Машиностроение, 1981.

для идентификации детали, общие сведения о детали; сведения об элементарных поверхностях; о комплексе и группе соосных отверстий; сведения о размерных связях и технических требованиях; данные о форме детали.

Исходные данные для построения информационной модели в текстовой или табличной форме получают из чертежа детали.

Графическая информация (чертежи, схемы, графики и др.) может быть введена в ЭВМ при помощи автоматизированных устройств ввода (контактных, магнитных, емкостных и др.).

Дискретные контактные устройства (рис. 3.5) используют планшет, состоящий из двух тонких листов диэлектрика с нанесенными на них проводящими шинами. При обводе чертежа щупом (карандашом), установленным на планшете, отдельные шины замыкаются между собой и управляют электронной схемой, вырабатывающей коды точек, в которых произошли замыкания. Достоинством контактных устройств ввода является простота электронной схемы кодирования, а недостатком — низкая разрешающая способность.

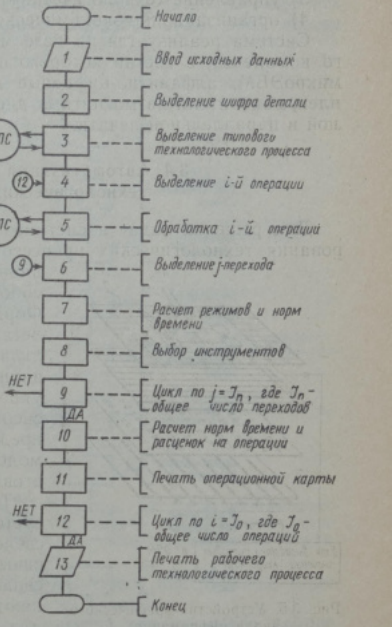


Рис. 3.6. Схема алгоритма проектирования рабочих процессов на базе типовых технологических процессов

Особенностью проектирования технологических процессов является большое количество вариантов, с помощью которых можно обрабатывать деталь или осуществлять сборку изделия.

Для выбора оптимального варианта процесса используют диалоговые системы проектирования. При этом происходит обмен информацией между технологом и автоматизированной системой проектирования путем вывода информации на экран дисплея. В режиме диалога возможен вывод нескольких вариантов готовых решений для выбора оптимального варианта или вывод про-

межуточной информации для оценки результатов проектирования и введения в случае необходимости корректив.

На основе типовых технологических процессов можно построить простую схему проектирования рабочих технологических процессов (рис. 3.6). Типовые технологические процессы содержат

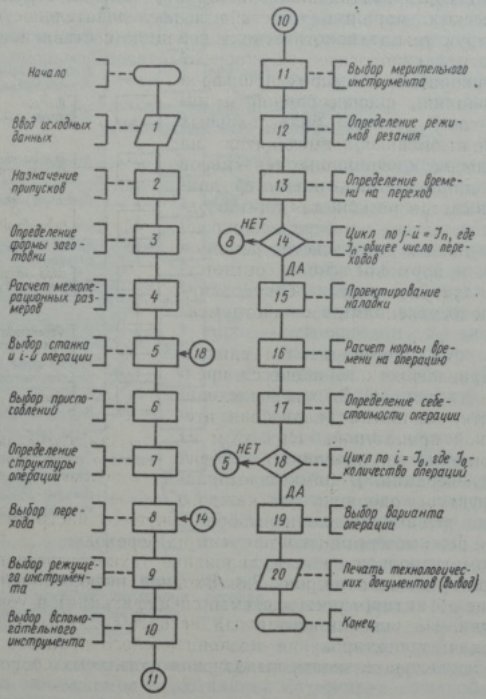


Рис. 3.7. Схема алгоритма проектирования единичного технологического процесса

в качестве нормализованных параметров сведения о заготовке, составе и последовательности операций и переходов, применяемом оборудовании, приспособлениях и инструментах.

По конструктивно-технологическому коду (обозначению), который определяется по классификатору типовых деталей и записывается в таблицу кодировочных сведений, из информационно-поисковой системы (ИПС) вызывается соответствующий типовой технологический процесс.

Рабочий технологический процесс формируется путем доработки ТТП. Доработка заключается в уточнении структуры технологического маршрута (состава и последовательности операций); структуры технологических операций (состава и последовательности технологических переходов); типоразмеров, марок и шифров оборудования, приспособлений и инструментов из числа универсальных и нормализованных, имеющихся на предприятии; переменных размеров детали данного типа, например длины и диаметра резьбы для винтов одного типа, а также в определении исходных данных для расчетов режимов резания и норм времени в соответствии с уточненными оборудованием, приспособлениями и инструментами.

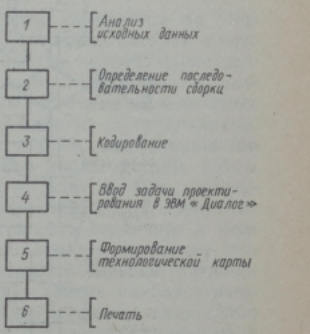


Рис. 3.8. Схема автоматизированного проектирования технологического процесса сборки

Алгоритм проектирования единичного технологического процесса представлен на рис. 3.7. Выбор последовательности обработки реализован итерационной процедурой. При этом из всего множества проводится анализ каждой операции. В рамках выбранной структуры операции для каждого перехода решаются задачи выбора режущего инструмента, определения режимов резания и времени на переход.

Автоматизированное проектирование технологического процесса сборки показано на рис. 3.8. Входной информацией является описание объекта (чертежи, схемы, спецификации) и условий производства. На основании анализа исходных данных формулируется задача проектирования технологического процесса и определяется последовательность выполнения отдельных сборочных операций.

На следующем этапе производится кодирование информации, вводимой в ЭВМ. Кодировочные карты заполняются проектировщиком и содержат данные о размерах сопрягаемых деталей, точности процесса сборки и др. Различают кодировочные карты для операций манипулирования и крепления деталей.

Проектирование ведется в режиме диалога. Стандартные программы, ориентированные на определенный тип технологического

процесса, содержат информацию для вариантов его выполнения. Они позволяют выбрать наиболее экономичный вариант.

При определении типа манипулирования (пригонка, регулировка и т. п.) оптимизация процесса не производится.

Проектирование сборочных приспособлений и специального инструмента выполняется проектировщиком.

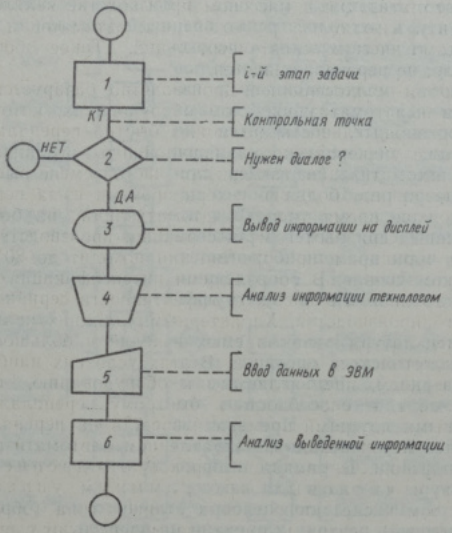


Рис. 3.9. Функциональная схема диалога технолога с ЭВМ

Функциональная схема диалога технолога с ЭВМ приведена на рис. 3.9. После вывода промежуточной информации на дисплей и ее анализа технолог вводит в машину решение задачи и дополнительные данные. Затем следует машинная обработка и вывод на дисплей нового решения. Если оно принимается, то технолог дает указание на переход к следующему этапу решения задачи проектирования. Необходимость вывода на дисплей промежуточных результатов определяется в ходе проектирования или до его начала.

Проектирование сборочных приспособлений и специального инструмента выполняется конструктором.

ГЛАВА 4
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

4.1. Основные направления автоматизации технологических процессов

В течение длительного времени основным направлением комплексной автоматизации в массовом производстве являлось создание специального оборудования: автоматов и полуавтоматов, автоматических и поточных линий. Такое оборудование, как правило, не переналаживается.

Серийное и мелкосерийное производство базируется на универсальном неавтоматизированном оборудовании, которое имеет низкую производительность, но может быстро переналаживаться. Преобладание универсального оборудования ограничивает возможности автоматизации, так как при частой смене выполняемых операций возникают большие потери времени из-за переналадок.

В настоящее время уровень автоматизации на большинстве предприятий с серийным и мелкосерийным производством, объем которого в машино- и приборостроении доходит до 80%, остается на низком уровне. В то же время интенсификация народного хозяйства во многом зависит от эффективности серийного и мелкосерийного производства. Характерными для них являются широкая номенклатура изготовляемых изделий и большое разнообразие технологических операций. В этих условиях наиболее важным требованием, предъявляемым к оборудованию, становится его гибкость, т. е. способность к быстрому переналаживанию с минимальными потерями времени и средств на переналадку.

Наиболее перспективным направлением автоматизации в серийном производстве является широкое внедрение оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), в том числе многоцелевых станков типа «обрабатывающий (сборочный) центр», которые взаимодействуют с промышленными роботами (ПР), управляемыми от ЭВМ.

Под *системой числового программного управления* понимается совокупность функционально взаимосвязанных и взаимодействующих технических и программных средств, обеспечивающих числовое программное управление станком. Системы ЧПУ распространяются на все группы и типы станков, а также на разнообразное технологическое оборудование.

Применение оборудования с ЧПУ коренным образом меняет технологию производства. При этом значительно возрастает сложность проектирования технологических процессов, так как оно связано с разработкой управляющих программ. Снижение трудоемкости разработки управляющих программ является важным условием эффективной эксплуатации оборудования с ЧПУ. Эта задача решается с помощью автоматического программирования.

4.2. Обработка на станках с числовым программным управлением

Станки с ЧПУ представляют собой автоматы или полуавтоматы, подвижные органы которых совершают необходимые движения по заранее установленной программе, записанной на быстросменном носителе (магнитных лентах, магнитных дисках и др.). *Управляющей программой* (ГОСТ 20523—80) называется совокупность команд на языке программирования, соответствующая заданному алгоритму функционирования станка по выполнению конкретной операции.

Основное преимущество станков с ЧПУ — высокая производительность за счет сокращения вспомогательного времени, интенсификации режимов резания и возможности быстрой переналадки. Наиболее эффективно использование станков с ЧПУ при обработке деталей сложной конфигурации, контуры которых содержат криволинейные участки, конусные поверхности у тел вращения, плоские поверхности, не параллельные друг друга.

Во всех случаях надо выбирать для обработки на станках с ЧПУ такие детали, приведенные затраты на изготовление которых меньше или равны затратам, необходимым при обработке деталей этого типа на аналогичных станках с ручным управлением.

По технологическим признакам системы ЧПУ делят на позиционные, контурные и комбинированные (контурно-позиционные).

Позиционные системы обеспечивают перемещение рабочих органов станка в заданные точки. Особенности таких систем — высокая скорость (5...10 м/мин и более) холостых (установочных) перемещений и большая точность позиционирования. Системы имеют устройства, позволяющие автоматически снижать скорость движения рабочих органов при подходе к заданной координате. Такими системами оснащаются обычно сверлильные станки для получения группы точно расположенных отверстий.

Контурные системы обеспечивают перемещение рабочих органов по заданной траектории для получения требуемого контура обрабатываемой детали. Перемещение рабочих органов происходит по двум (и более) управляемым координатам. Контурными системами оснащаются главным образом токарные и фрезерные станки.

Комбинированные системы являются более универсальными и используются в станках для обработки сложных корпусных деталей.

По наличию обратной связи системы ЧПУ делят на замкнутые и разомкнутые.

Замкнутые системы имеют обратную связь по положению рабочих органов станка и обеспечивают высокую точность обработки.

Разомкнутые системы строятся на основе шаговых двигателей. Они более просты, но на точность перемещения рабочих органов влияют погрешности двигателя, гидроусилителя и передаточных механизмов.

Приводы подач станка преобразуют электрические импульсы в перемещения рабочих органов. Число импульсов определяет перемещение рабочего органа, а частота следования — скорость их перемещения (подачу).

При обработке прямолинейного участка устройство ЧПУ формирует последовательность импульсов по одной координате для соответствующего привода.

Перемещение рабочего органа (стола или суппорта) определяют по формуле

$$L=qN, \qquad (4.1)$$

где q — цена одного импульса (разрешающая способность системы); N — число импульсов. (Число N зписывается на перфоленте и при помощи интерполятора преобразуется в код, подаваемый на вход двигателя.)

Подача рабочего органа

$$S=qN/t, \qquad (4.2)$$

где t — время обработки данного участка.

При обработке сложных поверхностей импульсы формируются по двум координатам. Перемещение механизма, соответствующее одному импульсу управляющей программы, определяется из требований точности и производительности.

Большинство станков с ЧПУ обеспечивают точность перемещения $\pm$ (0,01...0,03) мм при скорости 15...25 мм/с.

В качестве приводных двигателей применяют шаговые электродвигатели с гидроусилителями и следящие приводы подач. Принцип их действия основан на преобразовании управляющих сигналов в угол поворота вала.

Числовое программное управление позволило создать многоцелевые станки с автоматической сменой инструмента, которые называют обрабатывающим центром (ОЦ). Эти станки стали основой гибкого автоматизированного производства. Они снабжаются набором инструментов, которые по команде, поступающей от ЭВМ, автоматически вставляются в шпиндель станка и подводятся к обрабатываемой детали. За один установ детали могут выполняться различные операции (сверление, фрезерование, растачивание и др.), требующие различного инструмента.

В качестве накопителей инструментов используются револьверные головки или инструментальные магазины.

Обрабатывающие центры нормальной точности обеспечивают позиционирование инструмента в пределах $\pm$0,01 мм, прецизионные ОЦ — в пределах $\pm$0,005 мм. Применение ОЦ повышает про-

изводительность в 3...8 раз по сравнению с обработкой на универсальных станках.

Для программирования обработки на станках с ЧПУ принят семиэлементный алфавитно-цифровой набор. В качестве программоносителей используется восьмидорожечная перфолента шириной 25,4 мм. Значения символов адресов, управляющих символов и специальных знаков приведены в ГОСТ 20999—83.

Управляющая программа состоит из отдельных кадров. Каждый кадр при выполнении операции сверления (в позиционной системе) содержит информацию по обработке одного отверстия или упорядоченной группы отверстий. В такую группу входят отверстия одного диаметра, расположенные на равном расстоянии друг от друга. В кадре записывают только ту информацию (геометрическую, технологическую и вспомогательную), которая изменяется по отношению к предыдущему кадру.

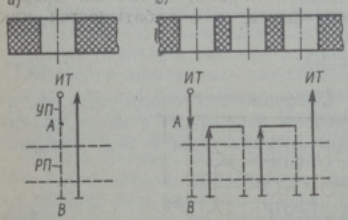


Рис. 4.1. Цикл обработки отверстия: *а* — единичного отверстия; *б* — упорядоченной группы отверстий

Управляющая программа начинается символом % (начало программы); за ним стоит символ «✳» (конец кадра).

Кадры управляющей программы содержат слова «Номер кадра», информационные слова и символ «Конец кадра». Номер кадра состоит из символа N и трех цифр.

Информационные слова в кадре записываются в такой последовательности: «Подготовительная функция», «Размерные перемещения», «Функция подачи», «Скорость главного движения», «Функция инструмента», «Вспомогательная функция».

Подготовительная функция определяет режим работы системы с ЧПУ. Она задается символом G и двузначным числом. Функция действует до тех пор, пока не будет отменена или заменена другой функцией из той же группы. В кадре не может быть записано более одной подготовительной функции из каждой группы.

Вертикальные рабочие движения при сверлении отверстий повторяются. Для упрощения программирования и сокращения объема информации в систему ЧПУ заранее закладываются фиксированные программы выполнения таких циклов.

Цикл обработки одного отверстия (рис. 4.1, *а*) состоит из следующих ходов сверла: 1) ускоренного перемещения (УП) из исходной точки (ИТ) в точку *А;* 2) перемещения инструмента с заданными рабочими значениями подачи (РП) и частоты враще-

ния шпинделя до точки *B;* 3) быстрого возврата инструмента в исходную позицию. Для обработки одного отверстия в качестве подготовительной используется функция G90.

При обработке упорядоченной группы отверстий (рис. 4.1, *б*) сверло не сразу возвращается в исходную точку, а из точки *A* над поверхностью детали переходит к следующему отверстию в группе. Отвод инструмента в исходную точку происходит после обработки всех отверстий, входящих в эту группу. Для образования группы отверстий необходимо, чтобы число таких отверстий было не менее трех. При этом одно из крайних отверстий, которое расположено ближе всех к отверстию, обработанному на предыдущем шаге, в группу не включается, а обрабатывается как одиночное.

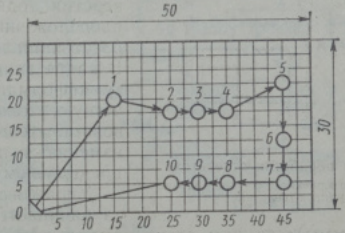


Рис. 4.2. Плата с отверстиями:

Размерные перемещения X и Y записывают целыми числами без знака и с учетом дискретности задания размеров для конкретной системы ЧПУ. Размерные перемещения задаются в микронах. Характер перемещения задается в кадре соответствующей подготовительной функцией: G90 — перемещения в абсолютных размерах; G91 — перемещения в приращениях со знаком. При этом знак «+» может не указываться.

Если одна из координат не меняет своего значения (движение идет вдоль одной из осей), то ее не заносят в кадры управляющей программы до тех пор, пока ее значение не изменится.

На сверлильных станках подача и частота вращения шпинделя задаются оператором на пульте управления и в управляющую программу не заносятся.

Функция инструмента задается адресом T с двумя цифрами. Например, T01 — включен один шпиндель; T00 — все шпиндели выключены.

Вспомогательные функции задаются словами с адресом M и двузначным кодовым числом. Вспомогательными являются функция M90 — возврат сверла в исходное положение, функция M02 —

останов программы и др. В качестве вспомогательных функций записывается команда H — число повторений цикла сверления.

Пример составления управляющей программы для сверления отверстий в плате на станке с позиционной (двухкоординатной) системой ЧПУ и подвижным рабочим столом (рис. 4.2). Координаты центров отверстий заданы сеткой с шагом 2,5 мм. За начало координат принимаем точку *O*, образованную пересечением сторон платы. Траектория движения детали начинается в точке *O* и идет к первому отверстию. Затем она последовательно обходит все точки, где расположены остальные отверстия. Процесс сверления заканчивается перемещением детали в исходное положение.

Управляющая программа для сверления отверстий

Номер и содержание кадра					Пояснение
		% *			Начало программы
N001.	G90,	X15000.	Y20000	T01 *	Сверление отверстия 1
N002.		X25000.	Y17500 *		Сверление отверстия 2
N003.	G91,	X500.		H2 *	Сверление отверстий 3, 4
N004.	G90,	X45000.	Y22500 *		Сверление отверстия 5
N005.			Y12500 *		Сверление отверстия 6
N006.			Y5000 *		Сверление отверстия 7
N0007.		X35000 *			Сверление отверстия 8
N008.				H2 *	Сверление отверстий 9, 10
	G91,	X—5000,			
N009.			T00.M90*		Выключение шпинделя, возврат стола в начальное положение
N010.				M02 *	Конец программы

Здесь % — символ начала программы; * — символ конца кадра; G90 — подготовительная функция, задание размера в абсолютных значениях; X — перемещение по оси *x*; Y — перемещение по оси *y*; G91 — подготовительная функция, задание размера в приращениях; H2 — число повторений цикла сверления; T00 — функция инструмента, все шпиндели выключены; M90 — вспомогательная функция, возврат сверла в исходное положение; M02 — вспомогательная функция, конец программы.

Для представления информации на перфоленте должен использоваться семибитовый код. Разряды кодовой комбинации присваиваются дорожкам 1 ... 7. Для обнаружения ошибок в информации к каждой кодовой комбинации должен добавляться восьмой поверочный бит, чтобы число двоичных единиц в одной строке было четным (паритет по четности). Поверочный элемент располагается на восьмой дорожке.

4.3. Автоматизация подготовки управляющих программ для систем с числовым программным управлением

Подготовка управляющих программ для оборудования с ЧПУ является трудоемким процессом. Применение ЭВМ значительно ускоряет процесс подготовки управляющих программ (УП) и повышает их качество. Средством подготовки УП является система автоматизированного программирования для оборудования с ЧПУ.

Система автоматизированного программирования (САП). Она представляет собой комплекс технических, программных, языковых, информационных средств, осуществляющих преобразование данных чертежа детали и технологического процесса ее обработки в коды устройства управления оборудованием с ЧПУ.

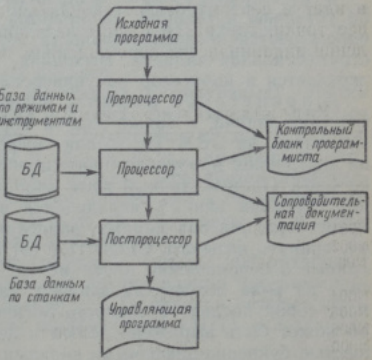


Рис. 4.3. Схема обработки информации в САП

Различают несколько уровней систем автоматизированного программирования: САП первого уровня решают задачи расчета координат опорных точек траектории движения по исходным геометрическим данным, кодирование управляющей информации и запись УП на программоноситель; САП более высокого уровня — задачи выбора последовательности проходов по заданным технологическим схемам обработки отдельных участков заготовки. В САП самого высокого уровня осуществляется проектирование инструментальных наладок и последовательности переходов по описанию контуров заготовки и детали, а также технологических условий обработки.

В большинстве случаев САП являются универсальными. Однако с целью сокращения избыточности языка они имеют модификации, ориентированные на определенные группы оборудования (токарные, фрезерные и другие станки).

Специализированные САП разрабатывают для уникального оборудования или для отдельных классов деталей. Схема обработки информации в САП показана на рис. 4.3.

Рукопись (текст) исходной программы (ИП) составляет технолог-программист на входном проблемно-ориентированном языке системы. Проблемная ориентированность языка заключается в

том, что он предназначен для описания исходных данных о детали и технологическом процессе ее обработки на оборудовании с ЧПУ. Исходную программу переносят на машинный носитель (перфоленту и др.) и вводят в ЭВМ.

Структура САП. В структуре большинства САП можно выделить следующие основные части: препроцессор, процессор и постпроцессор, которые представляют программы, входящие в САП.

В препроцессоре технологические операции разделяются на установы и позиции, выбираются схемы крепления заготовки, определяются последовательности переходов и комплектуется инструментальная наладка. Выходная информация препроцессора передается в процессор на универсальном входном языке.

В процессоре решаются общие геометрические и технологические задачи, а также задачи управления процессом обработки данных на ЭВМ. Он готовит информацию для постпроцессора на внутреннем проблемно-ориентированном (промежуточном) языке САП. Промежуточный язык «процессор-постпроцессор» служит для передачи данных, являющихся выходной информацией постпроцессора. Массив данных, записанных на промежуточном языке, принято называть CLODATA (от англ. Catter Logation data — данные о перемещении инструмента). Промежуточный язык* состоит из ряда логических записей, каждая из которых представляет собой последовательность логических слов. Логическое слово может быть выражено целым и действительными числами или шестью буквенно-цифровыми знаками.

Постпроцессор служит для адаптации управляющей программы к конкретному оборудованию с ЧПУ, реализация которого возможна в виде специализированного программного устройства. В постпроцессоре производится декодирование языковой программы, вычисление координат опорных точек, расчет траектории режущего инструмента и преобразование данных процессора на промежуточном языке в управляющую программу для конкретной модели станка или устройства с ЧПУ.

Программа постпроцессора имеет модульное построение. Это позволяет избежать необходимости в разработке постпроцессора для нового станка. Достаточно заменить модули программы, зависимые от станка, основная часть программы постпроцессора при этом сохраняется.

В программный комплекс САП включается набор постпроцессоров для различных систем управления станками. Постпроцессор формирует команды управления в кодах системы ЧПУ станка, и полученная УП выводится на машинный носитель (перфоленту и др.).

---

* Промежуточный язык. Процессор-постпроцессор. Рекомендации.— М.: ЭНИМС, ОНТИ, 1976.

Последние разработки устройств управления с ЧПУ дают возможность прямого программного управления станком по каналам связи без вывода УП на машинный носитель.

В интерактивных САП исходные данные задаются в режиме «вопрос — ответ». Преимущество таких САП перед пакетными заключается в возможности повторения УП с любой исходной позиции, а недостатком — отсутствие универсальности в подходе к разработке УП, так как диалог ограничивает разработчика в выборе средств решения задачи. Интерактивные САП эффективны при эксплуатации в производствах малой сложности и высоким уровнем унификации изготовляемых деталей.

Параллельно с развитием диалоговых (оперативных) систем подготовки УП непосредственно у станка развиваются системы программирования, работающие в комплексных системах автоматизированного проектирования и производства. Объединение этих процессов в единый непрерывный процесс переработки информации и управления технологическими процессами и оборудованием позволяет сократить время и затраты на подготовку УП и повысить эффективность использования оборудования.

В настоящее время эксплуатируется свыше 200 различных САП. Большое влияние на развитие автоматизации программирования обработки для оборудования с ЧПУ оказали система автоматического программирования инструментов (АПТ) и созданная на ее основе САП.

Рассмотрим в качестве примера систему АПТ СМ, предназначенную для программирования трехкоординатной позиционной и контурной обработки на токарном, фрезерном, сверлильном и другом технологическом оборудовании.

Входной язык системы АПТ СМ предназначен для записи текста исходных программ и состоит из набора операторов, позволяющих определять скалярные величины и геометрические объекты; описывать траекторию движения инструмента; подготовительные и вспомогательные функции оборудования и его системы управления, определять параметры обработки. Операторы языка формируются из основных элементов-ограничителей (знаков арифметических операций, скобок и др.), чисел, слов, идентификаторов, меток. Слова языка делятся на главные и дополнительные. Главные слова определяют тип переменной и используются в правой части операторов. Дополнительные слова (модификаторы) предназначены для уточнения переменной в случае неоднозначности ее определения.

Общая структура оператора имеет вид

<идентификатор>=<главное слово>/<вспомогательная часть>,

где <идентификатор> — имя переменной, контура, метки подпрограммы; <вспомогательная часть> — часть оператора, включающая модификаторы и значения параметров.

Операторы определения геометрических объектов приводятся в справочной литературе*.

При описании позиционной обработки введено понятие *упорядоченного множества точек* (УМТ), под которым понимается набор точек, расположенных в определенной последовательности по прямой, окружности и др.

Линейные УМТ определяются:

— начальной (исходной) точкой, конечной точкой и заданным числом равномерно распределенных точек (включая начальную конечную):

УМТ/лин, точка начала, точка конца, число точек;

— начальной точкой, вектором направления, расстоянием между точками, числом точек, включая начальную точку;

УМТ/лин, точка начала, вектор число точек; расстояние между точками;

— начальной точкой, вектором, числом приращений заданной величины:

УМТ/лин, точка начала, вектор, число приращений заданной величины.

Программирование позиционной обработки на языке АПТ СМ осуществляется операторами ИЗ, ИДИ, ПРИРАЩ, которые управляют перемещением инструмента или детали и не требуют дополнительной информации.

Оператор ИЗ указывает положение, в которое предполагается переместить инструмент перед началом обработки детали. Выполнение оператора ИЗ не вызывает движения инструмента или детали, а только присваивает значения координат начальной точке движения.

Этот оператор указывают в программе только один раз, перед первым оператором движения.

Оператор абсолютного перемещения ИДИ используется для перемещения инструмента из его последнего положения в заданную точку.

Оператор перемещения по приращению ПРИРАЩ указывает значения приращений, которые нужно добавить к каждой из координат точки последнего по времени положения инструмента.

Ниже приведен текст исходной программы сверления 10 отверстий (см. рис. 4.1), который написан на входном языке АПТ СМ.

```
01 Деталь плата
02 Начало
03 T0=T/0,0
04 T1=T/15; 20
05 T2=T/25; 17,5
06 T4=T/35; 17,5
07 T5=T/45; 22,5
08 T7=T/45; 5
```

* Система автоматизации программирования технологических процессов обработки деталей для оборудования с ЧПУ АПТ СМ. Инструкция по эксплуатации. Ч. II. Руководство программиста.— М.: НИАТ, 1980.

09 Т8=Т/35; 5
10 Т10=Т/25; 5
11 В1=В/Т 5 Т7
12 У1=УМТ/лин. Т2, Т4, 3
13 У2=УМТ/лин. Т5, В1 раст. 1 по 10; 1 по 7,5
14 У3=УМТ/лин. Т8, Т10, 3
15 ИЗ/ТО
16 Ускпод
17 Шпинд/вкл.
18 Цикл/сверл
19 ИДИ/Т1
20 ИДИ/У1
21 ИДИ/У2
22 ИДИ/У3
23 Шпинд/выкл.
24 УСКПОД
25 ИДИ/ТО
26 Конец

Здесь Т — точка; В — вектор; УМТ — упорядоченное множество точек; лин.— линия; ИЗ — оператор, указывающий положение начальной точки; ИДИ — оператор абсолютного перемещения; УСКПОД — ускоренная подача.

4.4. Промышленные роботы

Промышленный робот (ПР) — это автоматическая машина, стационарная или передвижная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций.

Отличительным признаком ПР от других видов роботов является его применение в производственном процессе. **Перепрограммируемостью промышленного робота** называется его свойство заменять управляющую программу автоматически или при помощи человека. Смена управляющей программы осуществляется переключением заранее занесенных в память программ, заменой программоносителя или введением в память устройства управления новой управляющей программы с какого-либо носителя.

Опыт эксплуатации ПР показал их высокую эффективность. Один ПР при двусменной работе заменяет от двух до четырех рабочих, позволяет повысить коэффициент сменности работы оборудования и качество продукции. Роботы освобождают человека от физически тяжелого, вредного, монотонного и опасного труда. Для мелкосерийного и серийного производства они являются универсальным средством автоматизации, позволяющим создавать эффективные быстропереналаживаемые автоматические линии.

По назначению ПР делят на универсальные, специализированные и специальные. Универсальные ПР выполняют технологические операции и вспомогательные переходы при функционировании с различным технологическим оборудованием; специализированные ПР используют для операций одного вида и определенной группы оборудования; специальные — для определенных операций и конкретных моделей оборудования.

По характеру выполняемых функций ПР разделяют на вспомогательные, технологические и универсальные.

Вспомогательные (подъемно-транспортные) ПР имеют позиционную систему управления. Они выполняют дейст-

вия типа «взять — перенести — положить» обрабатываемую деталь или сборочную единицу на требуемую позицию, в нужный момент времени и в определенной ориентации их на этой позиции; используются при обслуживании основного технологического оборудования.

● Промышленные роботы с позиционной системой управления составляют примерно 90% от общего числа роботов.

Технологические ПР оснащают контурной системой управления. Они выполняют основные технологические операции (окраску, сварку и др.). Особенностью таких ПР является наличие на манипуляторе инструмента, необходимого для выполнения данной операции. Технологические ПР относятся к основному оборудованию.

Универсальные ПР выполняют как основные, так и вспомогательные операции, т. е. сочетают в себе признаки транспортных и технологических роботов.

Промышленные роботы первого поколения. Эти роботы были разработаны в начале 60-х годов. К ним относят легко перенастраиваемые автоматы, управляемые жесткой программой и имеющие ограниченные возможности по восприятию окружающей среды. Применение таких ПР возможно в условиях полной определенности и постоянства внешней обстановки, включая параметры технологического процесса, положения оборудования, приспособлений, детали и т. п. Программное устройство легко перенастраивается на выполнение другого комплекса операций. Использование жестких программ упрощает схему робота и его обслуживание. В настоящее время они производятся серийно. Область возможного и экономически целесообразного применения ПР первого поколения достаточно широка.

Промышленные роботы второго поколения — адаптивные. Они имеют гибкую систему восприятия информации и организацию обратных связей при выполнении действий. Такие роботы можно адаптировать — приспосабливать к реально складывающейся обстановке. Применение адаптивных роботов исключает необходимость в сложных приспособлениях для ориентирования и позиционирования деталей и сокращает время на переналаживание робота на новую программу.

Для получения внешней информации они содержат сенсорные устройства в виде чувствительных датчиков. С помощью этих датчиков ПР фиксирует результаты движений, оценивает их правильность и согласовывает свои перемещения с расположением внешних предметов и их движениями.

Основными видами сенсорных устройств являются визуальные (зрение), тактильные и кинестатические (осязание и ощущение давления), а также акустические (слуховой прием команд). Тактильные и акустические устройства имеют подчиненное значение

по отношению к визуальной. Значение последней видно из того, что человек получает 85% информации по визуальному каналу. Число рецепторов глаз на три порядка превышает сумму рецепторов осязания и на четыре порядка — рецепторов слуха. Такие показатели биологических систем являются определяющими при оценке значимости систем технических.

Промышленные роботы третьего поколения — интегральные или роботы с **искусственным интеллектом.** Они имеют весьма высокую степень очувствления и представляют собой механические устройства, управляемые построенной на базе ЭВМ автономно действующей решающей системой с развитыми подсистемами восприятия. Интегральные роботы в определенной степени «разумно» принимают решения о своих действиях и активно выполняют их, осуществляя необходимые преобразования среды и перемещения в ней.

Связь с внешней средой в таких ПР осуществляется через систему восприятия, которая не имеет принципиальных отличий от аналогичных систем роботов второго поколения. Дальнейшее преобразование информации, связанное с ее синтактической и синематической (смысловой) интерпретациями характерна только для интеллектного робота. Наиболее важный момент интеллектного управления — синтез программы, моделирующей поведение ПР в изменяющихся условиях внешней среды.

Промышленные роботы второго и особенно третьего поколения пока уникальны и имеют большую стоимость. Вместе с тем накоплен определенный опыт, позволяющий использовать их в электронной промышленности, приборостроении и других отраслях. Поколения роботов не сменяют друг друга, а применяются там, где это является целесообразным. С развитием элементной базы ПР третьего поколения будут более совершенными, надежными и быстродействующими.

Основными частями ПР являются исполнительные устройства, система управления и рабочий орган (захватное устройство).

Исполнительные устройства. Они выполняют все двигательные функции ПР. В общем случае это манипулятор и устройство передвижения. *Манипулятор* — управляемые устройство или машина для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объектов в пространстве. Манипулятор оснащен рабочим органом.

Исполнительные устройства ПР перемещаются при помощи приводов. По типу используемой энергии их делят на пневматические, гидравлические и электрические.

Выбор типа привода зависит от назначения ПР, условий эксплуатации, грузоподъемности и др.

Системы управления (СУ) промышленными роботами. Их делят на биотехнические (с ручным управлением), интерактивные (со смешанным управлением) и автоматические.

Биотехнические СУ не имеют устройств памяти и требуют непрерывного участия оператора в процессе управления. Простейшим видом такой системы является система командного управления, когда оператор с пульта управления пускает в ход привод одной степени подвижности исполнительного устройства робота. Точность позиционирования в таких системах невелика из-за отсутствия обратной связи по положению.

Интерактивные СУ имеют устройства памяти для автоматического выполнения отдельных действий. Интерактивное управление может быть трех видов: 1) автоматизированное, при котором автоматическое управление чередуется с биотехническим; 2) супервизорное, когда весь цикл операций выполняется автоматически, но переход от одного этапа к другому осуществляется только после подачи оператором необходимой команды; 3) диалоговое, предусматривающее различные формы общения оператора с системой управления и выбор наилучшего способа управления в сложных ситуациях.

Автоматические СУ делятся на системы программные, адаптивные и интеллектные.

Программные СУ осуществляют синтез движения робота по заранее рассчитанной жесткой программе.

Адаптивные СУ организуют движение робота по гибко изменяемым или корректируемым программам.

Интеллектные СУ обеспечивают функционирование ПР в условиях не строго организованной среды.

Рабочий орган ПР. Он является составной частью исполнительного устройства для непосредственного выполнения технологических операций и (или) вспомогательных переходов.

Примерами рабочего органа могут служить захватное устройство, сборочный инструмент и др.

Захватное устройство может совершать дополнительные движения с помощью приводов, расположенных на захвате или вне его. К ним предъявляются следующие требования: надежность захватывания и удержания деталей, стабильность базирования, возможность быстрой переналадки, недопустимость повреждения объектов. Принцип действия и конструкции захватывающих устройств (ЗУ) весьма разнообразны, так как многообразны объекты манипулирования.

Захватные устройства можно классифицировать: по способу захвата и удержания объектов; по наличию устройств очувствления; по принципу действия.

По способу захвата и удержания объектов ЗУ разделяют на *схватывающие,* которые удерживают объект благодаря кинематическому воздействию рабочих элементов (губок, пальцев и др.); *поддерживающие* (крюки, петли и т. п.) и *удерживающие,* обеспечивающие силовое воздействие на объект (вакуумные, магнитные и др.).

По способу очувствления ЗУ делят на очувствленные и неочувствленные.

По принципу действия различают рычажные, вакуумные, магнитные и с эластичными камерами, а по виду губок — жесткие, регулируемые, гибкие и устанавливаемые.

Рычажные ЗУ, снабженные сменными губками, используют для работы с цилиндрическими и плоскими деталями (рис. 4.4, *а*), а для захвата труб различной длины — устройства с зубчатыми рейками (рис. 4.4, *б*). Большие силы захвата при малых размерах детали достигаются применением клиновых ЗУ (рис. 4.4, *в*).

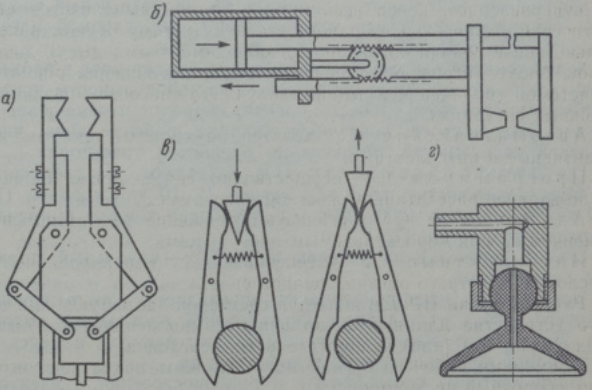


Рис. 4.4. Захватные устройства:
а — с рычажным приводом; *б* — с зубчатой рейкой; *в* — клиновое; *г* — вакуумное

Вакуумные ЗУ (рис. 4.4, *г*) удерживают изделия за счет разрежения воздуха между поверхностью предмета и вакуум-присосом, изготовляемым из резины или пластика. Их используют главным образом при работе с плоскими деталями массой до 20 кг. Основные преимущества таких присосов: 1) возможность захвата немагнитных материалов; 2) отсутствие сосредоточенных сил зажима, разрушающих хрупкие материалы; 3) универсальность; 4) простота конструкции. Однако точность базирования у вакуумных присосов ниже, чем у захватов другой конструкции. Кроме того, требуется время для создания разрежения, что уменьшает быстродействие.

Магнитные ЗУ имеют конструкции, аналогичные вакуумным. Магнитные ЗУ применяют при работе с ферромагнитными пред-

метами, имеющими гладкие поверхности. Они отличаются простотой конструкции, быстродействием, значительной силой притяжения. Недостатком таких ЗУ является остаточная намагниченность изделия.

Захватные устройства с эластичными камерами используют для удержания хрупких изделий. Пальцы захвата выполняются из гофрированной резины с тонкостенными и толстостенными частями, что приводит к их деформации при подаче сжатого воздуха.

Захватные устройства ПР могут оснащаться чувствительными элементами, дающими информацию о внешней среде.

Особое значение имеет разработка ЗУ на базе новых физических принципов, например использовании управляемой адгезии реологических жидкостей и жидких кристаллов.

Функциональными характеристиками манипуляторов и промышленных роботов являются номинальная грузоподъемность, погрешность позиционирования рабочего органа, скорость перемещения по степени подвижности, зона обслуживания, рабочая зона, число степеней подвижности, погрешность отработки траектории.

По грузоподъемности ПР разделяют на сверхлегкие (с грузоподъемностью до 1 кг), легкие (1...10 кг), средние (10...200 кг) и тяжелые (200...1000 кг). Наиболее широко применяют сверхлегкие и легкие ПР.

Способ установки на рабочем месте ПР — напольный, подвесной и встроенный.

Погрешность позиционирования определяется как отклонение рабочего органа от заданного управляющей программой положения. На точность позиционирования влияют размеры и масса перемещаемой детали, скорость, ускорение и др.

Манипуляторы, используемые в приборостроении и электронной технике, имеют точность позиционирования до $\pm 0{,}2$ мм. Для выполнения сборочных операций она может быть повышена до $\pm 0{,}01$ мм.

Скорость перемещения механизмов ПР у большинства моделей составляет для линейных движений 0,5...1 м/с, а для угловых — 90...180 град/с.

Зона обслуживания представляет собой геометрическую фигуру, описываемую захватом или рабочим инструментом манипулятора при прохождении им предельно допустимых положений. Геометрические параметры рабочей зоны зависят от числа степеней свободы манипулятора, конструкции его звеньев и др.

Рабочая зона ПР представляет пространство, в котором при работе может находиться рабочий орган.

Число степеней подвижности зависит от кинематических свойств механической системы и колеблется от 1 до 7 (рис. 4.5). Наибольшее количество моделей имеет четыре степени подвижности.

Погрешность отработки траектории представляет собой откло-

нение траектории рабочего органа от заданной управляющей программы.

Промышленные роботы широко применяют в заготовительных, механических и сборочных цехах.

Производство деталей из пластмасс, лакокрасочное производство, гальванические покрытия и литейное производство связаны с тяжелыми, вредными и опасными условиями труда. Роботизация этих видов производств должна привести к полной ликвидации ручного труда и повышению качества выполнения операций. Например, роботизация нанесения лакокрасочных покрытий позволяет снизить расход лаков и вести окраску при высокой концентрации паров растворителей.

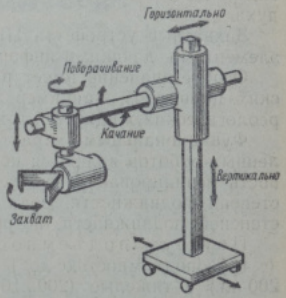


Рис. 4.5. Механическая часть робота

При обработке на металлорежущих станках ПР применяются для автоматизации вспомогательных операций (установка и снятие деталей, межстаночная транспортировка). Конструкция детали (заготовки) должна обеспечивать возможность надежного захватывания, удержания и переноса ее с помощью ПР. Детали должны иметь однородные по форме и расположению поверхности для базирования и захвата, позволяющие устанавливать их в рабочую зону, где для базирования и закрепления должна использоваться универсальная технологическая оснастка.

Сборочно-монтажное производство составляет большую часть общей трудоемкости изготовления изделий в машино- и приборостроении. Кроме высокой точности позиционирования во многих случаях следует предусматривать возможность автоматической смены захватов в течение рабочего цикла, наличие ряда специфических приемов (нажать, раздвинуть и др.). Наиболее распространенными операциями сборочно-монтажного производства являются съем изделия с конвейера и перенос его на рабочее место для регулирования, сборка разъемных и неразъемных соединений, манипулирование инструментом, затягивание винтов и др.

Некоторые сборочные операции требуют визуального наблюдения оператора. Пока автоматические системы зрения и осязания роботов не являются совершенными и экономически оправданными, сочетание ручного труда и роботов является оптимальным.

Новые изделия должны разрабатываться с учетом требований, обеспечивающих возможность их сборки с помощью роботов: изделия должны быть разделены на законченные сборочные едини-

цы, обеспечивающие независимость их сборки; число соединяемых поверхностей должно быть минимальным и предусматриваться возможность сборки с полной взаимозаменяемостью; дополнительная обработка, пригонка и регулирование в процессе сборки не допускается.

4.5. Роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные системы

Роботизированные технологические комплексы (РТК). Задача комплексной автоматизации многономенклатурного серийного производства наиболее эффективно решается путем создания типовых роботизированных технологических комплексов. Они представляют совокупность единицы технологического оборудования, промышленного робота и средств оснащения, автономно функционирующую и осуществляющую многократные циклы.

Эффективность роботов резко возрастает при групповом их использовании. В этом случае повышается производительность в 2...4 раза, снижаются удельные капиталовложения и расходы на обслуживание.

Конструктивно-технологические параметры РТК должны быть такими, чтобы можно было объединять их в гибкие производственные системы.

Гибкая производственная система (ГПС). Эта система представляет собой совокупность в разных сочетаниях оборудования с ЧПУ, роботизированных технологических комплексов, гибких производственных модулей, отдельных единиц технологического оборудования и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного интервала времени, обладающую свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик.

Понятие гибкости производственной системы является неоднозначным. Целесообразно рассматривать структурную и технологическую гибкость.

Структурная гибкость предусматривает возможность выбора последовательности обработки или сборки, наращивания системы на основе модульного принципа и выполнения работы на аналогичном оборудовании при выходе из строя любой из единиц оборудования, входящих в систему.

Технологическая гибкость определяется по способности выполнять на имеющемся оборудовании обработку группы различных деталей без переналадки или с незначительными переналадками (не чаще 1...3 раза в месяц). Для систем с широкой и непрерывно изменяющейся номенклатурой обрабатываемых деталей наиболее приемлемым является технологический принцип организации гибкой структуры, что обеспечивает наиболее эффек-

тивное использование оборудования и позволяет сократить численность работающих.

По организационной структуре ГПС делят на следующие виды: гибкий производственный модуль (ГПМ) — гибкая автоматизированная линия (ГАЛ), гибкий автоматизированный участок (ГАУ) — гибкий автоматизированный цех (ГАЦ).

Гибкий производственный модуль — это составная часть ГПС, представляющая собой единицу технологического оборудования для производства изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик с программным управлением, автономно функционирующая, автоматически осуществляющая все функции, связанные с их изготовлением, имеющая возможность встраивания в гибкую производственную систему.

Гибкая автоматизированная линия — это такая производственная система, состоящая из нескольких ГПМ, объединенных автоматизированной системой управления, в которой технологическое оборудование расположено в принятой последовательности технологических операций.

Гибкий автоматизированный участок — это гибкая производственная система, состоящая из нескольких ГПМ, объединенных автоматизированной системой управления, функционирующая по технологическому маршруту, в котором предусмотрена возможность изменения последовательности использования технологического оборудования.

Гибкий автоматизированный цех — это гибкая производственная система, представляющая собой в различных сочетаниях совокупность гибких автоматизированных линий, роботизированных технологических линий, гибких автоматизированных участков, роботизированных технологических участков для изготовления изделий заданной номенклатуры.

Гибкие производственные системы основаны на широком применении современного программно-управляемого технологического оборудования, микропроцессорных вычислительных средств и робототехнических систем.

При комплектовании ГПС технологическим оборудованием возможны различные варианты. Например, участки могут создаваться из однотипных многоцелевых станков или функционально дополняющих друг друга одноцелевых станков (фрезерных, сверлильных и др.). Наибольшее развитие ГПС получили в механообработке и значительно меньшее — в сборочных процессах. Эти системы обеспечивают высокий уровень автоматизации технологических процессов и значительное повышение производительности труда, сокращают цикл производства сложных деталей, улучшают использование основного оборудования и повышают качество выпускаемой продукции.

В перспективе ГПС являются составными элементами автома-

тических заводов серийного производства, обеспечивающих комплексное решение задач, связанных с изготовлением продукции и управлением предприятием.

Внедрение ГПС дает большой экономический эффект и вызывает важные изменения в производстве, что проявляется в повышении культуры труда, исключении тяжелого физического труда и улучшении техники безопасности.

Однако ГПС не может заменить все виды производства. При больших размерах партий однотипных деталей целесообразно использовать жесткие автоматические и роторные линии станков. В условиях единичного производства более выгодно применение универсального оборудования, обслуживаемого высококвалифицированными рабочими. Промежуточное положение между этими двумя видами производства занимает ГПС.

Организация производственного процесса в ГПС выполняется на основе групповой технологии. Наличие оборудования с ЧПУ значительно расширяет возможность отбора деталей и их классификации. Однако использование ПР приводит к необходимости группирования с учетом возможности их захвата устройствами ПР и контроля всех деталей группы.

Для контроля в ГПС используют контрольно-измерительные машины (КИМ), управляемые от ЭВМ. Конструктивно КИМ представляет агрегат, в состав которого входят механическая часть, система измерения, система приводов и управления перемещением механических частей машины и система обработки результатов измерения. Кроме контроля КИМ должна обеспечивать диагностику инструмента, проверку надежности закрепления заготовок, контроль влияния внешней среды. При этом проявляется возможность оперативного вмешательства в производственный процесс и устранение отклонений.

При переходе к ГПС и ГАУ эффективность использования оборудования повышается в 2...3 раза за счет сокращения времени на переналадку. Коэффициент использования машинного времени станков повышается до 0,85...0,9 (по сравнению с 0,4...0,6), а коэффициент сменности их работы — до 2,5. Существенно сокращается в 6...10 раз цикл обработки деталей. Однако создание ГПС связано со значительными затратами и во всех случаях необходимо оценивать технико-экономическую и организационную эффективность от их внедрения.

Показателями экономической эффективности от внедрения ГПС являются коэффициент окупаемости, годовой экономический эффект, коэффициент повышения производительности труда, коэффициент приращения стоимости обработки продукции на одного работающего, фондоотдача.

Эффективность оценивается коэффициентом использования оборудования, коэффициентом сменности и загрузки оборудования, коэффициентом гибкости и показателями надежности.

ГЛАВА 5
ВЫБОР ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

5.1. Структура нормы времени

Производительность труда рабочего определяется нормой выработки, т. е. количеством изделий, изготовляемых за единицу времени (час, смену). Росту производительности труда в значительной степени способствует *техническое нормирование* — установление обоснованных норм расхода производственных ресурсов. Под *производственными ресурсами* понимаются энергия, сырье, материалы, инструмент, рабочее время и т. д.

Техническое нормирование позволяет целесообразно организовать технологический процесс, определить численный и квалификационный состав рабочих, рассчитать количество оборудования и др. Техническое нормирование требует проведения большой работы, направленной на максимальное использование производственных возможностей каждого рабочего места и повышение производительности труда рабочего.

Норма времени — регламентированное время для выполнения некоторого объема работ в определенных производственных условиях одним или несколькими исполнителями соответствующей квалификации. Норма времени включает в себя штучное время $T_{ш}$ и подготовительно-заключительное время $T_{п.з}$.

Штучное время. Составными частями нормы штучного времени являются основное время $T_{о}$, вспомогательное время $T_{в}$, время обслуживания рабочего места $T_{обсл}$, время необходимых перерывов в работе $T_{пер}$.

Основное время — часть штучного времени, затрачиваемая на изменение и (или) последующее определение состояния предмета труда. Основное время может быть машинным, машинно-ручным или ручным.

Вспомогательное время — часть штучного времени, затрачиваемая на выполнение приемов, необходимых для обеспечения изменения и последующего определения состояния предмета труда. Оно повторяется с каждым обрабатываемым изделием и является преимущественно ручным (установка и снятие обрабатываемых деталей, перестановка инструмента, измерение деталей, управление механизмами станка).

Время обслуживания рабочего места — часть штучного времени, затрачиваемая исполнителем на поддержание средств технического оснащения в работоспособном состоянии и уход за рабочим местом (подналадка оборудования, смена затупившегося инструмента, удаление стружки и др.).

Время необходимых перерывов в работе — часть штучного времени, затрачиваемая на личные потребности и дополнительный отдых (при тяжелых работах).

Норма штучного времени определяется как сумма его элементов:

$$T_{ш} = T_{о} + T_{в} + T_{обсл} + T_{пер}. \quad (5.1)$$

Оперативное время — часть штучного времени, равная сумме основного и вспомогательного времени: $T_{оп} = T_{о} + T_{в}$. Это время затрачивается на осуществление работы, непосредственным результатом которой является выполнение заданной операции:

$$T_{ш} = T_{оп} + T_{обсл} + T_{пер}. \quad (5.2)$$

Подготовительно-заключительное время. Это время представляет собой интервал времени, затрачиваемый на подготовку исполнителя и средств технологического оснащения к выполнению технологической операции и приведению этих средств в порядок после окончания смены. Оно затрачивается рабочим один раз на выполнение определенной операции (работы) и не зависит от количества n деталей в партии.

Подготовительно-заключительное время входит в норму штучно-калькуляционного времени:

$$T_{ш.к} = T_{ш} + T_{п.з}/n. \quad (5.3)$$

Нормы времени устанавливают для каждой операции и типа производства, так как на выполнение одинаковой работы в условиях единичного, серийного и массового производства затрачивается различное время. Основным методом установления норм является расчетно-аналитический. В условиях крупносерийного и массового производства этот метод дополняется исследованием операций непосредственно на рабочих местах, а в мелкосерийном и единичном — методом сравнения.

Для всех автоматизированных и механизированных операций, выполняемых на металлорежущих станках, аппаратах шовной сварки и другом оборудовании с автоматической подачей, основное время на каждый переход определяется по формуле

$$T_{0} = Li/S_{м}, \quad (5.4)$$

где L — путь, проходимый инструментом или заготовкой в направлении подачи, мм; $S_{м}$ — скорость подачи, мм/мин; i — число проходов.

Вспомогательное время $T_{в}$ определяется по нормативам, устанавливающим продолжительность отдельных приемов работы. Для сборочных, монтажных, регулировочных, формовочных и других ручных работ обычно определяется оперативное время.

Время обслуживания рабочего места для всех операций, кроме обработочных, исчисляется в процентах (1...7%) от оперативного времени. Время необходимых перерывов в работе предусматривается в размере 2% от оперативного.

Определение квалификации работы производится по тарифно-квалификационному справочнику. Разряд работы предопределяет наличие признаков, указывающих на подготовку, знания, навыки и степень самостоятельности выполнения работы.

Тарифная сетка имеет шесть квалификационных разрядов, для которых соотношение оплаты труда выражается тарифным коэффициентом, определяющим отношение каждого тарифного разряда к первому.

Анализ формулы (5.3) показывает, что основным путем сокращения нормы штучного времени является уменьшение основного, вспомогательного и подготовительно-заключительного времени. Следует заметить, что при многих операциях механической обработки и сборки вспомогательное время значительно больше основного.

5.2. Выбор варианта технологического процесса по единичному показателю

Основными критериями для выбора оптимального варианта технологического процесса являются себестоимость и производительность.

Себестоимость изделия. Себестоимость слагается из стоимости основных материалов, заработной платы производственных рабочих и суммы косвенных затрат, исчисляемых в процентах к заработной плате.

При сравнительном анализе технологических процессов нет необходимости в определении полной себестоимости. Достаточно ограничиться *технологической себестоимостью* — той частью себестоимости, которая зависит от варианта технологического процесса. Например, если сравниваемые варианты процессов или операций предусматривают изготовление деталей из одной и той же заготовки, то стоимость ее можно не включать в технологическую себестоимость операций. Для упрощения расчетов необходимо также исключать все малозначительные затраты, которые не оказывают существенного влияния на итоговые результаты.

Технологическая себестоимость единицы продукции

$$C_1 = a + b/N_{год}, \qquad (5.5)$$

где a — текущие (переменные) расходы на одну деталь; b — единовременные (постоянные) расходы на годовую программу; $N_{год}$ — годовая программа выпуска.

Из уравнения (5.5) следует, что при прочих равных условиях себестоимость зависит от количества изготовляемых деталей.

Технологическая себестоимость изготовления годовой программы

$$C_{год} = aN_{год} + b. \qquad (5.6)$$

К текущим расходам, повторяющимся при изготовлении каждой детали, относятся расходы на основной материал m, заработную плату производственных рабочих $З_ш$ и расходы, связанные с работой оборудования P:

$$a=m+З_ш+P. \tag{5.7}$$

Расходы на основной материал можно определить по формуле

$$m=C_м q_м-C_о q_о, \tag{5.8}$$

где $C_м$ — цена 1 кг материала; $q_м$ — количество расходуемого материала, кг; $C_о$ — цена 1 кг реализуемых отходов; $q_о$ — количество реализуемых отходов, кг.

Расходы на заработную плату производственных рабочих

$$З_ш=\sum_{i=1}^{n_о} T_{ш\,i}S, \tag{5.9}$$

где $T_ш$ — норма штучного времени на операцию; S — часовая ставка рабочего, устанавливаемая по тарифной сетке в соответствии с квалификацией рабочего; $n_о$ — число операций.

Расходы, связанные с работой оборудования (например, расходы на ремонт, амортизацию, смазывающие и охлаждающие жидкости и др.), определяются на основании соответствующих нормативов.

К единовременным расходам b относятся расходы на изготовление специальной оснастки i и оплату подготовительно-заключительного времени $З_{п.з}$:

$$b=З_{п.з}+ik, \tag{5.10}$$

где k — коэффициент амортизации и эксплуатации оснастки (при двухлетнем сроке службы оснастки $k=0{,}5$; с учетом расходов на эксплуатацию, которые принимаются равными 20% от ее стоимости, $k=0{,}7$; при годовом сроке службы $k=1{,}2$).

Расходы на оплату подготовительно-заключительного времени определяются по формуле

$$З_{п.з}=\sum_{i=1}^{r} T_{п.з\,i}S, \tag{5.11}$$

где $T_{п.з}$ — норма подготовительно-заключительного времени (на одну наладку); S — часовая ставка наладчиков; r — число наладок (партий) в год.

Количество деталей в партии принимают исходя из запаса, необходимого для обеспечения процесса сборки.

Уравнение себестоимости одной детали можно представить в виде гиперболы (рис. 5.1, *а*), а уравнение себестоимости в объе-

ме годовой программы — прямой линией (рис. 5.1, *б*), отсекающей на оси ординат отрезок b.

Сравнение вариантов технологического процесса по себестоимости можно произвести следующим образом. Пусть технологическая себестоимость при первом варианте $C'_{год}=a_1N_{год}+b_1$, а при втором варианте $C''_{год}=a_2N_{год}+b_2$.

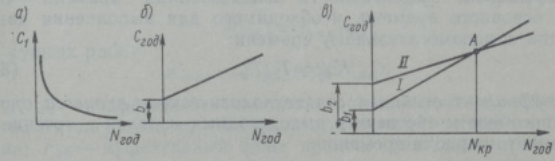


Рис. 5.1. Сравнение вариантов технологического процесса по себестоимости

Если сумма единовременных затрат в каждом варианте (I и II) не меняется, то графически их можно представить в виде прямых линий (рис. 5.1, *в*). Точка пересечения A определяет критическое количество детали $N_{кр}$, при котором оба варианта будут равноценными, т. е. $C'_{год}=C''_{год}$, или $a_1N_{кр}+b_1=a_2N_{кр}+b_2$, откуда

$$N_{кр}=(b_2-b_1)/(a_1-a_2). \qquad (5.12)$$

● Вывод. При количестве деталей меньше критического более экономичным будет первый вариант с текущими затратами a_1 и единовременными b_1, а при увеличении количества деталей свыше критического более экономичным будет второй вариант.

Производительность. При выборе оптимального варианта технологического процесса по производительности определяется количество изделий, при котором трудовые затраты по сравниваемым вариантам будут одинаковыми. Используя формулу (5.3), получим

$$T^{I}_{ш}N_{кр}+T^{I}_{п.з}=T^{II}_{ш}N_{кр}+T^{II}_{п.з},$$

где $T^{I}_{п.з}$ и $T^{II}_{п.з}$ — подготовительно-заключительное время первого и второго вариантов; $T'_{ш}$ и $T''_{ш}$ — штучное время первого и второго вариантов.

Обычно высокая производительность обработки обеспечивается за счет более производительного оборудования и оснастки. Однако при этом возрастает подготовительно-заключительное время. Объем критической партии

$$N_{кр}=(T^{I}_{п.з}-T^{I}_{п.з})/(T^{I}_{ш}-T^{II}_{ш}). \qquad (5.13)$$

До $N_{год}>N_{кр}$ оптимальным будет второй вариант, а при $N_{год}<N_{кр}$ — первый вариант.

График сравнения вариантов аналогичен графику, представленному на рис. 5.1, *в*.

На выбор технологического процесса существенно влияют дополнительные показатели, которые в определенных условиях могут стать основными. Некоторые из таких показателей приведены ниже.

Коэффициент эффективности использования времени — отношение основного времени, необходимого для выполнения данной операции, к вспомогательному времени:

$$K_{эф} = T_o / T_в. \qquad (5.14)$$

Коэффициент стабильности технологического процесса определяет способность обеспечить выход годных изделий в течение определенного периода времени:

$$K_{с.п} = \eta_{min} / \eta_{ср}, \qquad (5.15)$$

где η_{min} — минимальный выход годных деталей за определенное календарное время, %; $\eta_{ср}$ — среднее значение выхода годных деталей за тот же период времени, %.

Коэффициент автоматизации (механизации) технологического процесса

$$K_{ам} = 1 - T_р / T_{о.ц}, \qquad (5.16)$$

где $T_р$ — время участия рабочего (оператора) в цикле; $T_{о.ц}$ — длительность операционного цикла.

Коэффициент оснащенности технологического процесса оборудованием и оснасткой

$$K_{о.т} = \sum_{i=1}^{m} l_i / N_i, \qquad (5.17)$$

где $\sum_{i=1}^{m} l_i$ — число наименований стандартных и унифицированных видов оборудования и технологической оснастки; N_i — общее число наименований оборудования и технологической оснастки.

Коэффициент готовности оборудования и технологической оснастки к выпуску данной продукции

$$K_{г.о} = Q_ф S_ф / (Q_т S_т), \qquad (5.18)$$

где $Q_ф$ — фактическое число единиц оборудования и технологической оснастки; $Q_т$ — требуемое число единиц оборудования и технологической оснастки; $S_ф$, $S_т$ — стоимость единицы соответственно фактического оборудования и требуемой оснастки.

Коэффициент использования материалов

$$K_{и.м} = \sum_{i=1}^{k} M_{г\,i} S_i \Big/ \left(\sum_{i=1}^{k} M_{р\,i} S_i \right), \qquad (5.19)$$

где M_{ri} — количество i-го материала в готовом изделии, кг или шт.; S_i — стоимость единицы измерения i-го материала, руб. ($i=1, 2, ..., k$ — число наименований материалов); M_{pi} — количество i-го материала, расходуемого в процессе производства на операции, т. е. норма расхода с учетом запуска, кг или шт.

Коэффициент использования паспортной производительности оборудования для механизированных и автоматизированных работ

$$K_{и.о.п}=K_{т.и\,i}\eta_i, \tag{5.20}$$

для ручных работ

$$K_{и.о.п}=F_{эф}\eta_i/(0{,}95F_{общ}), \tag{5.21}$$

где $K_{т.и\,i}$ — коэффициент технического использования оборудования на i-й операции; η_i — коэффициент выхода годных на i-й операции; $F_{эф}$ — эффективный фонд времени (на одного рабочего в одну смену), ч; $F_{общ}$ — общий фонд рабочего времени за смену, ч.

Коэффициент трудоемкости подготовки производства

$$K_{т.п}=1/t_к+1/t_т, \tag{5.22}$$

где $t_к$, $t_т$ — трудоемкость конструкторской и технологической подготовки соответственно, ч.

Коэффициент стандартизации операции $K_{ст}$ представляет собой отношение количества стандартных C_i и унифицированных Y_i операций к общему числу операций N_i:

$$K_{ст}=(C_i+Y_i)/(C_i+Y_i+O_i)=1-Q_i/N_i, \tag{5.23}$$

где Q_i — количество оригинальных операций.

5.3. Выбор варианта технологического процесса по комплексному показателю

Уровень технологического процесса характеризуется большим числом показателей. Задача выбора оптимального варианта легко решается только в том случае, если один вариант технологического процесса превосходит остальные варианты по всем показателям. Если один вариант превосходит другой лишь по некоторым показателям, то оптимальное решение можно получить при помощи комплексного показателя.

Для вычисления комплексного показателя технического уровня технологического процесса используют аддитивную функцию вида

$$П_к=\sum_{i}^{m} K_i a_i, \tag{5.24}$$

где K_i — частный (относительный) показатель технического уровня; a_i — весовой уровень i-го показателя; m — число частных показателей технологического процесса; $i=1, 2, ..., m$.

При определении комплексного показателя принимают, что

$$\sum_{i=1}^{m} a_i = 1. \qquad (5.25)$$

Оптимальный вариант выбирают по максимальному значению комплексного показателя $П_к$.

Для нахождения $П_к$ необходимо установить номенклатуру частных показателей и их значимость (веса). Все показатели должны быть информативными, а их количество — достаточным для полной характеристики технологического процесса.

Показатели, имеющие размерность, следует преобразовать в относительные. Формализация частных показателей дает возможность суммировать неоднородные величины. При этом отдельные показатели необходимо привести к такому виду, чтобы лучшему показателю соответствовал больший коэффициент. Например, чем выше трудоемкость, тем хуже качество процесса. Поэтому в качестве показателя берут величину, обратную трудоемкости.

Если нет возможности установить числовые значения частных показателей в виде коэффициентов, то их оценка производится в баллах. Для этого используют четырехбалльную шкалу: отлично — 3, хорошо — 2, удовлетворительно — 1, неудовлетворительно — 0. Лучшим показателем присваивается высший балл.

При использовании комплексного показателя нельзя допускать перекрытия одним показателем существенных недостатков технологического процесса, которые характеризуются другими показателями. В том случае, если хотя бы один показатель равен нулю (оценка неудовлетворительная), комплексный показатель соответственно принимается равным нулю. Определение значимости (весов) отдельных показателей технологического процесса производится методами экспертных оценок.

ГЛАВА 6
ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ТОЧНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

6.1. Производственные погрешности

Под *точностью производства* понимается степень соответствия выходных параметров изготовленного изделия их номинальным значениям, указанным в чертежах, схемах, технических условиях или другой документации. Это соответствие можно рассматривать в отношении размеров и формы отдельных деталей, упругих, электрических, магнитных и других свойств, а также качества поверхности и состояния поверхностного слоя. Причиной несоответствия являются неизбежные отклонения реального технологического процесса от расчетного (идеального). Такие отклонения называют *первичными погрешностями*.

По характеру изменения в процессе производства погрешности разделяют на систематические постоянные, систематические переменные и случайные. *Систематические погрешности* возникают от действия факторов, принимающих вполне определенные значения. Постоянная систематическая погрешность при стабильных условиях принимает одно и то же значение по модулю и знаку, а переменная систематическая погрешность — закономерно изменяющиеся значения.

Случайные погрешности возникают от действия большого числа факторов, имеющих вероятностный характер. При одних и тех же условиях они принимают различные значения по модулю и знаку.

Случайные погрешности разделяют на дискретные и непрерывные. Дискретные случайные погрешности могут принимать в некотором интервале только целые значения, а непрерывные — любые значения. Например, число дефектных изделий в партии является дискретной случайной величиной, а выходной параметр изделия (линейный размер, напряжение и др.) — непрерывной случайной величиной.

Обеспечение необходимой точности производства является сложной задачей. Одним из средств достижения необходимого уровня точности производства являются расчет и анализ точности конструкций и технологических процессов. Такой анализ можно провести расчетно-аналитическим и статическими методами.

6.2. Расчетно-аналитический метод анализа точности производства

Расчетно-аналитический метод основан на установлении функциональной зависимости между каждой первичной погрешностью и выходными параметрами точности.

В общем виде технологический процесс изготовления или сборки изделия может быть описан уравнением

$$y_0 = \varphi_0(x_{01}, x_{02}, \ldots, x_{0n}), \qquad (6.1)$$

где y_0 — выходной параметр точности технологического процесса; $x_{01}, x_{02}, \ldots, x_{0n}$ — параметры технологического процесса (ноль в индексе указывает, что величины, входящие в уравнение (6.1), не имеют погрешностей).

Если параметры технологического процесса будут иметь отклонения (погрешности) $\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_n$ от соответствующих номинальных значений, то выходной параметр получит отклонение Δy:

$$y = y_0 + \Delta y = \varphi(x_{01} + \Delta x_1, x_{02} + \Delta x_2, \ldots, x_{0n} + \Delta x_n).$$

Разложим полученное выражение в ряд Тейлора, ограничиваясь членами первого порядка. Такое ограничение может быть при-

нято, так как ошибки малы по сравнению со значением параметра

$$y \approx \varphi_0(x_{01}, x_{02}, \ldots, x_{0n}) + \sum_{i=1}^{n} (\partial\varphi_0/\partial x_i)\,\Delta x_i.$$

Так как $\Delta y = y - y_0$, то

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n} (\partial\varphi_0/\partial x_i)\,\Delta x_i,$$

где $(\partial\varphi_0/\partial x_i) = A_i$ — передаточное отношение или коэффициент влияния i-го аргумента на функцию

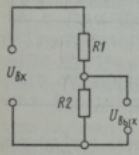


Рис. 6.1. Схема делителя напряжения

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n} A_i \Delta x_i. \qquad (6.2)$$

Для определения погрешности выходной параметр точности представим в виде явной функции параметров технологического процесса или комплектующих элементов (при сборке). Дифференцируя эту функцию по какому-либо аргументу, найдем коэффициент влияния и ошибку выходного параметра.

Для определения погрешности на выходе электрической цепи (рис. 6.1) представим выходной параметр в виде явной функции составляющих элементов:

$$U_{вых} = I_1 R_2; \quad I_1 - U_{вх}/(R_1 + R_2)$$

или

$$U_{вых} = U_{вх} R_0/(R_1 + R_2); \quad \varphi_0 = U_{вых}/U_{вх} = R_2/(R_1 + R_2).$$

Коэффициенты влияния определим по формулам

$$A_1 = \partial\varphi_0/\partial R_1 = -R_2/(R_1 + R_2)^2; \quad A_2 = \partial\varphi_0/\partial R_2 = R_1/(R_1 + R_2)^2.$$

Погрешность на выходе цепи

$$\Delta U_i = U_{вх} \sum_{i=1}^{n} A_i \Delta R_i.$$

Расчетно-аналитический метод обычно применяют для анализа технологического процесса и оценки влияния отдельных первичных погрешностей на выходные параметры точности. Реальные технологические процессы не могут быть достаточно полно отражены детерминированными моделями, и в большинстве слу-

чаев определить влияние всех многочисленных факторов на точность изготовления изделия этим методом не представляется возможным.

6.3. Статистические методы анализа точности производства

Статистические методы анализа технологических процессов основаны на положениях теории вероятностей и математической статистики. Их применяют для анализа действующих технологических процессов и определения показателей точности и стабильности процессов путем образования выборок.

Таблица 6.1

Интервалы кОм		Середина интервала, кОм	Частота n_i	Частость $\frac{n_i}{N}$
свыше	до			
81	82	81,5	2	0,010
82	83	82,5	7	0,035
83	84	83,5	20	0,100
84	85	84,5	42	0,210
85	86	85,5	58	0,290
86	87	86,5	46	0,230
87	88	87,5	19	0,095
88	89	88,5	6	0,030
Сумма			200	1,000

Выборка. Она должна быть репрезентативной (представительной), т. е. отражать все особенности общей совокупности.

Для определения влияния случайных факторов на качество изготовления изделия образуют мгновенные выборки из 5...20 деталей, последовательно изготовленных на одном технологическом оборудовании. Общая выборка состоит из 10 (или более) мгновенных выборок, взятых последовательно с одного оборудования (без его подналадки). По данной выборке определяют раздельно влияние случайных и систематических факторов без учета погрешностей настройки.

Совместное влияние случайных и систематических факторов (в том числе погрешностей настройки) определяют из случайно отобранных деталей, изготовленных при одной или нескольких настройках на одном оборудовании. Объем выборки составляет 50...200 деталей. Случайная погрешность графически характеризуется кривой распределения.

Кривые распределения. Практические кривые распределения строят следующим образом. Измеряют партию деталей (изделий) по параметру, точность которого надо определить. Результаты измерения записывают в порядке их получения в виде отклонений от номинального значения параметра или в виде фактических результатов измерения. Затем составляют таблицу распределения (табл. 6.1). Для этого результаты измерения объединяют в интервалы и подсчитывают абсолютную частоту n_i, т. е. количество размеров или отклонений, находящихся в каждом интервале. В таблице распределения можно указывать не абсолютную частоту n_i, а относительную частоту (частость), т. е. n_i/N. Количество изделий N для построения кривых распределения следует брать не менее 100, а количество интервалов — не менее 7.



Рис. 6.2. Полигон распределения

При определении границ интервалов принято начинать ряд, отступая примерно на 0,5 интервала в сторону меньших значений от наименьшего встретившегося значения, и заканчивать ряд, отступая примерно на 0,5 интервала в сторону наибольших значений от наибольшего встретившегося значения.

На основании таблицы распределения строят полигон распределения. Для этого (рис. 6.2) по оси ординат откладывают абсолютную n_i (или относительную n_i/N) частоту, а по оси абсцисс — середину интервала x_i. Соединяя точки пересечения прямыми, получим ломаную линию, которую называют также *практической кривой распределения*. Если увеличивать количество измеряемых изделий и число интервалов, то полученная ломаная линия в пределе превращается в кривую распределения.

Эмпирическое распределение может быть изображено в виде ступенчатого графика, называемого *гистограммой распределения*. Высоты прямоугольников гистограммы равняются частотам (частостям) распределения, а основания — интервалам.

Основными характеристиками эмпирического распределения являются среднее арифметическое значение $\bar{x}$ и среднее квадратическое отклонение σ:

$$\bar{x}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{m} x_i n_i; \qquad (6.3)$$

$$\sigma(x)=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{m} n_i(x_i-\bar{x})^2}, \qquad (6.4)$$

где n_i — частота; m — число интервалов (разрядов).

При расчете точности технологических процессов практические кривые заменяют теоретическими. В этом случае дифференциальный закон распределения случайных величин $\bar{x}$ в общем виде записывается как

$$y=\varphi(x), \tag{6.5}$$

где $\varphi(x)$ — значение ординаты теоретической кривой распределения.

Характер распределения случайной величины, графически выражаемой кривой распределения, можно оценить двумя характеристиками: положением центра группирования отклонений и средним квадратическим отклонением от этого центра. Значение предельного отклонения определяется в зависимости от значения среднего квадратического отклонения и закона распределения погрешностей.

Закон нормального распределения. Для описания производственных погрешностей наиболее часто используется закон нормального распределения.

Случайная погрешность подчиняется закону нормального распределения (закону Гаусса) при соблюдении следующих условий:

1) общая погрешность является суммой частных погрешностей, вызванных действием значительного числа случайных факторов;

2) все первичные случайные факторы по своему влиянию на общую погрешность одного порядка, т. е. среди них нет доминирующих;

3) все случайные факторы взаимно независимы (или малозависимы);

4) число случайных факторов и параметры вызванных им частных погрешностей не изменяются во времени;

5) число систематических факторов и значения вызванных ими частных погрешностей остаются одинаковыми.

Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что закону Гаусса с достаточным приближением следуют случайные ошибки измерений, выходные параметры функциональных элементов, размеры деталей, полученных обработкой на металлорежущих станках, и др.

Аналитическое выражение кривой распределения по закону Гаусса имеет вид

$$\varphi(x)=\frac{1}{\sigma(x)\sqrt{2\pi}}\,e^{-[x-M(x)]^2/(2\sigma(x))^2}, \tag{6.6}$$

где $\varphi(x)$ — плотность вероятностей, соответствующая абсциссе x $(-\infty<x<\infty)$; $e=2{,}7183$ — основание натуральных логарифмов;

$$\sigma(x)=\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty}[x-M(x)]^2\varphi(x)\,dx} \tag{6.7}$$

— среднее квадратическое отклонение аргумента (или стандарт распределения);

$$M(x)=\int_{-\infty}^{+\infty} x\varphi(x)\,dx \qquad (6.8)$$

— математическое ожидание (среднее значение случайной величины).

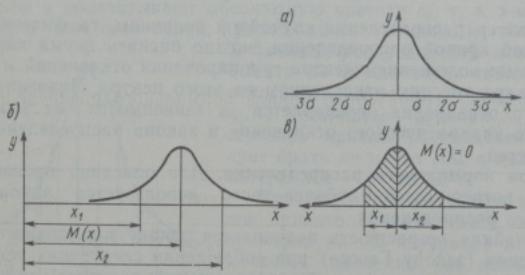


Рис. 6.3. Кривая нормального распределения (*а*), ее построение при $M_x \neq 0$ (*б*), при $M_x = 0$ (*в*)

Кривая распределения, соответствующая нормальному закону, симметрична относительно ординаты, проведенной в точке $x = M(x)$, и асимптотически сближается с осью x (рис. 6.3, *а*).

Такая форма кривой означает, что одинаковые положительные и отрицательные отклонения случайной величины от $M(x)$ равновероятны; меньшие отклонения более вероятны; весьма большие отклонения маловероятны.

Максимальная ордината нормальной кривой имеет место при абсциссе $M(x)$ и равна

$$y_{max} = 1/(\sigma_i\sqrt{2\pi}) \approx 0{,}4/\sigma_i. \qquad (6.9)$$

Точки перегиба лежат на расстояниях $\pm\sigma$ от оси симметрии; их ординаты

$$y = y_{max}/\sqrt{e} \approx 0{,}6\,y_{max}. \qquad (6.10)$$

Форма и положение кривой нормального распределения определяются двумя характеристиками: $M(x)$ и σ_i.

При изменении $M(x)$ кривая, сохраняя свою форму, перемещается вдоль оси x, а при изменении σ_i меняется форма кривой распределения.

При больши́х значениях σ_i кривая будет пологой с большим полем рассеивания, а при малых значениях σ_i — сильно вытянутой вверх с малым полем рассеивания.

Часто гауссовское распределение применяют в нормированном виде. Нормирование распределения заключается в переходе от случайной величины к вспомогательной функции

$$Z=[x-M(x)]/\sigma_i, \qquad (6.11)$$

для которой $M(Z)=0$, $\sigma_i=1$. Плотность вероятности нормированной случайной величины Z, подчиняющейся закону Гаусса, имеет вид

$$\varphi(Z)=\frac{e^{-z^2/2}}{\sqrt{2\pi}}, \qquad (6.12)$$

Площадь, ограниченная кривой нормального распределения и осью абсцисс, равна единице.

Таблица 6.2

Z	2Φ(Z)	Z	2Φ(Z)	Z	2Φ(Z)
0,0	0,00000	1,1	0,72867	2,2	0,97219
0,1	0,07966	1,2	0,76986	2,3	0,97855
0,2	0,15852	1,3	0,80640	2,4	0,98360
0,3	0,23582	1,4	0,83849	2,5	0,98758
0,4	0,31084	1,5	0,86639	2,6	0,99068
0,5	0,38292	1,6	0,89040	2,7	0,99307
0,6	0,45149	1,7	0,91087	2,8	0,99489
0,7	0,51607	1,8	0,92814	2,9	0,99627
0,8	0,57629	1,9	0,94257	3,0	0,99730
0,9	0,63188	2,0	0,95450	3,1	0,99806
1,0	0,68269	2,1	0,96427		

Практически пользуются конечными пределами, и вероятность P того, что отклонения погрешности (или параметра изделия) от среднего значения будут находиться в пределах x_1 и x_2 (рис. 6.3, *б*), равна

$$P(x_1\leqslant x\leqslant x_2)=\frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}}\int_{x_1}^{x_2} e^{-[x_i-M(x)]^2/\left(2\sigma_i^2\right)}dx$$

или

$$P(x_1\leqslant x\leqslant x_2)=\Phi\left(\frac{x_2-M(x)}{\sigma_i}\right)-\Phi\left(\frac{x_1-M(x)}{\sigma_i}\right);$$

$$P(x_1\leqslant x\leqslant x_2)=\Phi(Z_2)-\Phi(Z_1), \qquad (6.13)$$

где $\Phi(Z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^Z e^{-Z^2/2}dz$ — функция Лапласа или интеграл вероятностей.

В табл. 6.2 приведены значения функции Лапласа. Они представляют собой вероятность того, что отклонения от среднего значения случайной величины, выраженные в единицах среднего квадратического отклонения, будут находиться в пределах от $-Z$ до $+Z$. Для отрицательных значений Z следует учитывать, что функция Лапласа является нечетной, т. е.

$$\Phi(-Z)=-\Phi(Z).$$

Пример 6.1. Определить процент изделий P, имеющих отклонение в пределах (рис. 6.3, *в*) $x_1=-0{,}03$ и $x_2=0{,}05$; $M(x)=0$. Известно, что распределение погрешностей изделия подчиняется закону Гаусса и $\sigma=0{,}02$ мм. Количество изделий, характеризуемое частью площади, лежащей слева от среднего арифметического, равно $\Phi(Z_1)$, а справа $-\Phi(Z_2)$:

$$Z_1=x_1/\sigma=-0{,}03/0{,}02=-1{,}5;\quad \Phi(-1{,}5)=-0{,}4332;$$

$$Z_2=x_2/\sigma=0{,}05/0{,}02=2{,}5;\quad \Phi(2{,}5)=0{,}4938.$$

Используя формулу (6.13), получим $P=(0{,}4938+0{,}4332)100\%=92{,}7\%$.

С достаточной для практики точностью теоретическую кривую, имеющую пределы от $-\infty$ до $+\infty$, заменим кривой, имеющей пределы $\pm 3\delta$ от центра группирования. При $x=\pm 3\sigma$ $Z=3$, в $2\Phi(Z)=0{,}9973$.

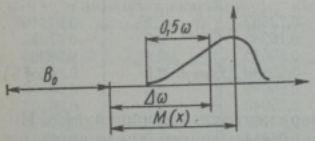


Рис. 6.4. Асимметричная кривая распределения:
B_0 — номинальный размер

Вероятность того, что параметры детали (изделия) будут выходить за эти пределы, равна 0,0027. Практически эта вероятность равна нулю, и диапазон (поле) рассеяния погрешностей изготовления ω можно определить по формуле

$$\omega_i=6\sigma_i. \qquad (6.14)$$

Точность технологического процесса при выполнении конкретной операции сопоставляется с требуемой точностью путем сравнения поля допуска δ_i с предельным практическим полем рассеивания для данного технологического процесса.

Технологический процесс обеспечивает требуемую точность, если $\delta_i \geqslant \omega_i$. При сопоставлении среднее значение должно совпадать с серединой поля допуска.

В практике встречаются законы распределения погрешностей, существенно отклоняющихся от закона нормального распределения. Для характеристики таких распределений введены коэффициенты относительной асимметрии и относительного среднего квадратического отклонения.

Коэффициент относительной асимметрии α_i характеризует величину смещения центра группирования отклонений (рис. 6.4) от середины поля рассеяния:

$$\alpha_i=(M(x_i)-\Delta_{\omega_i})/(0{,}5\omega_i), \qquad (6.15)$$

где $\Delta\omega_i$ — координата середины поля рассеяния; ω_i — поле рассеяния; $M(x)$ — координата центра группирования (математическое ожидание).

Из формулы (6.15) следует, что

$$M(x_i)=\Delta_{\omega_i}+0{,}5\alpha_i\omega_i. \qquad (6.16)$$

Коэффициент относительного среднего квадратического отклонения λ_i характеризует закон рассеяния номинальных размеров или их отклонений

$$\lambda_i=2\sigma_i/\omega_i. \qquad (6.17)$$

Для закона нормального распределения $\alpha_i=0$, $\lambda_i=1/3$.

Суммарную погрешность технологического процесса находят на основании теорем теории вероятностей по следующим правилам.

● *Величины, характеризующие центры группирования составляющих ошибок, складываются алгебраически, так как среднее значение суммы случайных величин равно сумме средних значений этих величин.* На основании формулы (6.16)

$$\Delta_{\omega_\Delta}+0{,}5\alpha_\Delta\omega_\Delta=\sum_{i=1}^{n}A_i(\Delta_{\omega_i}+0{,}5\alpha_i\omega_i), \qquad (6.18)$$

где A_i — коэффициент влияния (передаточное отношение). Индекс Δ относится к величинам, характеризующим суммарную погрешность.

Координата середины поля рассеяния суммарной погрешности

$$\Delta_{\omega_\Delta}=\sum_{i=1}^{n}A_i(\Delta_{\omega_i}+0{,}5\alpha_i\omega_i)-0{,}5\alpha_\Delta\omega_\Delta. \qquad (6.19)$$

● *Величины, характеризующие рассеивание отклонений составляющей общей погрешности, суммируют квадратично, так как дисперсия суммы независимых случайных величин равна сумме дисперсий этих величин:*

$$\sigma_\Delta^2=\sum_{i=1}^{n}A_i^2\sigma_i^2. \qquad (6.20)$$

На основании уравнения (6.17)

$$\sigma_i^2=(\lambda_i\omega_i/2)^2.$$

Подставляя полученное значение σ_i в уравнение (6.20), получим

$$\lambda_\Delta\omega_\Delta=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}A_i^2\lambda_i^2\omega_i^2}.$$

Тогда поле рассеяния суммарной погрешности

$$\omega_{\Delta} = \frac{1}{\lambda_{\Delta}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} A_i^2 \lambda_i^2 \omega_i^2}. \qquad (6.21)$$

Наиболее широко применяют следующие статистические методы расчета и анализа технологических процессов: метод кривых распределения и метод точностных диаграмм.

Метод кривых распределения. Метод является наиболее универсальным. С помощью данного метода можно исследовать точность получения заготовок, механической обработки и сборки, а также определить точность ряда специфических операций.

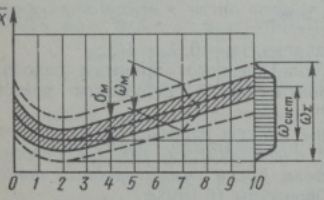


Рис. 6.5. Точностная диаграмма

Кривую распределения можно рассматривать как объективную характеристику точности операции. Сопоставляя эти кривые, можно наглядно представить, как отражается изменение того или иного фактора на точности обработки, установить наличие доминирующих или систематических факторов, а также определить значения коэффициентов асимметрии и относительного рассеяния, необходимых для расчета размерных и кинематических цепей. Кривые распределения характеризуют точность законченного технологического процесса без учета последовательности изготовления деталей.

Метод точностных диаграмм. Метод используют для определения изменения положения центра группирования и изменения мгновенного рассеяния отклонений параметров деталей во времени. На рис. 6.5 приведен пример теоретической точностной диаграммы. По оси абсцисс отложены номера последовательно взятых групп, а по оси ординат — вычисленные для каждой группы значения среднего арифметического $\bar{x}$, мгновенного среднего квадратического отклонения $\sigma_м$ и предельных отклонений (верхнего и нижнего). Разность этих отклонений представляет собой поле мгновенного рассеяния $\omega_м$. Таким образом получаем характеристику изменения указанных величин во время протекания процесса обработки.

При построении точностных диаграмм число деталей в каждой группе рекомендуется брать равным 25.

6.4. Размерные цепи

Размерная цепь — совокупность размеров, непосредственно участвующих в решении поставленной задачи и образующих замк-

нутый контур. С помощью размерной цепи можно определять точность расположения поверхностей или осей одной детали или нескольких деталей (сборочная размерная цепь). По взаимному расположению звеньев их делят на линейные, плоские, угловые и пространственные.

Линейные размерные цепи. (рис. 6.6). К линейным относятся размерные цепи, звеньями которой являются линейные размеры. Каждая размерная цепь состоит из одного замыкающего звена и двух (или более) составляющих звеньев. *Замыкающее звено* непосредственно не задается, а получается последним в процессе обработки детали или сборки. В сборочных цепях за замыкающее звено принимается зазор в соединении, совпадение оси симметрии двух деталей, перекрытие деталей и др. При этом зазор или натяг расматривают как самостоятельное звено, которое в отличие от других может иметь номинальный размер, равный 0.

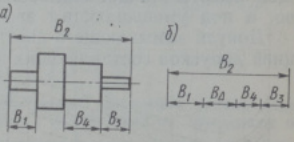


Рис. 6.6. Линейная цепь:
а — конструктивное изображение; *б* — схема

Составляющие звенья линейной цепи обозначаются прописными буквами русского алфавита с индексом, соответствующим порядковому номеру звена. Замыкающему звену присваивается индекс Δ. Для размерной цепи, приведенной на рис. 6.6, составляющими будут размеры B_1, B_2, B_3, B_4, а замыкающим — B_Δ.

Передаточным отношением называется коэффициент, характеризующий степень и направленность влияния составляющего звена на замыкающее. Если передаточное отношение не равно единице, то для его определения составляется уравнение, связывающее составляющее звено с замыкающим. Для линейных размерных цепей, имеющих звенья, расположенные на параллельных линиях, удобнее не вводить понятие передаточного отношения, а все составляющие звенья представлять в виде увеличивающих и уменьшающих.

Увеличивающим называется составляющее *звено* размерной цепи, с увеличением которого замыкающее звено увеличивается. *Уменьшающим* называется составляющее *звено* размерной цепи, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается. Увеличивающие звенья имеют знак при передаточном отношении положительный, а уменьшающие — отрицательный. Передаточные отношения равны —1 для звеньев B_1, B_3 и B_4 (рис. 6.6) и +1 для звена B_2.

Основными свойствами всякой размерной цепи является замкнутость и взаимосвязанность. Цепь замкнута, если обход ее в одном направлении от какого-либо звена приведет вновь к этому же звену. Взаимосвязанность заключается в том, что изменение ве-

личины любого звена влечет за собой изменение положения других звеньев и величины замыкающего звена.

Основным уравнением линейной размерной цепи, отнесенной к номиналам, будет

$$B_{\Delta}=\sum_{S}^{\rightarrow} B_S-\sum_{t}^{\leftarrow} B_t. \qquad (6.22)$$

По S суммируются значения, относящиеся к увеличивающим размерам цепи, по t — к уменьшающим. Над буквой, обозначающей увеличивающее звено, ставится стрелка, направленная вправо, а под уменьшающим звеном — стрелка, направленная влево.

Допуск замыкающего звена δ_{Δ} размерной цепи является функцией допусков составляющих звеньев, т. е.

$$\delta_{\Delta}=\sum_{i=1}^{n} \delta_i, \qquad (6.23)$$

где δ_i — допуск составляющих звеньев; n — общее число составляющих звеньев.

Расчет размерной цепи может иметь две задачи: прямую и обратную. При решении прямой задачи (проектный расчет) исходя из установленных требований к замыкающему звену определяют номинальные размеры, допуски, координаты середин полей допусков и предельные отклонения звеньев, составляющих размерную цепь.

При решении обратной задачи (поверочном расчете) исходя из значений номинальных размеров, допусков, координат их середин, предельных отклонений составляющих звеньев определяют параметры замыкающего звена.

Размерные цепи рассчитывают по методу максимума-минимума или вероятностным методом.

Расчет по методу максимума-минимума. Диапазон колебаний замыкающего звена при расчете на максимум и минимум определяют по предельным (крайним) отклонениям составляющих звеньев размерной цепи путем простого суммирования, т. е. при условии самого неблагоприятного сочетания размеров составляющих звеньев. Такое сочетание мало вероятно, особенно если число звеньев более четырех. Поэтому при проверочном расчете колебания замыкающего звена получаются больше действительных, а при проектном расчете допуски на составляющие звенья — чрезмерно точными. Основные уравнения для решения размерных цепей максимум и минимум:

$$B_{\Delta}^{\max}=\sum_{S}^{\rightarrow} B_S^{\max}-\sum_{t}^{\leftarrow} B_t^{\min}; \qquad (6.24)$$

$$B_{\Delta}^{\min}=\sum_{S}^{\rightarrow} B_S^{\min}-\sum_{t}^{\leftarrow} B_t^{\max}. \qquad (6.25)$$

При этом

$$\delta_\Delta = B_\Delta^{max} - B_\Delta^{min}. \qquad (6.26)$$

Пример 6.2. Найти предельные значения замыкающего звена (обратная задача) размерной цепи (рис. 6.6), если $B_1 = 5^{+0,13}$; $B_2 = 22^{-0,28}$; $B_3 = 4^{+0,16}$; $B_4 = 8^{+0,20}$.

Решение. На основании формул (6.24) и (6.25) имеем

$$B_\Delta^{max} = B_2^{max} - \left(B_1^{min} + B_3^{min} + B_4^{min}\right) = 22 - (5 + 4 + 8) = 5;$$

$$B_\Delta^{min} = B_2^{min} - \left(B_1^{max} + B_3^{max} + B_4^{max}\right) = 21{,}72 - (5{,}16 + 4{,}16 + 8{,}2) = 4{,}2.$$

Окончательно получим $B_\Delta = 4{,}6 \pm 0{,}4$.

Проверим расчет по формуле (6.23):

$$\delta_\Delta = 0{,}16 + 0{,}28 + 0{,}16 + 0{,}2 = 0{,}8.$$

Для решения прямой задачи (проектный расчет) принимают равные допуски для всех составляющих звеньев. Среднее значение допуска определяют по формуле

$$\delta_{ср} = \delta_\Delta / n = 0{,}8/4 = 0{,}2. \qquad (6.27)$$

При установлении допусков на конкретное звено это значение нужно скорректировать в зависимости от конструкции звена, возможности выдержать допуски и выполнить условие (6.23).

Расчет размерных цепей на максимум-минимум обеспечивает полную взаимозаменяемость. Однако он экономически целесообразен для цепей, состоящих из малого количества звеньев, или для цепей малой точности.

Вероятностный метод расчета. Этот метод учитывает рассеяние размеров и вероятность различных сочетаний отклонений составляющих звеньев размерной цепи.

Основные уравнения для решения размерных цепей вероятностным методом можно получить из правил суммирования случайных взаимонезависимых величин.

Принимая поле (диапазон) рассеивания погрешностей равным допуску δ на изготовление звена, с помощью формулы (6.19) получим

$$\Delta_{\omega\Delta} = \sum_{i=1}^{n} A_i(\Delta_{\omega i} + 0{,}5\alpha_i\delta_i) - 0{,}5\alpha_\Delta\delta_\Delta,$$

где A_i — передаточное отношение i-го составляющего звена.

В большинстве практических задач отклонение замыкающего звена можно считать подчиняющимся закону Гаусса, т. е. $\alpha_\Delta = 0$, откуда

$$\Delta_{\omega\Delta} = \sum_{i=1}^{n} A_i(\Delta_{\omega i} + 0{,}5\alpha_i\delta_i)$$

или

$$\Delta_{\omega\Delta} = \sum_{s}(\Delta_{\omega s} + 0{,}5\alpha_s\delta_s) - \sum_{t}(\Delta_{\omega t} + 0{,}5\alpha_t\delta_t), \qquad (6.28)$$

где $\Delta_{\omega\Delta}$, $\Delta_{\omega s}$, $\Delta_{\omega t}$ — соответственно координаты середины полей допусков замыкающего звена, увеличивающих и уменьшающих звеньев.

Допуск замыкающего звена можно определить с помощью формулы (6.21):

$$\delta_\Delta = (1/\lambda_\Delta)\sqrt{\sum_{i=1}^{n} A_i^2 \lambda_i^2 \delta_i^2}. \qquad (6.29)$$

В размерную цепь могут входить размеры деталей, ошибки которых находятся в линейной функциональной или корреляционной зависимости. Суммирование их должно производиться с учетом групп отклонений, связанных функциональной зависимостью или добавочным слагаемым, содержащим коэффициент корреляции.

Пример 6.3. Решить размерную цепь (см. рис. 6.6) вероятностным методом (обратная задача). Известно, что рассеяние отклонений размеров подчиняется закону нормального распределения.

Р е ш е н и е. Номинальное значение замыкающего звена определим по формуле (6.22):

$$B_\Delta = B_2 - (B_1 + B_3 + B_4) = 22 - (5 + 4 + 8) = 5.$$

При $A_i = 1$ и $\alpha_i = \alpha_\Delta = 0$, согласно (6.28),

$$\Delta w_\Delta = -0{,}14 - (0{,}08 + 0{,}08 + 0{,}100) = -0{,}4.$$

При $\lambda_i = \lambda_\Delta = 1/3$, согласно (6.29),

$$\delta_\Delta = \sqrt{0{,}16^2 + 0{,}28^2 + 0{,}16^2 + 0{,}20^2} = 0{,}41.$$

Окончательно получим

$$B_\Delta = 4{,}6 \pm 0{,}205.$$

Проектный расчет (прямая задача) производится путем назначения для всех составляющих звеньев равных значений допусков и одинаковых значений λ_Δ и λ_i. Полученные значения допусков корректируют, а затем проводят поверочный расчет.

Формулу для определения среднего значения допуска можно получить из уравнения (6.29). Считая, что все звенья в равной степени влияют на образование погрешности, получим

$$\delta_\Delta^2 = n\delta_{ср}^2; \quad \delta_{ср} = \delta_\Delta/\sqrt{n}, \qquad (6.30)$$

откуда $\delta_{ср} = 0{,}8/\sqrt{4} = 0{,}4$.

При решении обратной задачи вероятностным методом допуск замыкающего звена получается меньше, чем при расчете на максимум и минимум, а при решении прямой задачи допуски на соответствующие размеры получаются больше, чем при расчете по формуле (6.27).

Вероятностным методом рассчитываются размерные цепи, для которых оказывается экономически оправданным риск возможного

выхода за пределы поля допуска замыкающего звена у части изделий.

● Примечание. Кроме рассмотренных методов для достижения требуемой точности замыкающего звена используют методы групповой взаимозаменяемости, пригонки и регулировки и др.

Плоские и пространственные размерные цепи. Эти цепи решают теми же методами, что и линейные. Для этого их приводят к виду линейных размерных цепей путем проектирования размеров на одно направление, обычно совпадающее с направлением замыкающего звена.

Размеры пространственной цепи проецируют на две или три взаимно перпендикулярные оси. Проекции звеньев включаются в качестве обычных звеньев в линейные размерные цепи.

6.5. Качество поверхности

Качество поверхности характеризуется геометрическими и физическими параметрами.

С геометрической точки зрения качество поверхности определяется отклонениями реальной поверхности от идеальной. Эти отклонения могут быть разделены на три группы: микронеровности (шероховатость), макронеровности и волнистость. Границу между этими группами можно установить по отношению шага L неровностей к высоте H. Для микронеровности $L/H \leqslant 50$; для макроотклонения $L/H > 1000$; для волнистости $L/H = 50...1000$.

Основными технологическими факторами, влияющими на шероховатость обработанной поверхности, являются геометрия и состояние режущей кромки инструмента, режимы резания, свойства обрабатываемого материала, вид смазывающе-охлаждающей жидкости и др. Качество поверхности заготовок определяется методом их получения. Заготовки, изготовляемые литьем, горячей штамповкой, прессованием, прокаткой, в той или иной мере копируют поверхность рабочей формы или прокатных валков.

Шероховатость поверхности существенно влияет на многие эксплуатационные характеристики изделия, в частности на их износоустойчивость, прочность соединений, трение, коррозионную стойкость и др.

Оценка шероховатости производится в соответствии с ГОСТ 2789—73, который разработан в соответствии с Международным стандартом на основе системы М (от англ. medium — середина). В системе М шероховатость измеряют от единой базы, за которую принята средняя линия профиля m (рис. 6.7).

Средняя линия профиля m — базовая линия, имеющая форму номинального профиля поверхности и делящая измеряемый профиль так, что в пределах базовой длины l сумма квадратов расстояний $y_1, y_2, ..., y_n$ точек профиля до этой линии минимальна. Положение средней линии можно определить по профилограмме.

Базовая длина l — это длина участка поверхности, выбираемого для измерения шероховатости без учета других видов неровностей. Количественно шероховатость поверхности (независимо от способа ее получения) оценивается средним арифметическим отклонением профиля Ra, высотой неровностей профиля по десяти точкам Rz, наибольшей высотой неровностей профиля R_{max}, средним шагом неровностей S_m, средним шагом неровностей по вершинам S, относительной опорной длиной профиля t_p.

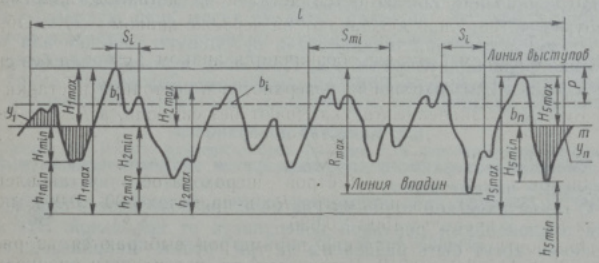


Рис. 6.7. Определение шероховатости поверхности

Большое число параметров для оценки шероховатости способствует установлению обоснованных требований к поверхности различного эксплуатационного назначения. Например, для оценки шероховатости циклически нагруженных ответственных деталей используют критерии R_{max}, S_{max} и S.

Среднее арифметическое отклонение профиля Ra — среднее значение расстояний (без учета знака) точек измеренного профиля до его средней линии на определенной длине участка поверхности:

$$Ra=\frac{1}{l}\int_0^l |y|\,dx\approx\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i|, \qquad (6.31)$$

где l — базовая длина; y — расстояние точек профиля до его средней линии.

Высота неровностей Rz определяется как среднее арифметическое расстояние между находящимися в пределах базовой длины пятью высшими точками выступов и пятью низшими точками впадин, измеренных от линии, параллельной или эквидистантной средней линии:

$$Rz=\frac{1}{5}\left(\sum_{i=1}^{5}|H_{i\,max}|+\sum_{i=1}^{5}|H_{i\,min}|\right), \qquad (6.32)$$

где H_{max}, H_{min} — отклонения пяти наибольших максимумов и минимумов профиля.

Для средней линии, имеющей форму отрезка прямой,

$$Rz = \frac{1}{5}\left(\sum_{i=1}^{5} h_{i\max} - \sum_{i=1}^{5} h_{i\min}\right), \qquad (6.33)$$

где $h_{\max}$ — расстояние от высших точек пяти наибольших максимумов до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль; $h_{\min}$ — расстояние от низших точек пяти наибольших минимумов до этой же линии.

Шероховатость поверхностей деталей из металлов, пластмасс и других материалов обозначают на чертеже знаком $\sqrt{}$. Обработка со снятием стружки обозначается знаком ∇, а без снятия стружки или сохранения поверхности в состоянии поставки — знаком $\sqrt{}$. Значение Ra указывают без символа, а Rz — с символом, например $\overset{1,25}{\nabla}$, $\overset{Rz3,2}{\nabla}$.

Числовые значения параметров шероховатости установлены (ГОСТ 2789—73) для параметра Ra в пределах 100...0,008 мкм, а для Rz — в пределах 1600...0,025.

Предпочтительные значения параметров выбираются из ряда 100, 50, 25, ..., 0,25, 0,012. Шероховатость поверхности оценивают качественно и количественно.

При качественной оценке обработанная поверхность изделия визуально (на глаз или с помощью микроскопа) сравнивается с эталоном (образцом). Последний имеет один окуляр и два объектива; под один объектив помещают проверяемую деталь, а под другой — образец (эталон).

При количественной оценке используются специальные приборы (контактные и бесконтактные).

В контактных приборах производится ощупывание поверхности иглой и измерение (или запись) перемещения иглы относительно поверхности. Вертикальные перемещения иглы усиливаются электрическим, пневматическим или оптическим способом и регистрируются на шкале прибора или записываются в виде профилограммы исследуемой поверхности. Наибольшее применение из приборов этой группы получили профилометры, используемые для определения шероховатости в пределах Ra 8,0...0,025 мкм.

Из бесконтактных приборов применяют двойной микроскоп Линника (для Rz 40...0,8) и микроинтерферометр (для $Rz <$ $<$0,025 мкм).

С физической точки зрения качество поверхности оценивается состоянием поверхностного слоя.

Поверхностный слой не имеет резко выраженной границы, и его состояние изменяется по глубине неравномерно. Обычно наблюдаются три зоны. Первая зона характерна большими искажениями кристаллической решетки металла и повышенной твердо-

стью. Во второй зоне наблюдаются снижение твердости по сравнению с верхней зоной, вытягивание зерен и наволакивание одних зерен на другие. В третьей зоне состояние слоя постепенно приближается к состоянию основного материала.

Основным методом определения качества поверхностного слоя является измерение микротвердости и толщины наклепанного слоя. Микротвердость определяют на микротвердомере ПМТ-3 путем вдавливания алмазной пирамиды при нагрузке от 0,05 до 1,9 Н. Полученный отпечаток измеряют окуляр-микрометром с ценой деления 0,3 мкм при увеличении 15^x.

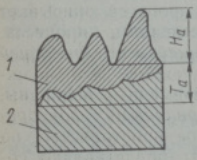


Рис. 6.8. Определение минимального припуска на обработку

Для определения величины наклепанного слоя стального образца производят его травление в царской водке (70% азотной кислоты и 30% соляной), а цветных металлов — в едкой щелочи. При этом измеряют толщину стравленного слоя и микротвердость. Стравление производят до тех пор, пока не станут появляться устойчивые показания микротвердости.

По результатам испытания строят график. По оси ординат откладывают микротвердость, а по оси абсцисс — расстояние от поверхности в глубь образца. Такой график определяет степень и глубину наклепа верхних слоев детали.

Более удобным и простым методом определения глубины и степени наклепа является метод косых срезов. При этом на испытуемом образце делают срез под небольшим углом (не более 2°) и по косому срезу на равных расстояниях (50...100 мкм) измеряют микротвердость. Для измерения внутренних напряжений на глубине 3...10 мкм применяют рентгенографические методы, а для изучения дефектов структуры — электронную микроскопию. Глубина дефектного слоя и шероховатость поверхности зависят от метода обработки. Числовые значения этих параметров приводятся в справочной литературе и могут быть использованы при расчете припусков.

Припуском называется слой материала, удаляемой с поверхности заготовки для достижения заданных свойств обрабатываемой поверхности. Минимальное значение припуска Z_{min} должно обеспечивать удаление микронеровностей *1* и дефектного слоя *2*, получаемого при предшествующей обработке (рис. 6.8):

$$Z_{min} = Z_o + Z_{доб}; \quad Z_o = H_a + T_a, \qquad (6.34)$$

где H_a — высота микронеровностей; T_a — дефекты поверхностного слоя, оставшиеся от предыдущей обработки. Величина $Z_{доб}$ учитывает погрешности, формы поверхностей и установки детали.

ГЛАВА 7

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

7.1. Сущность факторного анализа

Математическая модель технологического процесса описывает связь между выходными и первичными параметрами процесса. Выходной параметр называют *целевой функцией* или *функцией отклика*, а геометрический образ, соответствующий этой функции,— *поверхностью отклика*. Независимые переменные величины, влияющие на функцию отклика, являются *первичными факторами*, или *входными параметрами*. Координатное пространство, по осям которого отложены первичные параметры, представляют собой *факторное пространство*.

В качестве *выходного параметра* может быть принята надежность, процент выхода годных деталей, точность, прочность соединения и др. Во всех случаях параметр оптимизации должен задаваться количественно, существовать для всех значений, которые могут принимать первичные факторы и измеряться с требуемой точностью.

Технологический процесс (операция) может иметь несколько выходных параметров. В этих случаях выбирают наиболее важные из них.

Первичные параметры должны быть управляемыми и независимыми, т. е. давать возможность устанавливать и поддерживать их значения на определенном уровне независимо от значения других факторов. Они должны иметь четкий метрологический смысл и измеряться с требуемой точностью.

Перечень входных параметров зависит от целей исследования. Однако во всех случаях он должен быть практически целесообразным, т. е. включать только те важнейшие параметры, которые наиболее существенно влияют на параметр оптимизации.

Обширный перечень варьируемых параметров не дает возможности получить простую и наглядную математическую модель и затрудняет проведение оценки влияния исходных факторов на параметр оптимизации. При большом числе (более 7) их необходимо ограничить, выделив из общей совокупности наиболее существенные (критичные). При отсеивании несущественных факторов очень важно не отнести к их числу значимые, так как от их правильного выбора зависит успех оптимизации. Для отсеивания несущественных параметров наиболее часто применяют *метод случайного баланса* (отсеивающего эксперимента) или *априорного ранжирования* (ранговой корреляции).

Наиболее общей моделью технологического процесса является модель «черный ящик». Она представляет собой систему, в кото-

рой известны входные и выходные параметры, а процессы, происходящие внутри системы, остаются неизвестными. Такая система (рис. 7.1) изучается путем наблюдения за реакцией выходных величин ($y_1, ..., y_m$) на изменение входных ($x, ..., x_n$).

Функция связи между первичными (x_i, $i=1, ..., n$) и выходными параметрами (y_j, $j=1, ..., m$) определяется полиномами:

линейным

$$y_j = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i; \qquad (7.1)$$

неполным квадратичным

$$y_j = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{i \neq k}^{C_n^2} b_{ik} x_i x_k + \sum_{i \neq k \neq h}^{C_n^3} b_{ikh} x_i x_k x_h; \qquad (7.2)$$

полным квадратичным

$$y_j = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{i \neq k}^{C_n^2} b_{ik} x_i x_k + \sum_{i=1}^{n} b_{ii} x_i^2, \qquad (7.3)$$

где i, k, h — номера первичных параметров; b_0, b_i, b_{ik}, b_{ii}, b_{ikh} — коэффициенты регрессии.

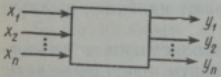


Рис. 7.1. Модель технологического процесса «черный ящик»

Путем проведения методов активного эксперимента можно достигнуть такого уровня знаний свойств системы, чтобы иметь возможность предсказать изменение ее выходных параметров при любом изменении входных параметров и определить их оптимальную область. При этом обычно ограничиваются представлением функциональной зависимости в виде линейного или неполного квадратичного полинома. Однако точность даже таких упрощенных математических моделей достаточно высока (~10%). Кроме того, активный эксперимент является единственным методом, позволяющим найти функциональную связь между первичными и выходными параметрами с учетом эффекта взаимодействия. При этом существенно сокращаются сроки решения задачи, снижаются затраты на исследования и повышается качество полученных результатов.

Общим условием применимости методов активного эксперимента является воспроизводимость результатов. Поэтому, прежде чем приступить к планированию эксперимента, необходимо убедиться в том, что опыты воспроизводимы. Для этого проводят несколько параллельных опытов в рассматриваемой области изменения влияющих факторов и проверяют их воспроизводимость по критерию Кохрена.

7.2. Полный факторный эксперимент

Одним из методов построения линейной математической модели и модели в виде неполного квадратичного полинома является полный факторный эксперимент (ПФЭ), который заключается в следующем. Для каждого исследуемого первичного параметра устанавливают два уровня (верхний и нижний). Общее число экспериментов N при числе факторов n и двух уровнях определяют по формуле

$$N = 2^n. \qquad (7.4)$$

В качестве первичных параметров при исследовании технологического процесса термокомпрессионной сварки можно принять температуру, время сварки и давление инструмента (табл. 7.1). Выходным параметром является прочность соединения (усилие на разрыв).

Таблица 7.1

Параметр	Температура, °С	Время сварки, с	Усилие нажатия инструмента, сН
Основной уровень x_{0i}	260	1,2	525
Интервал варьирования Δx_i	40	0,4	175
Верхний уровень $x_{вi}$	300	1,6	700
Нижний уровень $x_{нi}$	220	0,8	350
Кодовое обозначение x_i	x_1	x_2	x_3

Поскольку первичные факторы имеют различные единицы измерения, их приводят к единой системе счисления путем перехода от действительных значений к кодированным k переменным x_1, x_2, x_3. Этот переход осуществляется по формулам

$$x_{вk} = (x_{вi} - x_{0i})/\Delta x_i; \quad x_{нk} = (x_{нi} - x_{0i})/\Delta x_i, \qquad (7.5)$$

где x_{0i} — базовый, или основной, уровень i-й переменной; Δx_i — интервал варьирования i-й переменной:

$$\Delta x_i = (x_{вi} - x_{нi})/2. \qquad (7.6)$$

Для обозначения верхнего $x_{вi}$, нижнего $x_{нi}$ и основного уровней вводят соответственно $+1$; -1 и 0.

При построении матрицы планирования эксперимента (табл. 7.2) цифры (единицы) опускают; верхний уровень обозначают знаком «+», нижний — знаком «—». В строках матрицы записывают данные опыта, а в столбцах — факторы в кодах («+» или «—») с реализацией всех возможных сочетаний. Для фактора x_1 знаки меняют для каждого опыта, для фактора x_2 — чередуют через два, для фактора x_3 — через четыре опыта и т. д.

С целью исключения систематических ошибок матрицу планирования рандомизируют с помощью таблицы случайных чисел или методом жетонов. В последнем случае число жетонов выбирают равным числу опытов (N). Каждому жетону присваивают порядковый номер. Жетоны помещают в урну и извлекают из нее по одному. Последовательность появления жетонов определяет порядок проведения опытов. При пользовании таблицей случайных чисел выбирают любое число и случайные числа от 1 до N (в нашем случае до 8) заносят в графу табл. 7.2 «Номер повторения» в том порядке, в котором они следуют в таблице случайных чисел. Каждое число берут только один раз.

Номер повторения				Номер опыта	Значения факторов							
1	2	3	4		x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
8	4	1	6	1	+	−	−	−	+	+	+	−
6	3	6	4	2	+	+	−	−	−	−	+	+
7	6	4	8	3	+	−	+	−	−	+	−	+
1	5	5	7	4	+	+	+	−	+	−	−	−
4	1	3	3	5	+	−	−	+	+	−	−	+
3	7	8	2	6	+	+	−	+	−	+	−	−
5	8	2	5	7	+	−	+	+	−	−	+	−
2	2	7	1	8	+	+	+	+	+	+	+	+

Правильно составленная матрица планирования должна удовлетворять следующим критериям оптимальности: симметричности, нормировки и ортогональности.

Симметричность относительно центра эксперимента определяется условием

$$\sum_{j=1}^{N} x_{ij}=0, \quad i=1, 2,..., n, \quad j=1, 2,..., N, \tag{7.7}$$

т. е. алгебраическая сумма элементов столбца каждого фактора (кроме x_0) равна нулю.

Нормировка заключается в том, что сумма квадратов каждого столбца равна числу точек плана матрицы:

$$\sum_{j=1}^{N} x_{ij}^2=N. \tag{7.8}$$

Ортогональность состоит в том, что сумма почленных произведений двух любых вектор-столбцов плана матрицы равна нулю:

$$\sum_{j=1}^{N} x_{ij}x_{kj}=0, \quad k\neq i. \tag{7.9}$$

Свойство ортогональности матрицы позволяет оценить коэффициенты регрессии независимо друг от друга, т. е. любой коэффициент не зависит от того, какие значения имеют другие коэффициенты.

Если план матрицы отвечает этим свойствам, то он соответствует свойству ротатабельности, т. е. математическая модель, полученная в результате эксперимента, способна предсказать значения показателя параметра оптимизации с одинаковой точностью в любых направлениях на равных расстояниях от центра плана матрицы. В случае неполного квадратичного уравнения матрица ПФЭ дополняется столбцами $x_i \ldots x_j$.

Таблица 7.2

Усилия отрыва, сН				$\overline{y_j}$	$s^2{}_j$	$\widehat{y}_j$
1	2	3	4			
60	120	100	80	90	666,6	89,7
250	175	220	230	218,9	1006,2	225,3
125	160	95	80	115	1250	115,3
220	225	205	175	206,2	506,2	199,7
225	195	210	190	205	250	186
235	155	275	245	227,5	2625	215,4
125	115	180	145	141,2	833	160,4
225	130	250	260	228,7	1273	241

Выбор центра (основного уровня) осуществляется на основе анализа априорной информации. Интервал варьирования зависит от точности фиксирования факторов, характеристики кривизны поверхности и диапазона изменения параметров.

Эксперимент проводят в соответствии с матрицей планирования. Число параллельных опытов γ берут от 2 до 4 и фиксируют усилие отрыва $y_j{}^i$. На основании этих данных определяют среднее значение усилия отрыва $\bar{y}_j$ и построчную дисперсию $S_j{}^2$:

$$\overline{y}_j = (y_j^{(1)} + y_j^{(2)} + \ldots + y_j^{(\gamma)})/\gamma; \qquad (7.10)$$

$$S_j^2 = \sum_{i=1}^{\gamma} (y_j^i - \bar{y}_j)^2/(\gamma - 1). \qquad (7.11)$$

Воспроизводимость эксперимента определяют по критерию Кохрена:

$$G = S^2{}_{j\,\max}/S_\Sigma^2, \qquad (7.12)$$

где $S^2{}_{j\max}$ — наибольшая из построчных дисперсий;

$$S_\Sigma^2 = \sum_{j=1}^{N} S_j^2 \qquad (7.13)$$

— сумма построчных дисперсий.

Пример 7.7. Определить $\bar{y}_j$ и S^2_j по результатам первого опыта и оценить воспроизводимость всего эксперимента (см. табл. 7.2).

Решение. На основании формул (7.10) и (7.11) имеем

$$\bar{y}_1 = (60 + 120 + 100 + 80)/4 = 90;$$

$$S_1^2 = [(60 - 90)^2 + (120 - 90)^2 + (100 - 90)^2 + (80 - 90)^2]/3 = 666{,}6.$$

Воспроизводимость эксперимента определим по формуле (7.12):

$$G = 2625/8400 \approx 0{,}31.$$

Полученное значение G сравнивают с табличным (см. приложение П.1), которое определяют для выбранных уровня значимости q (обычно $q=0{,}05$), числа дублированных строк матрицы $N=8$ и числа степеней свободы $f_1=\gamma-1=3$. Для указанных значений $G_{\text{табл}}=0{,}4377$. Если $G<G_{\text{табл}}$, то эксперимент воспроизводим и величину

$$S^2 = \sum_{j=1}^{8} S_j^2/8 \approx 1050$$

можно считать оценкой генеральной совокупности.

Если $G>G_{\text{табл}}$, то эксперимент невоспроизводим. В этом случае надо увеличить число параллельных опытов или сузить интервалы варьирования, а центр плана перенести в точку с наилучшим результатом.

Коэффициенты линейной математической модели и модели в виде неполного квадратичного полинома определяют по формулам:

для свободного члена

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \bar{y}_i; \qquad (7.14)$$

для коэффициента при линейных членах

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_{ij} \bar{y}_j; \qquad (7.15)$$

для коэффициентов при парных произведениях

$$b_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_{ij} x_{kj} \bar{y}_j; \qquad (7.16)$$

для коэффициентов при тройных произведениях

$$b_{ikh} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_{ij} x_{kj} x_{hj} \bar{y}_j, \qquad (7.17)$$

где i, k, h — текущие номера параметров.

Пример 7.2. Найти функцию связи (уравнение регрессии) для числовых значений, приведенных в табл. 7.2.

Уравнение регрессии примем в виде неполного квадратичного полинома (7.2). Коэффициенты уравнения определим по формулам (7.14)...(7.17):

$$b_0 = (90 + 218{,}9 + 115 + 206{,}2 + 205 + 227{,}5 + 141{,}2 + 228{,}7)/8 = 179{,}1;$$

$$b_{x_1} = (-90 + 218{,}9 - 115 + 206{,}2 - 205 + 227{,}5 - 141{,}2 + 228{,}7)/8 = 41{,}2.$$

В результате уравнение регрессии примет следующий вид:

$$\hat{y} = 179{,}1 + 41{,}2x_1 - 6{,}25x_2 + 21{,}6x_3 + 3{,}4x_1x_2 - $$

$$- 13{,}75x_1x_3 - 9{,}37x_2x_3 + 12{,}81x_1x_2x_3.$$

Значимость коэффициентов оценим по критерию Стьюдента, который вычисляют для каждого коэффициента:

$$t_i = |b_i| \sqrt{N\gamma / S^2}. \qquad (7.18)$$

Полученное значение сравним с табличным (см. приложение П.2), которое определяют для выбранного уровня значимости (обычно $q = 0{,}05$) и числа степеней свободы $f_2 = N(\gamma - 1)$ или $f_2 = 8(4-1) = 24$. При указанных значениях $t_{табл} = 2{,}06$. По формуле (7.18) вычислим

$$t_0 = 179{,}1 \sqrt{8 \cdot 4 / 1050} = 31{,}3.$$

Остальные значения критерия Стьюдента вычисляют аналогично:

$$t_0 = 31{,}3;\ t_1 = 7{,}2;\ t_2 = 1{,}09;\ t_3 = 3{,}76;$$

$$t_{12} = 0{,}6;\ t_{13} = 2{,}4;\ t_{23} = 1{,}64;\ t_{123} = 2{,}2.$$

Соответствующие коэффициенты считаются значимыми, если $t_i > t_{табл}$. Следовательно, коэффициенты b_0, b_1, b_3, b_{13}, b_{123} с вероятностью 0,95 значимы, а остальные незначимы.

Тогда уравнение регрессии будет иметь следующий вид:

$$\hat{y} = 179{,}1 + 41{,}2x_1 + 21{,}6x_3 - 13{,}75x_1x_3 + 12{,}8x_1x_2x_3.$$

Адекватность полученной модели оценивают по критерию Фишера в такой последовательности.

Дисперсия адекватности

$$S^2_{ад} = \frac{1}{N - d} \sum_{j=1}^{N} (y_i - \hat{y}_j)^2, \qquad (7.19)$$

где $\hat{y}_j$ — значение выходного параметра для i-й строки матрицы, рассчитанное на основании полученной модели; d — число значимых членов модели.

По данным табл. 7.2,

$$S^2_{ад} = 1110{,}17/3 = 370.$$

Критерий Фишера

$$F = S^2_{ад} / S^2 = 370/1050 = 0{,}35.$$

Табличное значение критерия Фишера (см. приложение П.3) для заданного уровня значимости $q = 0{,}05$ и степеней свободы будет

$$f_2 = N(\gamma - 1) = 24;\quad f_3 = N - d = 3;\quad F_{табл} = 3.$$

Так как $F < F_{табл}$, то модель адекватна.

Если $F > F_{табл}$, гипотеза об адекватности модели отвергается. В этом случае необходимо перейти к более сложному виду модели, например к полному квадратичному полиному, или уменьшить шаги варьирования факторов.

Полученная экспериментально-статистическая модель позволяет с вероятностью 0,95 утверждать, что на прочность термокомпрессионного соединения влияют температура и давление инструмента. Влияние времени сварки и всех взаимодействий в заданном интервале изменения первичных факторов незначительно.

С увеличением числа первичных факторов резко возрастает количество опытов полного факторного эксперимента. Обычно число первичных факторов, влияющих на выходной параметр, ле-

жит в пределах 2...7. Однако в некоторых случаях их число доходит до 20, что может сделать ПФЭ нереализуемым из-за большого количества опытов.

Для ускорения процесса вычисления статистических характеристик и построения модели при большом числе первичных факторов используется вычислительная техника. Алгоритм вычисления приведен на рис. 7.2.

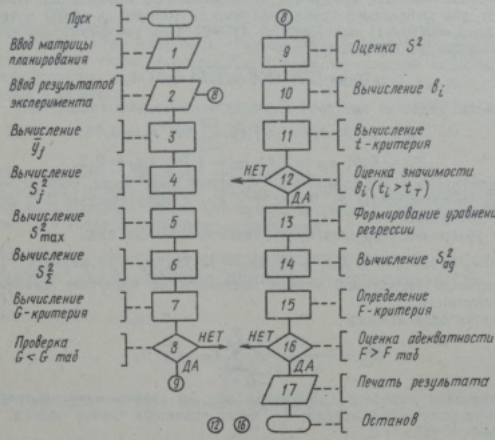


Рис. 7.2. Схема алгоритма вычисления статистических характеристик при ПФЭ

Общее число опытов можно сократить, используя дробный факторный эксперимент, позволяющий получить линейное приближение искомой функциональной зависимости в некоторой окрестности базовой начальной точки при минимуме опытов. При этом для нахождения математического описания технологического процесса используется определенная часть ПФЭ: 1/2; 1/4 и т. д. Такие системы опытов называются дробными репликами.

7.3. Оптимизация технологических процессов на основе экспериментально-статистической модели

Оптимизация технологических процессов заключается в нахождении таких значений первичных параметров, которые позволяют получить экстремальное (максимальное или минимальное) значение выходного параметра (критерия оптимизации).

Модель технологического процесса в общем виде определяется уравнением

$$y=f(x_1, x_2,..., x_n), \qquad (7.20)$$

где y — выходной параметр; $x_1, x_2, ..., x_n$ — первичные факторы или входные параметры.

В случае дифференцируемости функции $y=f(x_i)$ и неравенства нулю ее вторых производных задача оптимизации сводится к решению системы из n алгебраических уравнений вида

$$\frac{\partial f(x_1, x_2, \ldots, x_n)}{\partial x_i}=0 \quad (i=1,2,..., n).$$

В практике оптимизации сложных моделей технологических процессов наряду с аналитическим методом широко применяют численные методы и наиболее часто — метод крутого восхождения. Если существует несколько экстремумов, то метод крутого восхождения позволяет определить тот из них, который расположен ближе к начальным точкам. При этом находят локальное описание поверхности отклика с помощью линейного уравнения регрессии и оценивают его коэффициенты.

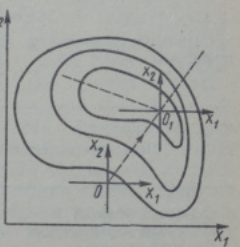


Рис. 7.3. Оптимизация по методу крутого восхождения

Если модель адекватна и все коэффициенты уравнения регрессии значимы, то переходят к движению по градиенту до достижения стационарной области, в которой располагается экстремум. Если при таком движении не удается достигнуть оптимума, то ставят новую серию опытов в точке O_1 с лучшим достигнутым значением параметра оптимизации, находят уравнение регрессии и на его основе определяют новое направление движения по градиенту (рис. 7.3). Такое чередование факторного планирования и движения по градиенту продолжается до достижения области оптимума, для описания которой используют планы более высоких порядков.

Шаг при движении по градиенту выбирают следующим образом. Один из факторов принимают за базовый и для него вычисляют произведение соответствующего коэффициента регрессии на шаг варьирования. Для первого фактора это произведение имеет вид $b_1\Delta x_1$. Затем для базового фактора выбирается шаг движения по градиенту Δx_1^*, с которым и будет осуществляться оптимизация. Обычно $\Delta x_1^* \leqslant \Delta x_1$. Далее вычисляют отношение

$$h_i=\Delta x_i^*/(b_i\Delta x_i). \qquad (7.21)$$

Для остальных факторов шаги движения к оптимальным значениям рассчитывают по формуле

$$\Delta x_i^* = h_i b_i \Delta x_i. \qquad (7.22)$$

Движение к оптимуму начинают из центра плана O (см. рис. 7.2). Значения факторов на каждом новом шаге определяют путем прибавления Δx_i^* к соответствующим предыдущим значениям. Если же находится минимум функции y, то новые значения получают из предыдущих путем вычитания Δx_i^*. Такой способ оптимизации называют методом наискорейшего спуска. Движение к оптимуму прекращается при достижении критерия оптимальности или в случае выхода значений факторов за границы допустимых значений.

Пример 7.3. Найти оптимальные режимы технологического процесса термокомпрессионной сварки. В результате полного факторного эксперимента получена линейная модель следующего вида:

$$y = 970 + 370x_1 + 50x_2 + 80x_3. \qquad (7.23)$$

Целевой функцией y является прочность соединения. Значения факторов приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Наименование параметра	Температура X_1, °С	Время X_2, с	Усилие нажатия инструмента X_3, Н
Основной уровень	950	10	1,6
Интервал варьирования	50	5	0,2
Верхний уровень	1000	15	1,8
Нижний уровень	900	5	1,4

Решение. За базовый фактор принимаем температуру сварки, шаг движения по градиенту при крутом восхождении равным $\Delta x_1^* = 12$°С, а интервал варьирования $\Delta x_1 = 50$°С (по условиям ПФЭ). Тогда

$$h = \Delta x_1^*/(b\Delta x_1) = 12/(370 \cdot 50) = 0{,}00065.$$

Шаг движения для всех факторов

$$\Delta x_1 = 0{,}00065 \cdot 370 \cdot 50 = 12{,}03 \approx 12{,}0;$$

$$\Delta x_2 = 0{,}00065 \cdot 50 \cdot 5 = 0{,}163 \approx 0{,}16.$$

$$\Delta x_3 = 0{,}00065 \cdot 80 \cdot 0{,}2 = 0{,}010 \approx 0{,}01.$$

В табл. 7.4 приведены результаты мысленных опытов. К значениям основных уровней факторов x_i в натуральных (физических) единицах прибавилось соответствующее значение шагов. Переход к кодированным значениям x_i осуществлялся по формуле (7.5). Например, для первого опыта

$$x_1 = (962 - 950)/50 = 0{,}24; \quad x_2 = (10{,}16 - 10)/5 = 0{,}032;$$

$$x_3 = (1{,}61 - 1{,}6)/0{,}2 = 0{,}05.$$

Подставляя найденные значения x_i в уравнение (7.23), получим значения целевой функции. Например, для четвертого опыта (табл. 7.4)

$$y = 970 + 370 \cdot 0{,}96 + 50 \cdot 0{,}128 + 80 \cdot 0{,}20 = 1347{,}6.$$

Значение одного из факторов x_i в следующем опыте вышло за допустимые пределы. В этой точке ставят другую серию опытов и находят уравнение регрессии, на основании которого определяют новое направление движения по градиенту. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто экстремальное значение критерия, т. е. пока изменение критерия не станет достаточно малым.

Таблица 7.4

Номер опыта	Факторы						y
	X_1	x_1	X_2	x_2	X_3	x_3	
1	962	0,24	10,16	0,032	1,61	0,05	1064,4
2	974	0,48	10,32	0,064	1,62	0,1	1158,8
3	986	0,72	10,48	0,096	1,63	0,15	1253,2
4	998	0,96	10,64	0,128	1,64	0,20	1347,6
5	1010	1,20	10,80	0,16	1,65	0,25	14442

Процесс оптимизации приводит в область факторного пространства, близкую к экстремуму, где поверхность отклика имеет большую кривизну и не может быть описана линейным полиномом. Для адекватного математического описания такой поверхности используется полный квадратичный полином второго порядка.

Для полинома второго порядка число уровней независимых переменных должно быть на единицу больше степени интерполяционного полинома.

Если использовать все возможные сочетания уровней по каждому фактору, то необходимо провести 3^n опытов (n — число факторов), что нерационально. Сократить число опытов можно используя центральное композиционное планирование (ЦКП), ядром которого являются линейные ортогональные планы и некоторое число дополнительных точек («звездные точки»).

ГЛАВА 8
НАДЕЖНОСТЬ ЭВМ И ПУТИ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

8.1. Основные понятия и определения

Основной задачей теории надежности является разработка методов расчета и обеспечения заданной надежности в течение определенного времени и в конкретных условиях эксплуатации.

Под *надежностью* понимается свойство объекта сохранять во

времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов и транспортирования. Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения сочетает в себе безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость.

Безотказность определяется свойством объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность характеризует свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Долговечность количественно оценивается техническим ресурсом, представляющим собой сумму интервалов времени безотказной работы системы или изделия за период эксплуатации до разрушения или другого предельного состояния. Для изделий, износ которых в процессе эксплуатации происходит неравномерно и связан с периодическим выполнением определенных функций (измерений, включений, зарядов и разрядов и т. д.), долговечность может измеряться другими единицами (например, числом циклов, на которое рассчитано изделие до его износа). Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, например, если его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности, эффективности и безвредности.

Ремонтопригодность — свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость определяет свойство изделия сохранять обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортирования, установленного технической документацией.

Для количественной оценки надежности важнейшее значение имеет *отказ,* под которым понимается событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. *Критерием отказа* является признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта, установленных в нормативно-технической и конструкторской документации. Признаки возникновения отказа — выход значения параметров за пределы допуска, нарушение нормальной работы и т. д.

Отказы могут быть полными и частичными, внезапными и постепенными, зависимыми и независимыми.

Полным отказом называется такой, при возникновении которого невозможно использовать аппаратуру (элемент, системы) до устранения причины отказа.

Частичный отказ обычно связан с ухудшением какой-либо одной из характеристик (параметров) элемента (системы). При этом некоторое время до устранения причины отказа аппаратуру еще можно использовать.

Физический смысл *внезапного отказа* сводится к тому, что в результате скачкообразного изменения какого-либо параметра элемента схемы он теряет свойства, необходимые для обеспечения нормальной работы аппаратуры. К таким отказам можно отнести пробой изоляции, короткое замыкание и др.

Причинами внезапных отказов могут быть конструктивные недоработки, скрытые производственные дефекты, нарушение правил эксплуатации и внешние воздействия, не свойственные нормальной эксплуатации (удары, вибрации, перегрев и др.). Такие отказы чаще всего возникают в начальный период эксплуатации.

Физический смысл *постепенного отказа* заключается в том, что в результате постепенного изменения отдельного параметра элемента схемы он выходит за допустимые пределы (изменение емкости конденсаторов, величины сопротивлений резисторов и др.).

Зависимый отказ возникает в одном или нескольких элементах системы в результате отказа другого элемента (объекта). *Независимый отказ* не обусловлен отказом другого объекта. Некоторые объекты обладают способностью после отказов самостоятельно восстанавливать работоспособность. Отказы такого типа называют перемежающимися (самоустраняющимися). Они могут возникать через относительно короткие интервалы времени.

В теории надежности различают следующие соединения элементов: основное (последовательное), резервное (параллельное) и смешанное.

Последовательным называется такое соединение, при котором отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. Предполагается также, что отказ каждого элемента является событием независимым и случайным, причем интенсивность отказов элементов не изменяется во времени, т. е. не происходит старения элементов. Последовательное соединение в указанном смысле не совпадает с физическим последовательным соединением элементов, так как в электрической схеме они могут быть соединены как последовательно, так и параллельно.

При резервном соединении отказ системы наступает только после отказа основного и всех резервных элементов.

Смешанным соединением называется сочетание основного и резервного соединений.

В зависимости от причины возникновения отказы могут быть конструкционными, производственными и эксплуатационными. *Конструкционный отказ* возникает в результате несовершенства или установленных правил, или норм конструирования объекта. *Производственный отказ* является следствием нарушения установ-

ленного технологического процесса изготовления или ремонта. *Эксплуатационный отказ* возникает в результате нарушения установленных правил или условий эксплуатации объекта.

8.2. Показатели надежности электронных устройств

Все количественные характеристики надежности имеют вероятностный характер, так как отказы являются случайными событиями. Определение вероятностных (теоретических) характеристик является сложной задачей, поэтому даже для простых изделий (например, радиодеталей) обычно определяют статические (экспериментальные) характеристики надежности. Статические характеристики находят с помощью математической обработки результатов большого числа наблюдений, полученных при эксплуатации и испытании. При оценке надежности нового изделия используют характеристики надежности отдельных элементов, которые известны по результатам предыдущих испытаний.

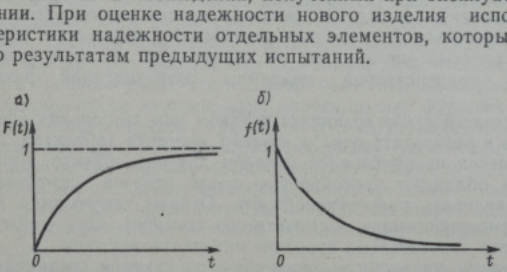


Рис. 8.1. График функции распределения случайной величины: *а* — интегральный закон $F(t)$; *б* — дифференциальный закон $f(t)$

Показатели надежности могут быть единичными или комплексными. Единичный показатель характеризует одно из свойств надежности объекта, комплексный показатель — несколько свойств, составляющих надежность объекта.

Электронная аппаратура относится к классу неремонтируемой. Показателями надежности неремонтируемых изделий являются вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа и интенсивность отказов.

Вероятностью безотказной работы $P(t_0)$ называют вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа в объекте не возникнет. В интервале от 0 до t_0 вероятность безотказной работы определяют по формуле

$$P(t_0)=1-F(t_0); \qquad (8.1)$$

вероятность отказа $Q(t_0)$ —по формуле

$$Q(t_0)=F(t_0)=1-P(t_0), \qquad (8.2)$$

где $F(t_0)$ — функция распределения наработки до отказа.

Функцию $F(t)$ называют *интегральным законом распределения случайной величины* t. Значения функции распределения находятся в интервале $0 \leqslant F(t) \leqslant 1$. График функции распределения показан на рис. 8.1, *а*.

Производную от функции распределения $F(t)$ называют *дифференциальным законом распределения* $f(t)$, а график плотности вероятности $f(t)$ — *кривой распределения*.

Функцию распределения можно выразить через плотность вероятности:

$$F(t)=\int_0^t f(t)\,dt. \tag{8.3}$$

В теории надежности используют экспоненциальный закон распределения непрерывной случайной величины, для которого плотность распределения (рис. 8.1, *б*)

$$f(t)=\lambda e^{-\lambda t}, \tag{8.4}$$

где λ — интенсивность отказов.

Экспоненциальный закон распределения можно рассматривать как частный случай распределения Вейбулла.

Основными характеристиками экспоненциального закона распределения являются математическое ожидание $M(t)=1/\lambda$ и дисперсия $\sigma^2(t)=1/\lambda^2$. После преобразования формулы (8.3) получим

$$F(t)=\int_0^t f(t)\,dt=1-e^{-\lambda t}. \tag{8.5}$$

Подставляя значение $F(t)$ в (8.1), получим

$$P(t)=e^{-\lambda t}. \tag{8.6}$$

Уравнение (8.6) называют *экспоненциальным законом надежности*, из которого следует, что надежность объекта убывает с течением времени по экспоненциальной кривой. Это уравнение используют обычно при оценке надежности сложных систем, отказы которых обусловлены большим количеством входящих в них комплектующих элементов. Большим преимуществом экспоненциального закона является его простота.

Средняя наработка до отказа определяется как ожидаемое время исправной работы до первого отказа:

$$t_{ср}=\int_0^\infty t f(t)\,dt=\int_0^\infty t\,dF(t), \tag{8.7}$$

где $t_{ср}$ — средняя наработка до отказа.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ представляет условную плотность вероятности возникновения отказов в системе в некоторый мо-

мент времени наработки при условии, что до этого момента отказов в системе не было. Величина $\lambda(t)$ определяется отношением

$$\lambda(t)=f(t)/P(t). \qquad (8.8)$$

Интенсивность отказов называют *λ-характеристикой*. Приближенно ее определяют по формуле

$$\lambda(t)\approx\frac{n(t)}{N(t)\,\Delta t}, \qquad (8.9)$$

где $n(t)$ — число систем (элементов), отказавших в течение рассматриваемого промежутка времени Δt; $N(t)$ — количество систем (элементов), работоспособных к началу промежутка времени Δt.

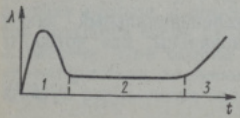


Рис. 8.2. Типовая кривая интенсивности отказов

Величина $\lambda(t)$ показывает, какая часть элементов по отношению к среднему числу исправно работающих элементов выходит из строя в единицу времени (обычно в 1 ч).

Типовая кривая интенсивности отказов (рис. 8.2) может быть разделена на три участка.

Участок 1, соответствующий этапу приработки, характеризуется повышенной интенсивностью внезапных отказов, являющихся следствием некачественного изготовления. Желательно, чтобы этот этап заканчивался на заводе-изготовителе.

Участок 2, соответствующий этапу нормальной работы, характеризуется нормальным сроком эксплуатации изделия. Интенсивность отказов уменьшается, так как этап приработки закончился, а износ деталей (элементов) еще не наступил. Вероятность нормальной работы элементов на этом этапе определяется законом Пуассона (законом редких явлений).

Участок 3 характеризуется новым нарастанием интенсивности отказов, являющихся результатом старения или износа элементов. На этапе нормальной работы между интенсивностью отказов $\lambda(t)$ и средним временем $t_{ср}$ исправной работы имеется зависимость

$$\lambda(t)=1/t_{ср}. \qquad (8.10)$$

Показателями надежности ремонтируемых изделий являются коэффициент готовности, наработка на отказ, параметр потока отказов, вероятность безотказной работы, среднее время восстановления и др.

Коэффициент готовности $K_г$ является примером комплексного показателя, так как он характеризует две составляющие показателя надежности: наработку на отказ $T_о$ и среднее время восстановления $T_в$, т. е.

$$K_г=T_о/(T_о+T_в). \qquad (8.11)$$

8.3. Расчет надежности

Расчетом надежности называется определение значений количественных характеристик надежности. Исходными данными для расчета являются типы элементов, их количество, значения интенсивности отказов, условия эксплуатации и режимы работы элементов.

Интенсивность отказов элемента в данных условиях эксплуатации

$$\lambda_j = \lambda_{j\text{н}} K_1 K_2 \ldots K_n = \lambda_{j\text{н}} \prod_{j=1}^{n} K_j, \qquad (8.12)$$

где $\lambda_{j\text{н}}$ — интенсивность отказов элемента в нормальных условиях; K_1, K_2, K_3 — эксплуатационные (поправочные) коэффициенты интенсивности отказов.

Эксплуатационные (поправочные) коэффициенты показывают, во сколько раз изменяется интенсивность отказов элемента при изменении каждого из воздействующих факторов по сравнению с теми значениями, которые эти элементы имели при номинальных режимах. На интенсивность отказов элемента влияют механические факторы (вибрации, ударные нагрузки), климатические условия (температура, влажность), пониженное давление (высотность), радиоактивное излучение, воздействия морской воды и др.

Режимы работы электрорадиоэлементов учитываются коэффициентом α, который выбирают в зависимости от электрической нагрузки и рабочей температуры:

$$K_{\text{н}} = H/H_{\text{н}}, \qquad (8.13)$$

где H — нагрузка на элемент в рабочем режиме; $H_{\text{н}}$ — номинальная нагрузка, предусмотренная техническими условиями.

При этом критерием степени нагрузки надо считать ту электрическую величину, которая оказывает решающее влияние на работоспособность данного элемента.

Для конденсаторов берется отношение рабочего напряжения к номинальному, для полупроводниковых триодов — отношение рабочего тока эмиттера (коллектора) к номинальному.

Использование элементов в облегченном (разгруженном) режиме уменьшает общую интенсивность отказов.

При разгруженном режиме первый период работы несколько удлиняется, так как производственные дефекты элементов проявляются медленнее, но третий период, связанный со старением элементов, наступает значительно позже.

Значения коэффициентов $K_{\text{н}}$ и α приводятся в технической литературе [27].

В зависимости от стадии разработки изделия и полноты учета факторов, влияющих на показатели надежности, различают предварительную и окончательную оценки надежности.

Предварительную оценку выполняют на этапе эскизного проектирования, когда анализируются различные варианты схемы; окончательный расчет — после испытания макета или опытного образца.

Пример 8.1. Произвести предварительную оценку надежности самолетного вычислителя, определив интенсивность отказов $\lambda_с$ среднюю наработку до отказа $t_{ср}$ и вероятность безотказной работы $P(t)$ в течение $t=20$ ч.

Таблица 8.1

№ п/п	Наименование элемента	Число элементов n_j	Интенсивность отказов элементов			Режимы работы элементов		Поправочный коэффициент	$\lambda_j\alpha_j n_j 10^{-6}$, 1/ч
			$\lambda_{jн}\cdot 10^{-6}$, 1/ч	$\lambda_j\cdot 10^{-6}$, 1/ч	$n_j\lambda_j\cdot 10^{-6}$, 1/ч	$K_н$	t, °С	α_j	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Интегральная микросхема	200	0,02	0,0446	8,92	0,8	60	1	8,92
2	Транзистор низкочастотный	4	4	8,910	35,64	0,8	60	0,85	30,29
3	Транзистор высокочастотный	6	1,7	3,787	22,72	0,7	50	0,65	14,77
4	Диод германиевый	8	4,5	10,02	80,16	0,6	60	1,40	112,22
5	Конденсатор электролитический	15	2,4	5,346	80,19	0,5	40	0,64	51,32
6	Резистор МЛТ-0,5	6	0,5	1,114	6,68	0,4	40	0,51	3,41
7	Дроссель	1	1,0	2,23	2,23	0,6	70	2,0	4,46
8	Трансформатор	1	0,5	1,114	1,11	0,5	70	0,6	0,67
9	Соединитель 50-контактный	3	0,5	1,114	3,34	1,0	50	1,0	3,34
10	Стабилизатор напряжения	2	1	2,23	4,46	0,8	50	1,0	4,46
11	Предохранитель	3	0,5	1,114	3,34	1,0	40	1,0	3,34
12	Соединения пайкой	3000	0,01	0,023	69,00	—	50	1,0	69,00
									$\Sigma=306{,}2\cdot 10^{-6}$

Известны условия эксплуатации: температура окружающей среды до +40°С, относительная влажность 65%, высота над уровнем моря до 20 км [27].

Решение. В табл. 8.1 приведен состав элементов, их количество, режимы работы и интенсивность отказов элементов в номинальных режимах $\lambda_н$.

Интенсивность отказов элементов с учетом условий эксплуатации можно определить по формуле

$$\lambda_j = K_1 K_2 K_3 \lambda_{jн}, \qquad (8.14)$$

где $K_1=1{,}65$ — коэффициент, учитывающий вибрации и ударные нагрузки; $K_2=1$ — коэффициент, учитывающий климатические условия; $K_3=1{,}35$ — коэффициент, учитывающий пониженное атмосферное давление (высотность).

Подставив в формулу (8.14) значения коэффициентов K_1, K_2, K_3, получим

$$\lambda_j = 1{,}65 \cdot 1 \cdot 1{,}35 \lambda_{j\text{н}} = 2{,}23 \lambda_{j\text{н}}.$$

Значение λ_j для каждого элемента приведены в графе 5 табл. 8.1, а для всех элементов данного типа — в графе 6; режимы работы элементов — в графах 7 и 8, на основании которых найден поправочный коэффициент α.

Интенсивность отказов самолетного вычислителя определим по формуле

$$\lambda_c = \sum_{n=1}^{12} \lambda_j \alpha_j n_l = 306{,}2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

Средняя наработка до отказа

$$t_{cp} = 10^6/306{,}2 = 3267 \text{ ч}.$$

Вероятность безотказной работы в течение 20 ч

$$P(t) = e^{-306{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot 20} \approx 1 - 306{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \approx 0{,}99387.$$

8.4. Надежность технологического процесса

Под *надежностью технологического процесса* понимается надежность технологической системы, предназначенной для выполнения данного технологического процесса (ТП).

Технологическая система. *Технологическая система* (ТС) — совокупность взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных ТП или операций. Она является частью производственной системы и делится на четыре уровня: ТС операций, ТС процессов, ТС производственных подразделений; ТС предприятий.

Технологическая система операции обеспечивает выполнение одной заданной технологической операции, а ТС процесса включает в себя в качестве подсистем совокупность технологических систем операций, относящихся к одному методу обработки, сборки, контроля или к одному наименованию изготовляемой продукции.

Технологическая система производственного подразделения состоит из ТС процессов и операций, функционирующих в рамках данного подразделения, а ТС предприятия — из ТС его производственных подразделений.

Классификация любых ТС производится по виду (последовательная, параллельная), по уровню автоматизации и по уровню специализации. ТС, выполняющая групповой технологический процесс, является универсальной.

Элементом ТС является ее часть, условно принимаемая неделимой на данной стадии анализа (например, приспособление, инструмент). Под *отказом технологической системы* понимается переход ее из работоспособного состояния в неработоспособное.

Работоспособным является такое состояние ТС, при котором значения параметров или показателей качества изготовляемой продукции, производительности, материальных и стоимостных затрат на изготовление продукции соответствуют требованиям, установленным в нормативно-технической, конструкторской и технологической документациях.

Неработоспособным является такое состояние ТС, при котором значение хотя бы одного параметра или показателя качества изготовляемой продукции не соответствует установленным требованиям.

Отказы ТС различают по характеру нарушения работоспособности (функциональные и параметрические отказы), по наличию связи с другими объектами и по параметрам качества.

Функциональный отказ ТС проявляется в полном или частичном прекращении ее функционирования. Примером частичного прекращения функционирования может служить поломка одного из инструментов при обработке деталей.

Параметрический отказ ТС выражается в выходе параметров функционирования отдельных ее элементов за допустимые пределы, например выход размеров за пределы допуска.

Уровень и вид ТС являются определяющими признаками для выбора критериев отказа и предельных состояний показателей надежности и методов оценки.

Методы оценки надежности. Оценка надежности ТС производится на стадиях проектирования и изготовления (разрабатываемые ТС), а также на стадии эксплуатации (действующие ТС). Для оценки показателей надежности по параметрам качества изготовляемой продукции в зависимости от вида ТС, целей оценки и наличия исходной информации следует использовать расчетные, опытно-статистические, регистрационные и экспертные методы или их сочетания.

Расчетные методы основаны на использовании математических моделей изменения параметров качества или производительности ТС и ее элементов. Математические модели надежности должны подтверждаться путем анализа опытных данных, например, полученных при изготовлении опытной партии изделий.

Опытно-статистические (измерительные) методы основаны на использовании данных измерений параметров качества изготовляемой продукции, полученных в результате выборочного обследования ТС и ее элементов (ГОСТ 27.503—81).

Регистрационные методы основаны на анализе информации, регистрируемой в процессе управления предприятием (результаты контроля точности технологических процессов, число принятых партий, дефектов и т. п.).

Экспертные методы следует применять при невозможности или нецелесообразности использования расчетных, опытно-статистических или регистрационных.

Методы оценки надежности ТС выбирают исходя из критериев отказов, по параметрам качества продукции, производительности и затрачиваемых ресурсов.

Оценка надежности ТС по параметрам качества продукции. При оценке надежности ТС по параметрам качества продукции используют показатели точности (технологического процесса и средств оснащения), технологической дисциплины, выполнения заданий по качеству продукции и комплексные показатели.

Оценка надежности по параметрам точности. Основными показателями точности ТС являются коэффициенты точности, мгновенного рассеяния, смещения, запаса точности.

Коэффициент точности

$$K_т = \omega/\delta, \qquad (8.15)$$

где ω — поле рассеяния или разность максимального или минимального значений контролируемого параметра за установленную наработку ТС; δ — допуск на контролируемый параметр.

При контроле должно выполняться условие $K_т = K_{т0} < 1$, где $K_{т0}$ — нормативное (предельное), технически обоснованное значение $K_т$.

Коэффициент мгновенного рассеяния (по контролируемому параметру)

$$K_р(t) = \omega(t)/\delta, \qquad (8.16)$$

где $\omega(t)$ — поле рассеяния контролируемого параметра в момент времени t.

Коэффициент смещения (контролируемого параметра)

$$K_с = \bar{\Delta}(t)/\delta, \qquad (8.17)$$

где

$$\bar{\Delta}(t) = |\bar{x}(t) - x_0| \qquad (8.18)$$

— среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска в момент времени t; $\bar{x}(t)$ — среднее значение контролируемого параметра; x_0 — значение параметра, соответствующее середине поля допуска (при симметричном поле допуска значение x_0 совпадает с номинальным значением параметра).

Коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру)

$$K_з(t) = 0{,}5 - K_с(t) - 0{,}5K_р(t). \qquad (8.19)$$

При контроле должно выполняться условие $K_з(t) > 0$.

Оценка надежности по параметрам технологической дисциплины. Основой технологической дисциплины являются выполнение требований технологической, конструктор-

ской, организационно-технической документации, укомплектование рабочих мест требуемой по документации технологической оснасткой, оборудованием, приспособлениями, инструментами и их качество.

Установлены следующие виды контроля за соблюдением технологической дисциплины: повседневный, периодический, летучий, специальный.

Повседневный контроль проводится контролером отдела технического контроля (ОТК), мастером и технологом в процессе изготовления изделия; *периодический* контроль — цеховой (заводской) комиссией в определенные графиком проверки сроки; *летучий* контроль осуществляют работники ОТК и отдела главного технолога; *специальный* контроль проводит специально назначенная комиссия при выявлении значительного брака или получении рекламаций от потребителя.

В число объектов контроля технологической дисциплины включают технологические процессы, с выполнением которых связано появление брака, дефектов или возврата продукции, а также технологические процессы изготовления особо ответственной продукции. Основными показателями надежности ТС по параметрам технологической дисциплины являются средние значения соответствующих показателей технологической дисциплины за установленную наработку.

Оценка выполнения заданий по параметрам качества продукции. Эту оценку проводят с целью определения вероятности того, что ТС обеспечит изготовление продукции в соответствии с требованиями нормативно-технической документации (НТД).

Комплексные показатели оценки надежности по параметрам качества продукции. Такими показателями являются коэффициенты дефектности, возврата и брака продукции. *Коэффициент дефектности* для ТС технологического процесса представляет собой среднее значение дефектной продукции, изготовленной за рассматриваемый календарный период времени. Значение коэффициента дефектности не должно превышать нормативного (технико-экономически обоснованного) значения.

Показателями надежности ТС по критерию возвратов продукции являются коэффициент возвратов, процент сдачи продукции с первого предъявления, вероятность соблюдения нормативов по возвратам продукции и сдачи ее с первого предъявления.

Коэффициент возвратов для ТС представляет собой отношение объема продукции, имеющей устранимые дефекты и возвращенной на доработку с последующих технологических процессов, к объему всей продукции, изготовленной за рассматриваемый календарный промежуток времени.

Процент сдачи продукции с первого предъявления для ТС технологического процесса представляет собой среднее значение про-

цента сдачи с первого предъявления продукции, изготовленной за установленную наработку.

Коэффициент брака для ТС представляет собой отношение объема продукции, имеющей неустранимые критические дефекты, к объему всей продукции, изготовленной за установленную наработку. Значение этого показателя не должно превышать нормативного.

Оценка надежности ТС по параметрам производительности. При оценке надежности ТС по параметрам производительности используют две группы показателей: единичные и комплексные.

Единичные показатели. Единичными показателями являются вероятность безотказной работы, средняя наработка на отказ (гамма-процентная наработка до отказа, назначенная наработка до подналадки), среднее время восстановления работоспособного состояния.

В соответствии с ГОСТ 27.204—83 оценку единичных показателей надежности следует проводить для ТС, отказы которых связаны с безопасностью людей или могут причинять значительный материальный ущерб, для операций, лимитирующих уровень выполнения задания по производительности, и для типовых технологических операций и процессов с поточной и групповой организацией производства.

Комплексные показатели. К ним относятся вероятность выполнения заданий по изготовлению продукции, коэффициент технического использования ТС и др. *Вероятность выполнения ТС задания по объему выпуска продукции* i-го наименования $P_{зi}(t)$ определяют по формуле

$$P_{зi}(t)=P\{V_i(t)\geqslant V_{0i}\}, \qquad (8.20)$$

где $V_i(t)$ и V_{0i} — соответственно фактический и заданный объемы выпуска продукции i-го наименования (требуемого качества) за рассматриваемый интервал времени t.

Вероятность выполнения задания по нормативно-чистой продукции (НЧП) $P_{знчп}$ определяют по формуле

$$P_{знчп}=P\{V_{нчп}(t)\geqslant V_{знчп}\}, \qquad (8.21)$$

где $V_{нчп}(t)$ и $V_{знчп}$ — соответственно фактический и заданный объемы НЧП за рассматриваемый интервал времени.

Задание по изготовлению продукции устанавливают в натуральном выражении по одному или нескольким наименованиям продукции или в НЧП. Под НЧП понимают часть ее оптовой цены, включающей заработную плату исполнителей, отчисления на социальное страхование и прибыль.

Коэффициент технического использования ТС характеризует относительную долю времени нахождения ТС в работоспособном

состоянии за рассматриваемый интервал времени с учетом всех видов простоев.

Полная номенклатура комплексных показателей надежности ТС и методы их оценки приведены в ГОСТ 27.204—83. Оценку комплексных показателей надежности следует производить для таких ТС: технологических процессов с поточной и групповой организацией производства; производственных подразделений основного производства и предприятия в целом.

Оценка надежности по параметрам затрачиваемых ресурсов. В этом случае методы оценки надежности выбирают исходя из следующих критериев отказа: превышения установленных нормативов по трудоемкости и стоимости изготовления продукции из-за неудовлетворительного состояния ТС; превышения установленных норм расхода материалов, инструмента и др.; превышения лимита численности рабочих и служащих, занятых для изготовления продукции.

8.5. Пути повышения надежности электронных устройств

Надежность электронных устройств закладывается на этапе конструирования, обеспечивается на этапе производства и поддерживается при эксплуатации. Конструирование является наиболее ответственным и определяющим этапом для обеспечения надежности. На этом этапе формируются принципиальные основы надежности объекта. Улучшить показатели надежности, заложенные в конструкции, на этапе производства и эксплуатации нельзя.

Высокий уровень надежности при проектировании может быть обеспечен за счет рационального выбора схемы и комплектующих элементов, резервирования по нагрузке и элементам, применения встроенных автоматизированных систем контроля и прогнозирования отказов. Рациональной будет наиболее простая схема, причем она должна содержать возможно меньшее число элементов, исключать появление отказов с опасными последствиями и использовать комплектующие элементы с широкими допусками. Выбор надежной схемы подразумевает использование наиболее надежной типовой схемы из ряда известных или аналогичных по назначению.

Важным фактором повышения надежности электронных устройств является микроминиатюризация. Интегральные микросхемы имеют интенсивность отказов на два-три порядка ниже, чем дискретные полупроводниковые приборы. Конструкции, созданные на интегральных схемах, имеют меньшее количество внешних соединений, которые являются основной причиной отказов.

При выбранной схеме надежность ЭВМ и отдельных ее узлов зависит от правильного выбора электроэлементов и режимов их работы. Условия применения электроэлементов оговариваются

техническими условиями. Необходимо применять стандартные элементы, так как они лучше отработаны, имеют более совершенную технологию изготовления и более высокую надежность. Большинство деталей и элементов должны работать в облегченных режимах. Особое внимание следует уделять облегчению режимов работы наиболее трудно заменяемых при эксплуатации элементов и деталей. Резервирование по нагрузке повышает надежность схемы в 4—5 раз и более.

Защита от температурных воздействий достигается применением теплоотводов. Элементы, выделяющие большое количество теплоты, помещают вблизи теплообменника (если он применяется), а элементы, чувствительные к повышенным температурам, располагают возможно дальше от сильно нагревающихся деталей.

Повышения надежности можно также добиться термостатированием, ослаблением ударных нагрузок с помощью амортизации, уменьшением влияния влажности при транспортировке, хранении и эксплуатации. Механические нагрузки могут изменять взаимное расположение электроэлементов, что приводит к замыканию и обрывам выводов в местах пайки. Уменьшение количества паяных и сварных соединений повышает вибропрочность конструкции.

Резервированием называется метод повышения надежности, при котором функции отказавшего изделия выполняют другие, специально предусмотренные для этого изделия. Принципиальное отличие резервирования от остальных методов повышения надежности состоит в том, что оно позволяет повысить надежность аппаратуры по сравнению с надежностью элементов. При этом общая надежность аппаратуры может быть выше надежности элементов. Путем резервирования можно создать надежную аппаратуру даже из относительно ненадежных элементов.

По отношению к системе различают общее и раздельное резервирование, а по способу включения резерва — постоянное и заменяющее. При общем резервировании производится резервирование объекта в целом, а при раздельном — отдельных элементов объекта или их группы. При постоянном резервировании всегда включен резерв, который находится в рабочем состоянии, а при замещающем способе резерв включается автоматически или вручную после отказа основного устройства. Недостаток постоянного включения резерва заключается в том, что при выходе из строя одного из элементов изменяются режимы резервируемого узла и остальных параллельно включенных элементов. Включение резерва методом замещения требует определенного промежутка времени после подачи соответствующего сигнала. Для сокращения этого времени заменяющий резерв может находиться в полурабочем (полуразогретом) состоянии.

При всех методах резервирования усложняется конструкция, увеличиваются габаритные размеры и масса. Поэтому резервирование следует применять только в тех случаях, когда не имеет-

ся возможности обеспечить требуемую надежность системы другими средствами.

При конструировании необходимо также обеспечить ремонтопригодность конструкции, что связано с рациональной компоновкой. Последняя должна обеспечивать свободный доступ ко всем блокам и элементам, а также ко всем контрольным точкам конструкции. В сложной аппаратуре предусматриваются устройства, автоматизирующие процесс нахождения неисправностей.

Процесс производства имеет решающее значение для обеспечения надежности изделия. В процессе производства на надежность влияют качество поставляемых микросхем, электроэлементов и материалов; эффективность принятой системы их контроля; степень автоматизации и механизации технологического процесса; наличие технологических операций, предупреждающих появление брака, а также операций, выявляющих скрытый брак предыдущих операций. Он возникает при нарушении режимов технологического процесса и не может быть выявлен прямыми методами контроля. Для выявления скрытого брака используют входной контроль, технологическую электротермотренировку и др.

Надежность исходных элементов и материалов заключается в том, что их параметры должны сохранять требуемую величину в течение всего срока службы. Большой процент отказов по вине исходных элементов и материалов является следствием недостаточно четкой организации входного контроля.

Поступающие на завод-потребитель электроэлементы могут иметь недостаточную эксплуатационную надежность вследствие некачественного изготовления или продолжительного хранения. Элементы первой группы являются причиной внезапных отказов, которые выявляются в начальный период работы аппаратуры. Элементы, имевшие продолжительный срок хранения, вызывают постепенные (параметрические) отказы. Возникновение параметрических отказов связано с постепенным изменением одного или нескольких параметров. Выбор оптимального метода контроля зависит главным образом от количества элементов, стоимости контроля и затрат на исправление брака, вызванного некачественными элементами.

Экономическая целесообразность сплошного контроля определяется выражением

$$mM_2 \geqslant NM_1, \qquad (8.22)$$

где m — количество дефектных деталей; M_2 — стоимость ремонта изделия, связанного с заменой дефектной детали; N — общее количество деталей в проверяемой партии; M_1 — стоимость проверки одной детали.

Испытание готовых изделий под нагрузкой с целью отбраковки потенциально ненадежных изделий называется *технологической тренировкой*. Большое значение имеет *выбор режимов технологи-*

ческой тренировки, под которыми понимаются виды, степень, последовательность воздействий и режимы работы аппаратуры, обеспечивающие выявление максимального количества скрытых производственных дефектов аппаратуры и комплектующих элементов. В состав программы тренировки необходимо включать наиболее экономичные и эффективные виды испытаний, предусматривающие включенное состояние аппаратуры. Наиболее часто используют механические воздействия (вибрацию, удар) и воздействия повышенных и пониженных температур. Режимы технологической тренировки выбирают из допустимых по техническим условиям воздействий, наиболее опасных для данных изделий. Наибольший интерес при отбраковке интегральных схем представляют собой электрическая и термическая нагрузки, которые могут применяться в отдельности или совместно. В ряде случаев в состав тренировки включают один вид механических воздействий (обычно вибрацию).

Оптимальная программа тренировки должна обеспечить минимальное для данных условий время приработки.

Тренировке целесообразно подвергать изделия и отдельные элементы схемы, имеющие ярко выраженный период приработки. При малой продолжительности периода приработки любая кратковременная тренировка является эффективным методом повышения надежности. По мере возрастания продолжительности периода приработки ее эффективность зависит от времени проведения процесса. Идеальным временем с точки зрения эффективности является время, равное периоду приработки.

Надежность изделия определяется надежностью отдельных технологических процессов и их количеством.

В результате анализа установлено, что 25% отказов электронных устройств происходит от некачественной пайки. Причинами этого являются плохая зачистка мест пайки, отсутствие контроля режимов, движение (смещение) соединяемых деталей в период охлаждения припоя, неправильный выбор паяльника по мощности, применение материалов низкого качества.

Конструктор, ориентируясь на тот или иной технологический процесс, должен знать возможный уровень его надежности. Менее надежными являются неавтоматизированные процессы, где большинство режимов определяется оператором, а последствия их нарушения выявляются через значительное время. Например, при выполнении пропиточных работ возможны отклонения в степени вакуума, давления, температуры, времени и др. Если в результате недостаточной температуры сушки в обмотке остается влага, то вследствие последующей коррозии может произойти обрыв провода. Такой недостаток не может быть обнаружен непосредственно после выполнения технологического процесса.

Неполная полимеризация при прессовании изделий из пластических масс может вызвать повышенную влагопроницаемость из-

делия. Этот дефект является результатом недостаточной температуры при прессовании и малого времени выдержки.

Чтобы исключить появление скрытого брака, необходимо обеспечить строгое выполнение режимов технологического процесса. Необходимо автоматизировать в первую очередь те технологические процессы, результаты которых не могут быть выявлены непосредственно после их осуществления.

Наиболее надежными являются автоматизированные технологические процессы с обратной автоматической связью между параметрами обрабатываемого изделия и условиями его получения.

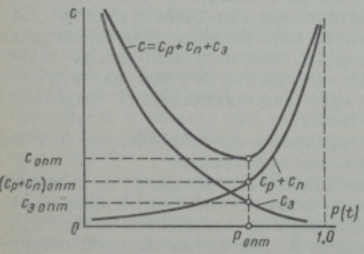


Рис. 8.3. Зависимость полной стоимости изделия C от вероятности безотказной работы $P(t)$

Надежность приемочного контроля определяется вероятностью того, что проверенное изделие соответствует техническим условиям. Повышение надежности только за счет контроля приводит к удорожанию изделия.

Надежность электронной аппаратуры зависит непосредственно от условий, в которых она работает. На основании статистических данных установлено, что 37% всех отказов происходит вследствие неправильной эксплуатации. Изменения параметров некоторых элементов могут неблагоприятно влиять на режимы работы других элементов и привести к выходу из строя всей аппаратуры. Такой отказ можно предупредить путем прогнозирования, в результате которого выявляется элемент с измененными параметрами.

Для получения информации о состоянии системы или элемента проводят измерения определяющего или выходного параметра или используют статистические данные предшествующего периода эксплуатации, а также специальных испытаний.

На основании паспортных данных или с помощью испытаний устанавливают допустимые значения параметров. Если параметры прогнозирования меняются закономерно, то во время профилактических работ можно сравнивать результаты измерений того или иного параметра с известным уровнем, при котором происходит отказ. Надежность системы повышается при наличии встроенных контрольно-измерительных приборов и индикаторных ламп. Они дают информацию, характеризующую состояние системы в ряде узловых точек.

Проведение мероприятий по повышению надежности требует дополнительных затрат. *Оптимальной надежностью* называется такая надежность, при которой затраты, связанные с разработкой, производством и эксплуатацией изделия, будут наименьшими. Полная стоимость изделия складывается из затрат на его разработку $C_р$, производство $C_п$ и эксплуатацию $C_э$:

$$C = C_р + C_п + C_э. \qquad (8.23)$$

На рис. 8.3 показана зависимость полной стоимости C от вероятности безотказной работы P. Оптимальной считается надежность $P_{опт}$, обеспечивающая наименьшую стоимость $C_{опт}$. Такой подход к определению оптимальной надежности возможен только для изделий, отказ которых не связан с катастрофическими последствиями.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МОНТАЖА ЭЛЕМЕНТОВ ЭВМ

ГЛАВА 9

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

9.1. Электроэрозионные методы обработки

Под *электрофизическими* и *электрохимическими методами размерной обработки* понимают совокупность различных воздействий (электрических, электрохимических и др.) на обрабатываемую деталь для придания ей заданной формы и размеров. Эти методы можно разделить на четыре группы: электроэрозионные, лучевые, ультразвуковые и электрохимические. К новым электрофизическим методам относятся плазменная обработка, формование в магнитном поле и др.

Электрофизические и электрохимические методы обработки позволяют решать важные задачи, связанные с производством современных вычислительных машин. Особенно большое значение они имеют для изготовления изделий из материалов высокой твердости, обработка которых обычными методами невозможна или крайне затруднительна. К таким материалам относятся ферриты, германий, кремний, алмазы, рубины, кварц, твердые сплавы, керамика и др.

Основным преимуществом электрофизических и электрохимических методов обработки по сравнению с методами механической обработки является возможность копирования формы инструмента сразу по всей поверхности при простом поступательном перемещении инструмента, вследствие чего процесс обработки легко автоматизируется. Это дает возможность применить многостаночное обслуживание. Для всех методов обработки (кроме ультразвуковых) производительность не зависит от твердости и вязкости обрабатываемого материала и обработка осуществляется практически без силового воздействия на обрабатываемое изделие.

Электроэрозионные методы обработки применяют для всех токопроводящих материалов. Эти методы основаны на явлении электрической эрозии, т. е. разрушении поверхности электродов электрическим разрядом, проходящим между ними. Разрушение материала происходит путем его оплавления с последующим

выбросом из рабочей зоны в виде парожидкостной смеси. Основными методами электроэрозионной обработки являются электроискровая и анодно-механическая. Для этих методов характерны наличие жидкой диэлектрической среды между электродами и подача энергии в форме импульсов. Жидкая среда повышает эффективность разрушения металла и является средством эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки.

Электроэрозионные методы различают в зависимости от формы и параметров импульсов тока и напряжения, а также метода генерирования импульсов. Импульсы тока и напряжения могут иметь униполярную, знакопеременную и другие формы. Основными параметрами импульсов являются их длительность $t_и$ и скважность q. По *длительности* импульсы делят на короткие ($t_и < 10^{-4}$ с), средние ($t_и = 10^{-4} ... 10^{-2}$ с) и длинные ($t_и > 10^{-3}$ с).

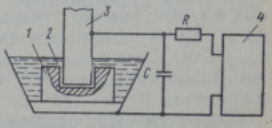


Рис. 9.1. Схема установки для электроискровой обработки

Скважностью импульса q называют отношение периода импульса T к его длительности $t_и$:

$$q = T/t_и.$$

Метод электроискровой обработки. Метод, предложенный Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко, основан на использовании импульсных искровых разрядов малой длительности (до нескольких сотен микросекунд) и большой скважности ($q > 8$). Обработка может осуществляться методом копирования формы электрода инструмента и непрофилированным электродом. Обработка методом копирования производится при поступательном движении одного из электродов и неподвижно закрепленном втором электроде, при этом форма электрода-инструмента копируется деталью (рис. 9.1).

Обрабатываемая деталь *1* и инструмент *3* включаются в цепь электрического колебательного контура, работающего в области искрового разряда. Схема имеет два контура: зарядный и разрядный. *Зарядный контур* состоит из сопротивления R, конденсатора C и проводящих проводов; *разрядный контур* — из конденсатора, проводящих проводов и рабочих электродов: изделия *1* (анод) и инструмента *3* (катод). Изделие помещается в ванну с рабочей жидкостью *2* (керосин, трансформаторное масло и др.). Сила тока регулируется сопротивлением R. Конденсатор C заряжается от источника постоянного тока *4*. Напряжение на электродах при этом увеличивается, так как они подключены параллельно конденсатору. При напряжении, равном величине пробоя, происходит разряд конденсатора через межэлектродный промежу-

ток и энергия, накопленная конденсатором, мгновенно выделяется в процессе разряда.

Искровой разряд протекает в миллионные доли секунды и практически не нагревает обрабатываемое изделие. Так как место приложения импульсов строго определено, то обработку можно производить в намеченном месте.

При прохождении искрового разряда в жидкости возникают гидравлические явления и газообразования, создающие взрывной эффект, который способствует удалению из межэлектродного промежутка разрушенного разрядом металла. Источником питания служат обычно генераторы постоянного тока напряжением 30 ... 220 В, создающие силу тока зарядного контура в пределах 1 ... 5 А. Сила тока в разрядном контуре достигает 100 А и выше. Время зарядки лежит в пределах 10^{-3} с, а время разрядки — в пределах 10^{-5} ... 10^{-8} с.

Основная часть энергии, получаемой при разрядке конденсаторов, выделяется в виде теплоты (температура доходит до 11 000°С). При этом теплота расходуется на испарение и плавление металла и лишь небольшая ее часть поглощается электродами.

Последовательное действие разрядов, вызывающих электрическую эрозию, приводит к образованию в изделии выемки, представляющей собой как бы отпечаток электрода инструмента. Во время работы разрядного контура вследствие эрозионного разрушения металла зазор между электродами постоянно увеличивается. В какой-то момент времени зазор возрастает настолько, что разряд не возникает и съем металла прекращается. Для обеспечения непрерывности процесса станки для электроискровой обработки снабжаются регуляторами, автоматически меняющими положение одного из электродов и регулирующими подачу.

Производительность процесса электроискровой обработки зависит от частоты, с которой будут следовать разряды, и от количества металла, выбрасываемого при каждом разряде.

Большое влияние на производительность оказывает материал электрода. Основным требованиям, предъявляемым к материалу, является высокая эрозионная устойчивость. Этим требованиям лучше всего отвечают латунь ЛС59-1, красная медь и медно-угольная композиция. Форма электрода подобна форме прошиваемого отверстия, но размеры его меньше размеров отверстия.

Метод электроискровой обработки непрофилированным (проволочным) электродом (рис. 9.2). Электрод-проволока *2* диаметром 0,02 ... 0,5 мм перематывается при определенном натяжении с подающей катушки *1* на приемную *5*, прорезая (в результате электроэрозионного процесса) помещенную на ее пути обрабатываемую деталь *3*. Направляя движение детали в двух взаимно перпендикулярных направлениях, можно вырезать любой заданный контур. Траектория обрабатывающего электрода-проволоки

относительно детали задается копиром, имеющим соответствующие размеры. Для улучшения условий удаления продуктов эрозии проволока натянута в вертикальном направлении. В заготовке предусматривается технологическое отверстие *4*.

В качестве материала проволоки применяют медь, а при диаметре менее 0,05 мм — вольфрам, так как прочность медной проволоки в этом случае недостаточна. Диаметр проволоки определяется требуемой шириной реза, значение которого складывается из диаметра проволоки и удвоенного значения зазора, который берется от 0,075 до 0,015 мм на сторону. В качестве рабочей жидкости применяют чистый керосин.

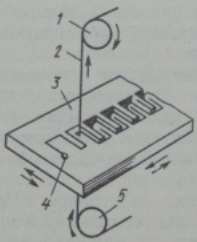


Рис. 9.2. Обработка непрофилированным электродом (проволокой)

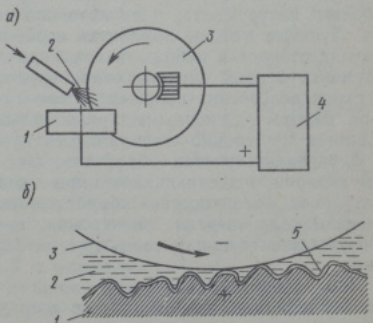


Рис. 9.3. Анодно-механическая обработка: *а* — схема анодно-механической резки; *б* — принципиальная схема

Основное достоинство такого способа — возможность полной автоматизации процесса на станках с ЧПУ.

Анодно-механическая обработка (рис. 9.3). Этот метод предложен В. Н. Гусевым в 1943 г. Он основан на использовании комбинированного процесса анодного растворения и эрозионного воздействия на обрабатываемую деталь. При грубых режимах доминирует электроэрозионный процесс, за счет которого и осуществляется съем металла.

Обрабатываемая деталь *1* включается в цепь постоянного тока в качестве анода, а рабочий инструмент *3* (диск, лента, проволока) — в качестве катода. Источником питания является генератор постоянного тока *4*. Межэлектродное пространство заполняют рабочей жидкостью *2* (обычно водным раствором жидкого стекла). Под действием постоянного напряжения (22 ... 26 В) на поверхности детали образуется силикатная пленка *5*, имеющая

повышенное электрическое сопротивление и исключающая замыкание электродов. Снятие пленки движущимися инструментами вызывает электротермическую эрозию обрабатываемого материала.

Наиболее целесообразно анодно-механическую обработку применять для разрезания твердых материалов, для наружного и внутреннего шлифования и заточки режущего инструмента из твердых сплавов.

9.2. Лучевые методы обработки

Особенностью лучевых методов обработки является отсутствие рабочего инструмента, роль которого выполняет непосредственно луч. Лучевые методы обработки особенно целесообразны для получения отверстий небольших размеров, так как изготовление инструмента в этих случаях очень трудоемко. Он быстро выходит из строя вследствие поломки, а при точных размерах изделия — из-за износа. Основными разновидностями лучевой обработки являются электронно-лучевая и светолучевая.

Электронно-лучевая обработка. Она основана на использовании теплоты, выделяющейся при резком торможении потока электронов поверхностью обрабатываемого изделия. При этом кинетическая энергия электронов преобразуется в тепловую и только незначительная часть (0,1 ... 3%) — в рентгеновское излучение.

Чем выше кинетическая энергия потока электронов и чем меньше площадь, на которой она сосредоточена, тем быстрее происходит нагрев.

В качестве источника свободных электронов (термокатода) используют металлическую проволоку (вольфрам, тантал и др.), нагретую до высокой температуры в глубоком вакууме.

В этих условиях электроны не испытывают столкновений с молекулами воздуха и друг с другом. При этом вся энергия, получаемая отдельными электронами, затрачивается на придание электрону определенной скорости. Количество электронов, испускаемых термокатодом, зависит от температуры нагрева и его материала.

Электроны сжимаются и формируются в узкий луч с высокой концентрацией энергии при помощи магнитных линз, представляющих собой катушки специальной формы.

Частоту и длительность импульсов подбирают таким образом, чтобы материал находился под воздействием электронного луча в течение очень малого промежутка времени. В этом случае луч будет расплавлять материал в ограниченной зоне, не вызывая резкого повышения температуры обрабатываемого материала в близко расположенной области.

Толщина слоя вещества, в котором электрон полностью теряет

свою скорость, называется *пробегом электрона*. Глубина проникновения электрона зависит от значения ускоряющего напряжения.

Проникающий в материал электрон теряет энергию не сразу, а в процессе многочисленных соударений с решеткой, в результате этих столкновений меняются скорости и направление движения электронов. Потеря энергии электронами максимальна на некотором расстоянии от поверхности материала. Наиболее интенсивное выделение теплоты наблюдается на глубине пробега электрона.

На рис. 9.4 показана схема установки для обработки и сварки с помощью электронного луча. Источником электронов является катод *1*, помещенный в формирующий электрод *2*. При нагреве катода с его поверхности излучаются электроны, которые под воздействием электрического поля, создаваемого высокой разностью потенциалов между анодом *3* и катодом, приобретают высокую скорость и направляются в фокусирующую катушку *4*. С помощью отклоняющей катушки *5* луч можно перемещать по поверхности детали *6*, установленной на столе *7*. Оптическая система наблюдения состоит из зеркала *8* и микроскопа *9*.



Рис. 9.4. Схема установки для обработки электронным лучом

Если система, отклоняющая луч, не работает, а изделие стоит неподвижно, то луч выполняет роль сверла.

Обработка осуществляется лучом малого диаметра (1 ... 10 мкм) при плотности энергии 10^7 ... 10^9 Вт/см^2. Длительность импульса составляет 10^{-2} ... 10^{-5} с. Электронный луч оказывает очень небольшое давление ($\sim$1 Па) на поверхность, а температура в месте воздействия луча достигает 8000°С. При этом металл мгновенно испаряется.

Электронно-лучевая обработка применима для всех материалов (металлов, ферритов, стекла, алмазов, графитов и др.). Благодаря малому времени воздействия теплоты термическое влияние на периферийные области незначительно. Недостатком метода является сложность установки из-за необходимости иметь вакуумную камеру.

Светолучевая обработка. Она основана на применении лазера, представляющего собой квантовый генератор (усилитель) когерентного излучения оптического диапазона. Слово «лазер» составлено из начальных букв английского словосочетания «усиление света вынужденным излучением». Он способен давать весьма узкие направленные пучки монохроматического и когерентного излучений, характеризующиеся очень высокой плотностью тепло-

вой энергии. Температура в зоне действия луча доходит до 8000°С.

Наиболее важным свойством лазерного излучения, используемого для технологических целей, является когерентность. При когерентном излучении волновые лучи, которыми называют несколько волн, идущих друг за другом, распространяются в одном направлении, имеют одинаковую длину волны и находятся в фазе друг с другом. Высокая степень когерентности проявляется также в малой расходимости лазерного луча. Когерентный лазерный луч может быть сфокусирован в пятно диаметром порядка длины световой волны (1... 10 мкм). Используя фокусировку, можно повысить интенсивность лазерного излучения.

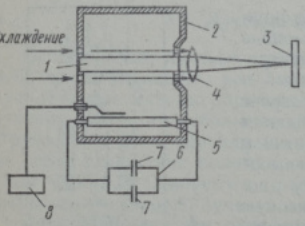


Рис. 9.5. Принципиальная схема оптического квантового генератора

В зависимости от рода активного материала различают лазеры на основе твердого тела (твердотельные), газовые и жидкостные.

В твердотельных лазерах в качестве активного элемента используют диэлектрики (рубин, стекло с добавками неодима, алюминоиттриевый гранат и др.) или полупроводники (например, арсенид галлия). Лазеры, построенные на диэлектриках, имеют малый энергетический КПД (0,01...0,1%), а лазеры на полупроводниках — 1...4%.

В газовых лазерах в качестве активного вещества используют смесь газов или один газ. Газовые лазеры (на азоте, оксиде углерода) могут использоваться для размерного испарения материалов (например, в технологии подгонки тонкопленочных резисторов интегральных схем). Их основное преимущество — непрерывное излучение, что улучшает качество обработки по сравнению с твердотельными импульсными лазерами. Недостатком газовых лазеров является малая выходная мощность.

В жидкостных лазерах в качестве активного вещества используют неорганические жидкости. Преимуществом жидкостного лазера является возможность циркуляции в нем жидкости для охлаждения. Это позволяет получать большие энергии и мощности излучения в импульсном и непрерывном режимах. При большом разнообразии конструкций у всех лазеров имеются общие функциональные элементы.

Лазер на основе синтетического рубина показан на рис. 9.5. Он представляет собой оксид алюминия, в котором некоторые из атомов алюминия заменены атомами хрома (до 0,05%), являющимися активными центрами.

Рубиновый стержень изготовляют из монокристалла, полученного выращиванием в плазменной индукционной печи. Диаметр стержня 2 ... 20 мм, длина 80 ... 200 мм.

Торцы рубина *1* отполированы и представляют собой зеркала. Один торец покрыт плотным непрозрачным слоем серебра, а другой (со стороны линзы *4*) имеет коэффициент пропускания около 8%. Линза *4* формирует испускаемое излучение и направляет его к обрабатываемому изделию *3*.

Непрозрачные и полупрозрачные покрытия могут изготовляться и из других теплостойких материалов с хорошей отражательной способностью. Шероховатость на плоских полированных торцах должна быть не более 0,1 длины волны желтой линии натрия, параллельность торцевых поверхностей 2″, а отклонение от угла 90° между торцевыми плоскостями и продольной осью стержня не более ±1′. Рубин *1* и импульсная лампа вспышки *5* устанавливаются в камере *2*. Внутренняя поверхность камеры отполирована и является отражателем света. Зарядный агрегат *6* состоит из батареи конденсаторов *7*. При помощи пускового устройства *8* происходит разряд конденсаторов и появляется вспышка света длительностью 10^{-3} с. Свет фокусируется на рубиновом стержне, в результате чего атомы хрома переходят на более высокий энергетический уровень (рис. 9.6).

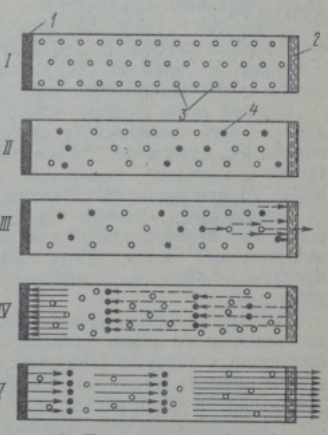


Рис. 9.6. Последовательность излучения оптическим квантовым генератором:
I — невозбужденное состояние атомов; *II* — возбужденное состояние атомов при включении накачки; *III* — возникновение спонтанного излучения; *IV*, *V* — генерация индуцированного излучения; *1*, *2* — зеркала; *3* — атом; *4* — возбужденный атом

Под воздействием фотона атом, находящийся на верхнем уровне (возбужденный атом), может перейти на прежний (нижний) уровень. При этом появится новый фотон (вторичный). Переход атома на прежний уровень может происходить и за счет релаксационных процессов, стремящихся возвратить систему в равновесное состояние. Такой переход называется самопроизвольным или спонтанным, который имеет случайный характер. Если большинство атомов окажется на верхнем уровне, то будут происходить процессы индуцированного (вынужденного) излучения.

Основной задачей при создании квантовых генераторов явля-

ется получение инверсного состояния, т. е. такого, когда число атомов на верхнем уровне превышает их число на нижнем уровне. Луч света, образовавшийся в результате возвращения атомов в исходное состояние, проходя вдоль оси рубина и многократно отражаясь, достигает большой интенсивности и проходит через полупрозрачный торец рубина.

Лазерную технологию широко используют при производстве электронных устройств, для получения отверстий малого размера в твердых материалах (ферритах, стекле и др.), сварки, термообработки, скрайбирования, маркировки и ряда других процессов.

Важной особенностью светолучевой сварки является малая длительность термического цикла, что обеспечивает возможность обработки материалов, особенно чувствительных к воздействию теплоты. Краткость импульсов предотвращает возможность получения крупнозернистой структуры и окисления металлов.

Возможность точной дозировки энергии делает этот метод особенно перспективным для сварки монтажных соединений в интегральных микросхемах. При этом возможна сварка через прозрачные оболочки, которые не являются препятствием для светового луча.

Сварка световым лучом имеет достаточно высокую производительность. Ее можно выполнять на воздухе, в атмосфере инертных газов и вакууме. При этом не требуется защиты обслуживающего персонала от рентгеновского облучения, вследствие чего оборудование значительно упрощается.

В производстве интегральных микросхем широко используют процесс скрайбирования, который заключается в нанесении на поверхность материала канавок, после чего материал легко раскалывается. Замена механического алмазного скрайбирования полупроводниковых пластин на лазерное скрайбирование или резку обеспечивает высокую производительность процесса и высокое качество выполнения операции.

Лазеры широко применяют при маркировке хрупких изделий малых размеров и для зачистки монтажных проводов. В последнем случае обеспечивается высокая чистота поверхности и не оказывается вредное влияние на металл токопроводящей жилы (не образуются «задиры» материала и др.).

Отечественная промышленность выпускает ряд лазерных установок для обработки материалов:

«Кристалл-6»— для сверления и фрезерования феррита, керамики, ситалла, рубина и др. Диаметр отверстий 0,1 ... 0,6 мм, глубина 3 мм. Ширина обрабатываемого паза 0,05 ... 0,2 мм, точность обработки по 7—8-му квалитетам;

«Квант-50»— для пайки интегральных микросхем на печатные платы, резки, сварки и термоупрочнения металлических деталей. Предусмотрена возможность использования устройств с программным управлением.

9.3. Обработка ультразвуком

Ультразвуковая обработка представляет собой ударно-абразивный метод обработки твердых и хрупких материалов. Она осуществляется (рис. 9.7) инструментом *1*, колеблющимся с ультразвуковой частотой 18...20 кГц. Под торец инструмента подается водная суспензия абразивного порошка. Зерна абразива *2*, «вбиваемые» инструментом в заготовку *3*, скалывают материал мелкими частицами, которые вместе с размельченным абразивом уносятся жидкостью. Если же инструмент ударяет по свободно висящему в жидкости зерну абразива, то выкалывания частиц материала изделия не происходит.

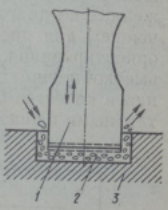


Рис. 9.7. Схема ультразвуковой обработки

Кавитационные явления сообщают зернам абразива скорости, в десятки раз меньшие, чем инструмент в момент удара по зернам, но кавитация усиливает циркуляцию суспензии, что способствует попаданию свежего абразива в зону обработки, а также удалению сколотых частиц и разрушенных зерен абразива.

Этим методом хорошо обрабатываются твердые и хрупкие материалы: керамика, кварц, рубин, алмаз, кремний, твердые сплавы и др. Для обработки твердых сплавов инструмент целесообразно изготовить из стали 45 с последующей закалкой до твердости HRC 48...56. При точной обработке применяют инструмент из незакаленной стали, так как при закалке может произойти его деформация. Шаржирование поверхности инструмента абразивными зернами не влияет на обработку.

Максимальная скорость съема материала по обработке стекла составляет 9000 мм³/мин, а по твердому сплаву — 200 м³/мин.

Вязкие материалы (например, сталь незакаленная) плохо обрабатываются ультразвуковым способом, так как под ударами зерен абразива не происходит сколов материала изделия, а зерна просто внедряются в обрабатываемый материал.

Производительность ультразвуковой обработки зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, зернистости абразива, состава абразивной суспензии, амплитуды колебаний инструмента и др.

Оптимальная величина зерен абразива составляет 110 мкм, причем максимальная производительность достигается при концентрации абразива 30 ... 40% от общей массы суспензии.

Скорость обработки растет пропорционально квадрату амплитуды. В настоящее время максимальные амплитуды колебаний принимают в 45 ... 50 мкм. Дальнейшее увеличение амплитуды приводит к быстрому усталостному разрушению инструмента.

Точность и частота обработанной поверхности при ультразвуковой обработке в основном зависят от величины зерен абразива в суспензии.

При использовании суспензии с зернами карбида бора № 10 (100 мкм) можно получить шероховатость поверхности *Ra* 1,25 мкм, а точность — 0,06 мм. Применение абразива № 3 дает возможность повысить точность до 0,02 мм при шероховатости поверхности *Ra* 0,32 мкм. Однако производительность при этом уменьшается примерно в 10 раз. Наиболее целесообразно ультразвуковую обработку применять для обработки изделий из твердых сплавов (глухие отверстия штампов, пресс-форм и др.), резки германия и кремния, обработки алмазных и твердосплавных фильер, ферритовых плат и др.

9.4. Электрохимическая обработка

Электрохимическая размерная обработка основана на явлении анодного растворения металла и удаления продуктов электрохимической реакции с обрабатываемой поверхности. Ее применяют для обработки токопроводящих материалов. При этом отсутствуют высокие давления и температуры, а следовательно, и структурные изменения в поверхностном слое.

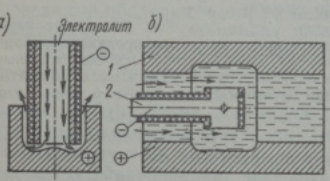


Рис. 9.8. Анодно-гидравлическая обработка:
а — сверление отверстия; *б* — образование кольцевой канавки

Производительность обработки не зависит от размеров деталей. Достижимая точность обработки составляет 12 ... 18 мкм, а шероховатость поверхности *Ra* 0,08 мкм.

Основные разновидности электрохимической обработки: анодно-гидравлическая в проточном электролите, электрохимическое полирование в неподвижном электролите и анодно-механические способы чистовой обработки.

Анодно-гидравлическая обработка в проточном электролите была предложена В. Н. Гусевым в 1952 г. Анодное растворение происходит без образования механически прочных анодных пленок, вследствие чего удаление продуктов электролиза осуществляется в результате принудительного интенсивного протока электролита (водный раствор соли: нейтральной, кислой или щелочной). Интенсивность съема металла может доходить до 400 мм³/мин.

При анодно-гидравлическом сверлении (рис. 9.8, *а*) инструментом служит медная трубка, изолированная снаружи. Под давлением вытекающего электролита между торцевой поверхностью труб-

ки и детали образуется зазор, исключающий замыкание электродов. При прохождении электрического тока через электролит происходит растворение металла детали. Продукты электролиза удаляются электролитом. По мере растворения изделия трубка углубляется в деталь, поддерживая постоянство межэлектродного зазора.

Примером формообразования более сложных поверхностей может служить операция изготовления кольцевых канавок (рис. 9.8, *б*). Деталь *1* подключена к положительному источнику тока, а инструмент *2* — к отрицательному.

Анодно-гидравлическую обработку целесообразно применять для снятия заусенцев у деталей сложной формы (мелкомодульные шестерни, храповые колеса и др.). Механическое удаление заусенцев является весьма трудоемкой операцией и не обеспечивет высокого качества деталей. При анодно-гидравлической обработке удаляются мельчайшие заусенцы и значительно повышается производительность труда. В практике находят применение анодно-механическое шлифование наружных цилиндрических поверхностей и чистовая обработка плоскостей.

● *Примечание.* В настоящее время используют комбинированные методы обработки, у которых анодное растворение металла сочетается с эрозионным или ультразвуковым разрушением, а продукты реакции удаляются с обрабатываемой поверхности механическим путем и выносятся из рабочей зоны потоком электролита.

9.5. Обработка при помощи плазмы

Плазмой называют ионизированный газ, перешедший в это состояние в результате нагрева до очень высокой температуры или вследствие столкновения частиц газа с быстрыми электронами (в газовом разряде). При этом молекулы распадаются на атомы, от которых отрываются электроны и возникают ионы. Последние ионизируют газ и делают его электропроводным. Однако не всякий ионизированный газ можно назвать плазмой. Необходимым условием существования плазмы является ее электрическая квазинейтральность, т. е. она должна содержать в единице объема примерно равное количество электронов и положительно заряженных ионов. Наряду с ними в плазме может находиться некоторое количество неионизированных атомов или молекул.

На плазму могут воздействовать магнитные и электрические поля.

Внешнее магнитное поле позволяет сжимать струю плазмы, а также управлять ею (отклонять, фокусировать).

Большая степень ионизации обусловливает высокую температуру газоразрядной плазмы, которая может достигать 50 000°С и выше. Свойства плазмы можно изменять путем применения различных газов (азота, аргона, водорода, гелия и др.).

Основным методом получения плазмы для технологических целей является пропускание струи сжатого газа через пламя электрической дуги.

Современные плазменные горелки делят на горелки прямого действия (с внешней дугой) и косвенного действия (с внутренней дугой).

Горелки прямого действия (рис. 9.9, *а*) применяют для обработки электропроводящих материалов. Дуга возбуждается между обрабатываемым изделием *4*, являющимся анодом, и вольфрамовым электродом *1* (катодом). Поток газа поступает в охлаждаемую водой *2* медную оболочку *3*. Дуга, выходя из сопла, направляется вместе с потоком газа к изделию.

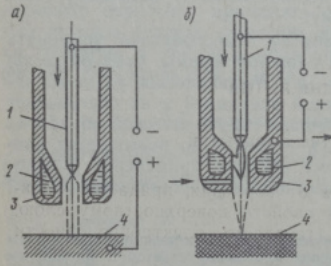


Рис. 9.9. Плазменные горелки прямого (*а*) и косвенного (*б*) действия

В качестве рабочего газа наиболее часто используют аргон, который ионизируется. Напряжение зажигания и рабочее напряжение при этом небольшие и электрическая дуга получается стабильной и инертной.

При использовании в качестве рабочего газа гелия скорость истечения струи при $t = 10\,000 \ldots 15\,000$°С приблизительно равна звуковой. Плазменная горелка рассматриваемого типа потребляет мощность 50 кВт и создает концентрацию мощности плотностью 3 мВт/дм^2.

Горелки косвенного действия можно применять для обработки токопроводящих материалов и диэлектриков.

В горелках косвенного действия (рис. 9.9, *б*) дуга образуется между вольфрамовым катодом *1* и стенками медного сопла *3*. Поток газа, охлаждаемого водой *2*, поступает в медную оболочку и, проходя через дугу, ионизируется. Дуга под действием струи газа выходит за пределы сопла, а плазма в виде факела направляется на обрабатываемое изделие *4*, которое изолировано от дуги.

Практическое осуществление плазменных горелок оказалось возможным благодаря способности плазмы сжиматься в узкий пучок. Защитой сопла от разрушения служит оболочка газа, которая образует прослойку между факелом и стенками сопла.

Наиболее целесообразно плазменный нагрев использовать для напыления тугоплавких неметаллических материалов, которые вводятся в плазму в виде порошка. Этим методом можно получать многослойные покрытия из одного или нескольких порошков.

Качество покрытий зависит от подготовки поверхности, вида применяемого порошка и материала основания. Подготовка поверхности заключается в очистке и обезжиривании.

При помощи плазменной горелки можно обрабатывать материалы любой твердости и любого химического состава.

Весьма эффективно применение плазмы при резке нержавеющих сталей и других металлов. Поверхность среза при этом получается гладкой, а глубина зоны влияния — незначительной.

ГЛАВА 10
ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

10.1. Виды защитных покрытий

Назначение покрытий — защита от коррозии, придание красивого внешнего вида и некоторых свойств поверхностному слою, отличных от основного металла (твердости, электропроводности и др.).

Процесс коррозии заключается в окислении металла и превращении его в соответствующие химические соединения. Коррозия металлов причиняет огромный ущерб народному хозяйству. Ежегодно вследствие коррозии разрушается много тысяч готовых изделий. Особенно интенсивно корродируют черные металлы. Разрушающее действие коррозии сказывается не только на внешнем виде изделия, но и на его механических качествах, прочности и надежности в эксплуатации. Коррозия, например, может нарушить электрический контакт. Оксиды металла, образующиеся под действием влаги, могут распространяться по поверхности изоляционных материалов и тем самым создавать утечки или замыкания в схеме.

Виды покрытий. Вид защитно-декоративных покрытий определяется способом их получения, материалом и толщиной покрытия и его последующей обработкой. Различают покрытия на неорганической основе — металлические и химические (оксидные) и покрытия на органической основе — лакокрасочные, полимерные и пластмассовые.

Условия эксплуатации. При выборе вида покрытия необходимо учитывать условия эксплуатации: легкие (Л), средние (С), жесткие (Ж) и очень жесткие.

Легкие условия эксплуатации изделия характерны для закрытых, отапливаемых и вентилируемых помещений с незагрязненной атмосферой, при относительной влажности 65% и температуре +25°С; средние условия эксплуатации характерны для изделий, эксплуатируемых в атмосфере, загрязненной

небольшим количеством промышленных газов и пылью при отсутствии непосредственного воздействия атмосферных осадков и прямой солнечной радиации. Относительная влажность среды 95% при температуре +30°С. В жестких условиях эксплуатируются детали негерметизированной аппаратуры при непосредственном воздействии атмосферных осадков, сернистых газов в атмосфере, загрязненной промышленными и топочными газами.

Особые условия эксплуатации (очень жесткие) определяются в каждом конкретном случае.

10.2. Металлические покрытия

Металлические покрытия представляют собой тонкий слой металла, нанесенного на поверхность. В зависимости от характера защиты изделий от коррозии металлические покрытия разделяют на анодные и катодные.

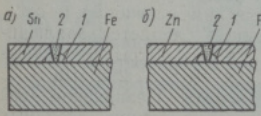


Рис. 10.1. Схемы коррозии луженого (*а*) и оцинкованного (*б*) железа:
1 — продукты коррозии; *2* — влага

Анодными защитными покрытиями называют такие, электрохимический потенциал металла которых в данной среде более электроотрицателен, чем электрохимический потенциал основного металла; *катодными* — покрытия с обратным соотношением потенциалов.

На рис. 10.1 показана схема коррозии луженого и оцинкованного железа. При повреждении оловянного покрытия (рис. 10.1, *а*) и соприкосновении его с влагой образуется гальванический элемент. Так как электрохимический потенциал железа (—0,44 В) электроотрицательнее олова (—0,14 В), то железо будет растворяться, а на олове будут разряжаться ионы водорода H^+, образуя газообразный водород. При повреждении цинкового покрытия (рис. 10.1, *б*) в образовавшемся гальваническом элементе будет растворяться цинк (—0,76 В), а железо, имеющее менее электроотрицательный потенциал, разрушаться не будет. Таким образом, цинк будет электрохимически предохранять железо от коррозии.

С точки зрения защиты от коррозии более целесообразно иметь анодное покрытие. Вследствие большой химической активности анодное покрытие быстро разрушается и непригодно в тех случаях, когда требуется хороший вид (декоративное покрытие).

Основные требования, предъявляемые к металлическим покрытиям,— прочное сцепление с основным металлом; мелкокристаллическая структура, обеспечивающая наилучшие механические свойства; минимальная пористость; равномерная толщина покрытия. В ряде случаев предъявляются и дополнительные тре-

бования (высокая твердость, износоустойчивость и др.), которые при определенных условиях эксплуатации могут стать и основными.

Технологический процесс нанесения покрытий включает в себя следующие основные этапы: подготовку поверхности, нанесение покрытий, промывку и сушку детали.

Подготовка поверхности. Этап включает в себя операции механической обработки, обезжиривания и декапирования (травления).

Механическую обработку производят с целью повышения чистоты поверхности, удаления неровностей, забоин, продуктов коррозии. Для этого в гальванических цехах применяют полирование, крацовку, гидроабразивную обработку.

Обезжиривание поверхности осуществляют путем промывки в органических растворителях (бензине, керосине), обезжиривания известью, обработки в горячих щелочных растворителях (химическим или электрохимическим способом).

Декапирование (легкое травление) является заключительной операцией подготовки поверхности под покрытие. Осуществляют его путем погружения изделия на 1 ... 2 мин в 5 ... 10%-ный раствор серной или соляной кислоты. Назначение этой операции — удаление с поверхности изделия тонких оксидных пленок и выявление структуры основного металла, что способствует лучшему сцеплению основного металла с металлом покрытия. После декапирования изделия промываются проточной водой.

Нанесение покрытий. Металлические покрытия могут быть нанесены электролитическим (гальваническим), химическим и другими способами.

Гальванический (электролитический) способ является наиболее распространенным. Он заключается в осаждении металлов при электролизе водных растворов соответствующих солей. Покрываемая деталь является отрицательным полюсом (катодом), а металл покрытия — положительным полюсом (анодом).

Количество вещества, выделившегося на катоде, можно определить на основании законов Фарадея по формуле

$$m = aIt, \qquad (10.1)$$

где I — сила тока, А; t — время электролиза, ч;

$$a = A/(nF) \qquad (10.2)$$

— электрохимический эквивалент, г/(А·ч);

A — атомный вес; n — валентность; F — число Фарадея.

Основным показателем, характеризующим процесс электролиза, является плотность тока на катоде, представляющая собой отношение силы тока к площади электрода.

На катоде, как правило, кроме металла выделяется водород. Вследствие этого количество металла, отлагающегося на катоде, всегда меньше расчетного. Выход по току есть коэффициент, показывающий, какую часть металла можно действительно выделить на катоде. Значение коэффициента выхода по току зависит от состава электролита и условий электролиза.

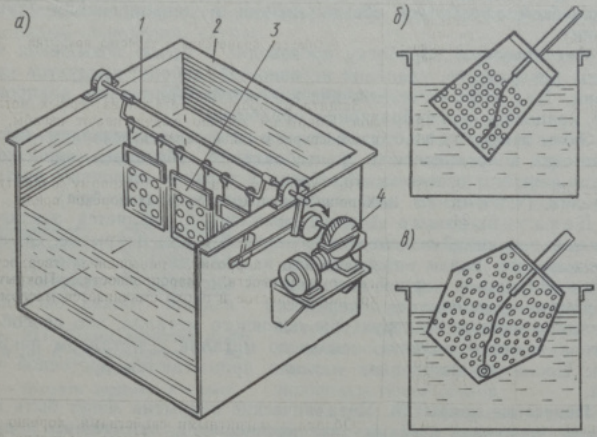


Рис. 10.2. Ванны для нанесения гальванических покрытий:
а — с качающейся штангой; *б, в* — вращающиеся колокольного типа; *1* — качающаяся катодная штанга; *2* — корпус; *3* — подвески с деталями; *4* — привод

Нанесение покрытий производится в гальванических ваннах (рис. 10.2). Детали помещают на подвесках или в сетчатых корзинках. Большинство электролитов требует подогрева и перемешивания. В этих случаях применяют ванны с качающимися штангами (рис. 10,2, *а*). Они позволяют перемешивать электролит, не взмучивая шлам со дна ванны. Качание или встряхивание способствуют удалению с поверхности изделия выделяющихся при электролизе пузырьков водорода.

Покрытие мелких деталей целесообразно выполнять во вращающихся ваннах колокольного типа (рис. 10.2, *б*). Более равномерное покрытие получается в ваннах, имеющих форму двух усеченных конусов (рис. 10.2, *в*).

В массовом производстве используются автоматизированные агрегаты с программным управлением. Они представляют собой установки из ряда ванн, в которых выполняются все операции,

начиная с обезжиривания и кончая сушкой. Подвески с деталями перемещаются в соответствии с заданным ритмом.

Структура покрытий и равномерность отложения металла зависят от состава электролита, его температуры и чистоты, плотности тока и др.

Таблица 10.1

Вид покрытия	Условия работы и толщина покрытия, мкм	Область применения и свойства покрытия
Цинк	Л 6...9 С 15...18 Ж 30...36	Защита от коррозии деталей из черных металлов. Покрытия хорошо выдерживают изгибы, но плохо свариваются и паяются
Кадмий	Л 9...12 С 15 Ж 24	По свойствам близок к цинковому покрытию. Хорошо защищает в условиях морской среды
Хром по стали без подслоя	Л 18 С 36 Ж 48	Защита от коррозии, повышение твердости, износоустойчивости, жаропрочности. Покрытие хрупкое, пористое и плохо смачивается маслом
Хром по никелю	Л 6...9 С 12...15 Ж 18...21	
Никель по меди	Л 6...9 С 12...15	Обладает магнитными свойствами, хорошо полируется, сохраняет блеск. Имеет зеркально блестящую поверхность
Олово по меди	Л 9 С 15	Для предохранения деталей от окисления, облегчения пайки, герметизации резьбовых соединений. Покрытие весьма пластично

Положительное влияние на структуру покрытия оказывает ток переменной полярности. Осадки металла получаются более мелкозернистые и плотные, чем при постоянном токе. Толщина гальванического осадка не бывает равномерной по всей его поверхности. Способность электролитической ванны давать равномерный по толщине осадок называется рассеивающей способностью ванны.

Прочность сцепления металла покрытия с основным металлом зависит главным образом от состояния покрываемой поверхности. Присутствие в электролите посторонних примесей не позволяет получить беспористые осадки.

Гальванический способ дает возможность получать покрытия высокого качества и строго определенной толщины. К числу не-

достатков относятся пористость и невозможность получения равномерного осадка на всех участках поверхности детали сложной формы. При выборе металла покрытия необходимо учитывать назначение покрытия, условия эксплуатации, материал детали и др. Нельзя допускать образования гальванических пор, вызывающих коррозию металла. Минимальная толщина покрытия должна обеспечивать требуемую защитную способность. Характеристики некоторых гальванических покрытий даны в табл. 10.1.

Химический способ получения металлических покрытий осуществляется с помощью специальных растворов при отсутствии электрического тока. Он основан на восстановлении ионов осаждаемого металла в результате взаимодействия с восстановителем. Последний, окисляясь, отдает свои электроны, а находящиеся в растворе ионы металла, присоединяя электроны, превращаются в атомы и осаждаются в виде металлической пленки. Реакция восстановления протекает лишь на металлической поверхности, являющейся каталитической для данного процесса. Наиболее широко применяют химическое никелирование и меднение. *Химическое никелирование* дает возможность покрывать детали сложной формы и внутренние поверхности, которые недоступны для покрытия гальваническим способом. Оно состоит в восстановлении никеля из водных растворов. *Химическое меднение* используется для металлизации пластмасс при изготовлении печатных плат.

10.3. Химические и электрохимические покрытия

Химические покрытия представляют собой тонкий слой оксида металла детали, образующийся на ее поверхности под действием тех или иных реагентов. Наиболее широкое применение из оксидных покрытий получили оксидирование и фосфатирование.

Оксидирование используют для защиты от коррозии черных и цветных металлов. Оксидные пленки на черных металлах могут быть получены химическим и электрохимическим (анодно-оксидным) способами. Химический способ заключается в нагревании стальной детали в атмосфере водяного пара или расплавленной селитры. При этом на поверхности образуется защитная пленка. Такой способ, в частности, используется для получения изоляционных пленок на трансформаторных пластинах.

Обычно химическое и электрохимическое оксидирование производится в растворе едкой щелочи. Электрохимическое оксидирование ведут при следующих режимах: анодная плотность постоянного тока 5 ... 10 А/дм², температура электролита 122°С в течение 10 ... 30 мин. Подготовка поверхности заключается, как и при гальванических методах, в механической обработке, обезжиривании и травлении. Качество пленок при химическом и электрохимическом оксидировании стали получается почти равноценным.

Толщина пленок составляет 0,6 ... 0,8 мкм, но может достигать 1,5 ... 3 мкм. Пленки эластичны, но не прочные и не могут быть использованы для деталей, работающих в условиях трения. Вследствие малой толщины и значительной пористости оксидные пленки защищают от коррозии при работе в легких условиях. Защитная способность их может быть повышена обработкой смазочными маслами или покрытием лаками. Размеры деталей при оксидировании практически не изменяются. Цвет оксидной пленки на малоуглеродистых сталях черный, на высокоуглеродистых — черный с серым оттенком.

Одним из основных методов защиты алюминия и его сплавов от коррозии является анодное оксидирование (анодирование), которое дает возможность получить пленки толщиной 3 ... 12 мкм. В хромово-кислых растворах получаются пленки светло-серого цвета, в сернокислых — бесцветные. Для уменьшения пористости оксидной пленки применяют дополнительную обработку анодированных деталей горячей водой, водяным паром, пропитывание ланолином, парафином, лаками и т. п.

Оксидирование меди и ее сплавов используют для защиты от коррозии, деталей, работающих в атмосфере с нормальной влажностью. Толщина пленки составляет 1 ... 2 мкм. Она более твердая и износоустойчивая, чем основной металл, и довольно хорошо сопротивляется действию влаги. Лучшее качество покрытия получается при электрохимическом оксидировании.

Фосфатирование применяют в сочетании с защитными смазками или лакокрасочными покрытиями для защиты от коррозии черных металлов, магния, цинка, а также для уменьшения трения при разного рода вытяжках и для изоляции поверхности при лужении, цинковании и т. п. Фосфатный слой обладает хорошей адгезионной способностью, прочно удерживает масла, лаки и краски, имеет высокое электрическое сопротивление и выдерживает напряжение до 1200 В. Жаростойкость пленки составляет 400...500°С. Фосфатные покрытия используют для изоляции трансформаторных, роторных и статорных пластин. Образование пленки на поверхности производится после вырубки, снятия заусенцев и отжига пластин.

Химическое фосфатирование осуществляют путем погружения деталей в ванну, содержащую фосфорно-кислые соли железа и марганца. Толщина пленки при мелкокристаллическом строении составляет 2 ... 4 мкм, при крупнокристаллическом — 10 ... 15 мкм. Фосфатирование практически не изменяет размеров детали, так как наряду с ростом толщины пленки уменьшается толщина металла за счет его растворения. Цвет покрытия — светло-серый или темно-серый. Для повышения коррозионной устойчивости необходимо производить дополнительную обработку, которая заключается в нанесении жировых пленок, лаков и красок.

10.4. Лакокрасочные покрытия

Лакокрасочные покрытия применяют для придания поверхности детали антикоррозионных свойств и красивого внешнего вида. Их нельзя применять для деталей, имеющих точные допуски и трущиеся поверхности, подвергающихся механическим воздействиям и нагреву. Для обеспечения антикоррозионной защиты стальные детали предварительно подвергают цинкованию, детали из алюминия и его сплавов — анодированию, детали из магниевых сплавов — оксидированию.

Лакокрасочные покрытия классифицируют по материалу покрытия, внешнему виду поверхности покрытия (класс покрытия) и по условиям эксплуатации (группа покрытия).

Различают семь классов покрытия (ГОСТ 9.032—74). Наиболее высокие требования предъявляются к внешнему виду поверхностей I класса. В этом случае не допускаются дефекты поверхности, видимые невооруженным глазом.

По степени блеска лакокрасочные покрытия делят на глянцевые, полуглянцевые и матовые. Группа покрытия выбирается по условиям эксплуатации (атмосферостойкие, химически стойкие, маслостойкие и др.).

Технологический процесс нанесения лакокрасочных покрытий состоит из этапов подготовки поверхности, грунтования, шпатлевания, нанесения покрытия, сушки.

Подготовка поверхности заключается в очистке ее от продуктов коррозии и загрязнений (химическим или механическим способом) и тщательном обезжиривании.

Грунтование — нанесение слоя грунта толщиной около 20 мкм. Основное назначение этой операции состоит в создании адгезии между металлом и последующими слоями лакокрасочного покрытия. Наиболее часто применяют масляные грунты (свинцовый и железный сурик на олифе), лаковые грунты типа АЛГ-1, АЛГ-5 и др. Грунт можно наносить распылением, окунанием или кистью. После нанесения каждого слоя производят сушку.

Шпатлевание — выравнивание загрунтованной поверхности. *Шпатлевка* — это пастообразная масса, состоящая из пигментов, наполнителей и лаков с добавлением или без добавления пластификаторов. Местное шпатлевание заключается в выравнивании отдельных углубленных мест. Затем проводят сплошное шпатлевание. Шпатлевки наносят на поверхность при помощи шпателя или краскораспылителя. В последнем случае их разбавляют растворителем. После нанесения шпатлевки поверхность сушат и шлифуют мелкой шкуркой.

Нанесение лакокрасочных покрытий производится с помощью кисти, окунанием и распылением. Окрашивание кистью является малопроизводительным процессом и применяется для медленно сохнущих лаков, для подкраски поверхности и на-

несения обозначений по трафарету. Нанесение покрытий окунанием применяется для деталей, не требующих тщательной отделки и имеющих удобную для стекания краски форму. При этом способе получается неравномерная толщина пленки и повышенный расход материала. Более высокая производительность (в 7 ... 12 раз) и высокое качество поверхности достигаются при окрашивании распылением. Однако этот метод связан с повышенным расходом материала и необходимостью вести процесс в специальной камере.

Наиболее совершенной является окраска в электростатическом поле коронного разряда (рис. 10.3). При этом способе изделие подвешивается на заземленный конвейер *4*, проходящий между электродами *1*, которые соединены с отрицательным полюсом источника *2* напряжения 100 кВ постоянного тока. Коронный разряд, возникающий между электродами и заземленным изделием, ионизирует молекулы воздуха, находящиеся в электрическом поле. В образующееся электростатическое поле направляется от распылителя *3* струя краски. Частицы ее, заряжаясь отрицательно, притягиваются к положительно заряженным деталям. При этом способе повышается качество окраски, так как разброс по толщине составляет всего 5...8 мкм (при ручном распылении 50...70 мкм). Производительность труда повышается в 3...4 раза, улучшаются санитарно-гигиенические условия труда и сокращается расход краски (ее потери составляют всего 5...10%). Процесс окраски может быть полностью механизирован.

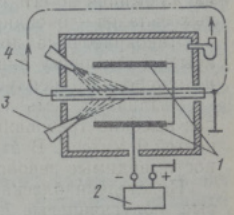


Рис. 10.3. Окрашивание в электростатическом поле коронного разряда

Для окраски используют материалы, образующие гладкие поверхности (перхлорвиниловые, глифталевые, нитроцеллюлозные и другие эмали) и узорно-декоративные (кристаллический лак «Мороз», морщинистая «Муар» и др.).

Сушка является заключительным этапом. Ее производят в сушильных шкафах, рефлекторных сушилках и т. д. Наиболее совершенна сушка инфракрасными лучами. Этот способ дает большую экономию энергии и позволяет значительно сократить производственные площади.

10.5. Контроль покрытий

Покрытия проверяются по внешнему виду, толщине, пористости и прочности сцепления с основным материалом.

Внешний вид покрытия проверяют визуально с помощью лупы

с увеличением 4^{x}, сравнивая с эталонным образцом при дневном или искусственном свете.

Для контроля толщины металлических и неметаллических (неорганических) покрытий используют физические (неразрушающие) и разрушающие (химические) методы.

Сущность неразрушающих методов заключается в том, что в зависимости от толщины покрытия изменяются сила отрыва постоянного магнита от поверхности детали (магнитный метод), интенсивность отражения β-излучения (радиоактивный метод,) магнитный поток, возникающий между преобразователем прибора и деталью (электромагнитный метод), и др.

Наиболее простым неразрушающим методом является весовой. Среднюю толщину покрытия (мкм) рассчитывают по формуле

$$H_{ср}=(g_1-g_2)\,10000/(S\gamma), \qquad (10.3)$$

где g_1, g_2 — массы детали до и после нанесения покрытия, г; S — площадь покрытия, см^2; γ — плотность материала покрытия, г/см^3.

Химический метод контроля покрытий, называемый методом капли, заключается в том, что участок покрытия растворяется каплями раствора. Они наносятся и выдерживаются в течение определенного промежутка времени. Толщину покрытия рассчитывают по числу капель, которые наносят до тех пор, пока не обнаружится участок основного металла.

Местная толщина покрытия

$$H_m=H_к(n-0{,}5), \qquad (10.4)$$

где $H_к$ — толщина покрытия, снимаемая одной каплей раствора в течение заданного времени, мкм; n — количество капель, израсходованных на растворение покрытия.

За результат принимают среднее арифметическое значение трех измерений.

Контроль пористости покрытий осуществляют путем наложения фильтровальной бумаги и паст. Эти методы основаны на химическом взаимодействии основного металла с реагентом в местах пор и других несплошностей покрытия с образованием окрашенных соединений. После снятия бумагу промывают и подсчитывают число пор, которые видны в виде точек или пятен.

Прочность сцепления покрытия можно определять методом изгиба под углом 90° или путем нанесения сетки царапин. В последнем случае на поверхности контролируемого покрытия наносят 4 ... 6 параллельных линий глубиной до основного металла, на расстоянии 2 ... 3 мм друг от друга и 4 ... 6 параллельных линий, перпендикулярных им. На контролируемой поверхности при этом не должно быть отслоения.

Покрытия обозначают в чертежах в соответствии с ГОСТ 9.303—84 (для всех покрытий, кроме лакокрасочных).

В обозначении покрытия указываются способ нанесения, вид покрытия, толщина покрытия, степень блеска, вид дополнительной обработки.

Гальванический способ нанесения покрытий, являющийся самым распространенным, в обозначении не указывается. Например, цинковое покрытие толщиной 12 мкм, матовое, наносится гальваническим методом, обозначается Ц12м.

В обозначении лакокрасочных покрытий (ГОСТ 9.032—74) указываются материал покрытия, внешний вид (класс покрытия) и условия эксплуатации (группа покрытия). Например, эпоксидная эмаль ЭП-140, цвет синий, IV класс отделки для изделий, эксплуатируемых внутри помещений (П). Обозначение: ЭмЭП-140, синий, IV, П.

ГЛАВА 11
ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

11.1. Методы защиты от внешней среды

Для современных вычислительных устройств, эксплуатируемых в сложных климатических условиях, большое значение имеет защита их от воздействия внешней среды.

Герметизация. Одним из наиболее эффективных методов защиты от климатических факторов (влаги, пониженного давления и др.) является герметизация, которая может быть полной или частичной.

Частичной герметизации подвергаются наименее стойкие к внешним воздействиям детали и узлы (например, трансформаторы, дроссели и др.). При этом кожух не является герметизирующим элементом. Основной метод частичной герметизации — изолирование жидкими диэлектриками.

Полная герметизация достигается применением защитных корпусов из металла, керамики и других материалов. Она весьма эффективна для аппаратуры, устанавливаемой на летательных аппаратах. В этих случаях полная герметизация предохраняет не только от действия влаги и пониженного давления, но и исключает возможность электрического пробоя.

Широкое распространение получили комбинированные способы герметизации, в которых используются защитные корпуса, компаунды, изоляционные пленки, покровные лаки и др.

Консервация. Готовые изделия и запасные части к ним после сборки и испытания не сразу поступают в эксплуатацию, а под-

вергаются консервации. Различают консервацию длительную, местную и общую. Длительная консервация должна обеспечивать сохранность изделия в течение не менее двух лет. В случае более длительного хранения изделия подлежат переконсервации.

Местная консервация заключается в защите от коррозии отдельных наружных поверхностей. Стальные детали, которые не сопрягаются с деталями из цветных сплавов, и детали из магниевых сплавов консервируются пушечной смазкой. Для защиты деталей из алюминия, меди и их сплавов применяют технический вазелин. Смазку наносят кистью или путем окунания. Для этого технический вазелин нагревают до 45°С, а пушечную смазку — до 70 ... 75°С.

Общая консервация достигается герметичной упаковкой изделия. Его обертывают двумя слоями парафинированной бумаги и к шпагату прикрепляют один или два мешочка с влагопоглотителем, в качестве которого применяют силикагель, просушенный при 160 ... 170°С в течение 4 ч. На видном месте закрепляют индикатор влажности. Последний представляет собой прозрачный патрон, выполненный из плексигласа и заполненный силикагелем синего цвета, высушенным при 120°С в течение 2 ч. Если влага попадает под оболочку, то она проникает в патрон, при этом силикагель меняет цвет, превращаясь из синего в розовый.

Затем изделие с влагопоглотителем и индикатором укладывают в чехол из полихлорвиниловой пленки и заклеивают специальным клеем. Из внутренней полости чехла через специальное отверстие откачивают воздух, после чего отверстие заклеивают, а чехол обертывают парафинированной бумагой, в которой оставляют окно для наблюдения за индикатором.

11.2. Процессы изолирования жидкими диэлектриками

Основное назначение процессов изолирования жидкими диэлектриками заключается в защите отдельных деталей и элементов от влаги. Проникновение влаги в поры изоляционных материалов заметно ухудшает их свойства и вызывает возрастание диэлектрических потерь, а продолжительное воздействие влаги приводит к изменению электрических параметров элементов и нарушению режимов работы отдельных цепей.

Попадание влаги между витками обмоток создает благоприятные условия для возникновения коррозии меди и приводит в конечном результате к обрыву провода.

Методы защиты аппаратуры. Основными методами защиты аппаратуры от влаги являются пропитка, заливка и обволакивание.

Пропитка заключается в заполнении пор, трещин, пустот в изоляционных материалах, а также промежутков между конст-

руктивными элементами узлов электроизоляционными негигроскопичными материалами.

Пропитке подвергаются многие детали и узлы вычислительных устройств, изготовляемых из волокнистых электроизоляционных материалов, являющихся пористыми и гигроскопичными. К таким узлам относятся намоточные изделия, каркасы катушек и др.

Одновременно с повышением влагозащиты при пропитке достигается повышение механической прочности, нагревостойкости, диэлектрической прочности, теплопроводности и химической стойкости.

Заливка заключается в заполнении диэлектриком свободного промежутка между заливаемым изделием и стенками кожуха или заливочной формы.

Обволакивание — процесс покрытия изделия пленкой только снаружи. Нанесенный слой удерживается на поверхности в результате адгезии, которой должны обладать материалы, применяемые для обволакивания.

Пропитка, обволакивание и заливка могут применяться самостоятельно и в любых сочетаниях.

Изоляционные материалы, применяемые для влагозащитных операций, должны иметь хорошие пропитывающие и высокие диэлектрические свойства, а также обеспечивать надежную работу в условиях воздействия резких перепадов температур, высокой влажности, агрессивных сред, радиации и механических перегрузок.

Герметизирующие материалы должны обеспечивать целостность готового изделия, поэтому важными свойствами их являются механическая прочность и адгезия к разнообразным материалам.

Электроизоляционные материалы. Основными электроизоляционными материалами являются пропиточные лаки, компаунды, покровные лаки и эмали.

Пропиточные лаки состоят из пленкообразующих веществ (основы); растворителей; сиккативов—веществ, ускоряющих процессы отверждения лаковой основы; пластификаторов, придающих гибкость лаковой пленке. Изоляционные свойства лаков зависят от свойств основы. В качестве растворителя основы наиболее часто применяют авиационный бензин, этиловый спирт и др.

Пропитка лаками не создает надежной герметизации, так как содержащиеся в них растворители в процессе сушки улетучиваются, оставляя поры. Применение многократных пропиток способствует перекрытию пор последующими слоями, но даже в этом случае они полностью не устраняются.

Компаунды — механические смеси из электроизоляционных материалов, не содержащие растворителей. В момент применения компаунды находятся в жидком состоянии и твердеют при охлаж-

дении (термопластические компаунды) или в процессе полимеризации (термореактивные компаунды).

В настоящее время широко применяют эпоксидные компаунды на основе смолы ЭД-6, кремнийорганические компаунды К-43 и др., представляющие собой смеси синтетических смол с добавлением отвердителей, наполнителей и пластификаторов.

Свойства компаунда зависят не только от исходной смолы, а также от рода и количества отвердителя. Компаунды, состоящие только из смолы и отвердителя, обычно отличаются высоким коэффициентом термического расширения. При изолировании таким компаундом металлических деталей возникают большие внутренние напряжения, приводящие к растрескиванию изоляции.

Для устранения внутренних напряжений в компаунд вводят наполнитель, который снижает температурный коэффициент линейного расширения, уменьшает усадку и улучшает теплопроводность компаунда.

Порошкообразные материалы (оксид алюминия, пылевидный кварц, молотая слюда, диоксид титана и др.) широко используют в качестве наполнителей. Для заливочных компаундов количество наполнителей составляет до 150% по отношению к связующему веществу.

Эмали и покровные лаки используют для обволакивания. Они состоят из основы и растворителя, должны быстро сохнуть и образовывать блестящую пленку, хорошо сцепляющуюся с покрываемой поверхностью. Лаки и эмали могут отвердевать как при воздушной, так и при печной сушке.

Технологический процесс влагозащитных операций. Технологический процесс включает в себя операцию сушки, которая производится до и после пропитки, заливки и обволакивания.

Предварительная сушка необходима для удаления влаги из пор изоляционных материалов и промежутков в деталях и узлах. Наличие влаги в изделии ухудшает его качества, так как влага закупоривается внутри изделия и препятствует достаточно глубокому проникновению в нее пропитывающего состава. После пропитки, заливки и обволакивания сушка необходима для удаления растворителя и ускорения процесса формирования лаковой пленки или полимеризации термореактивных материалов.

Температуру сушки устанавливают не ниже температуры кипения воды и не выше теплостойкости изоляционных материалов. Для сушки изделий с органическими изоляционными материалами наиболее приемлема температура сушки порядка 105°С, которую выдерживают большинство изоляционных материалов. Продолжительность сушки устанавливают опытным путем, причем критерием обычно служит сопротивление изоляции. Основными видами сушки являются конвекционная, радиационная, индукционная и вакуумная.

Пропитка может производиться при атмосферном давлении (свободная пропитка), под давлением и в вакууме.

Пропитку при атмосферном давлении используют в тех случаях, когда пропиточный состав имеет небольшую вязкость, а растворителем является вещество, обладающее большой летучестью (например, полистироловый лак, в котором до 90% по весу составляет бензол). Пропитка состоит в погружении еще не остывших после сушки изделий (t=60 ... 80°С) в лак. Свободная пропитка имеет ограниченное применение, так как не обеспечивает высокого качества изоляции.

Пропитку под давлением применяют при использовании вязких пропиточных составов или компаундов с наполнителями. Для создания избыточного давления используют нейтральный газ (азот, аргон и др.), так как атмосферный воздух вызывает повышение кислотности пропиточных составов и компаундов. При этом способе пропитки предварительно просушенные изделия загружают в специальные котлы (автоклавы) с пропиточным составом, где создается повышенное давление (0,5 .. 1 Па), что ускоряет проникновение пропиточного состава в поры и капилляры изделий. Рекомендуется применять тренировочный режим, при котором каждые 5 ... 10 мин снижают рабочее давление до атмосферного, а затем вновь повышают. По окончании 10 ... 15 циклов давление снижают до атмосферного и изделия вынимают из автоклава. Этот способ обеспечивает проникновение пропиточного состава в глубокие и узкие поры.

Пропитка в вакууме осуществляется одновременно с сушкой. Для этой цели применяют специальные установки, имеющие два герметически закрывающихся бака с обогревателями. В один бак загружают изделия в сеточной корзине, а другой заполняют пропиточным составом. Затем включают обогрев и производят вакуумную сушку. После сушки пропиточный состав перекачивают из второго бака и производят вакуумную пропитку при остаточном давлении 266 Па в течение 10 мин. За это время в порожнем баке производят вакуумную сушку. По окончании вакуумной пропитки в первом баке пропиточный состав перекачивают обратно во второй бак, где начинается процесс пропитки. Изделия из первого бака после стекания излишков пропиточного состава выгружают и подвергают окончательной сушке. Пропитку можно вести и в одном баке. Тогда второй бак является только хранилищем для пропиточного состава.

Вакуумная циклическая пропитка применяется при вязком пропиточном составе. Установка для такой пропитки (рис. 11.1) состоит из автоклава *II* и подготовительного бачка *I*, которые закрываются герметическими крышками. Изделия, высушенные в сушильном шкафу, загружают в автоклав, нагретый до 80 ... 90°С. По окончании вакуумной сушки, которая проходит в течение 5 ... 10 мин, бачок отключают от вакуумной системы и заполня-

ют пропиточным составом. Для этого открывают краны трубопровода, соединяющего автоклав с бачком, в котором находится пропиточный состав. Под действием разности давлений пропиточный состав перегоняется в автоклав и в течение 5 ... 10 мин проходит вакуумная пропитка. Затем открывают краны, соединенные с компрессором, и в бачке создают давление 0,3 ... 0,6 МПа в течение 10 мин. После этого бачок *I* подключают к вакуумной системе и пропиточный состав возвращается в бачок. Вследствие чередования вакуума и давления пропиточный состав полностью заполняет все поры и промежутки в изделии. Число циклов зависит от вязкости пропиточного состава.

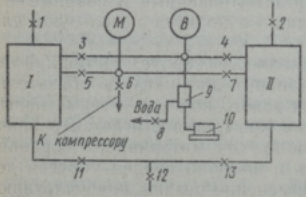


Рис. 11.1. Вакуумная циклическая пропитка:

М — манометр; *В* — вакуумметр; *1* — бачок; *II* — автоклав; *1, 2* — спускные краны; *3, 4* — краны линии вакуума; *5 ... 7* — краны линии давления; *8* — водопроводный кран; *9* — фильтр; *10* — вакуумный насос; *11, 13* — краны перекачки пропиточного состава; *12* — сливной кран

Заливка применяется для получения относительно толстого изоляционного слоя (1 мм и более). Изделия, полученные заливкой, имеют точные размеры, устойчивы к воздействию влаги, механических нагрузок и изменению атмосферного давления.

Наиболее часто заливку производят компаундами на основе эпоксидных смол. Изделие при этом помещают в форму и заполняют заливочным материалом так, чтобы он полностью окружал изделие. После окончания процесса отверждения заливочного материала форма удаляется. При этом получается гладкая однородная поверхность изделия, повторяющая поверхность формы.

Обволакивание заключается в нанесении одного или нескольких слоев влагостойкого электроизоляционного материала на поверхность изделия. В качестве обволакивающего материала обычно применяют компаунды, в которые погружают изделия. После заливки их подвергают нагреву для полимеризации компаунда.

Основное преимущество процесса заключается в его простоте, малом расходе материала при достаточно высокой степени защиты. Однако по надежности защиты метод обволакивания уступает заливке вследствие меньшей толщины изоляционного покрытия.

11.3. Полная герметизация

Для общей защиты изделия от воздействия климатических факторов применяют специальные корпуса (кожухи) и оболочки, в которые заключают изделие. Выбор материала и конструкции герметического корпуса определяется назначением и сроком

службы изделия. Наиболее широко применяют металлические корпуса, изготовленные из мягкой листовой стали. Если по условиям работы недопустимо использование ферромагнитных материалов, то корпуса изготовляют из листовой меди или листовой латуни. Для корпусов, выполненных из листового материала, необходимо предусматривать ребра жесткости.

Металлические корпуса могут быть изготовлены литьем, штамповкой или сваркой. Литые корпуса применяют главным образом в корабельной аппаратуре, а штампованные и сварные — в самолетной. Керамические и стеклянные корпуса используют для герметизации небольших изделий.

Оптимальной конструкцией является корпус, состоящий из двух герметичных деталей (основания и крышки), а обязательными конструктивными элементами такого корпуса — герметичные выводы. Необходимая герметизация крышки достигается различными прокладками из резины или других материалов. Сравнительно малая газонепроницаемость и высокий предел упругой деформации обусловили широкое применение резины как уплотняющего материала, хотя ей свойствен ряд недостатков (зависимость деформаций от температуры и времени, недостаточный диапазон температур и др.).

Широко распространенный способ получения герметичных соединений — пайка легкоплавкими припоями (обычно ПОС61).

Механические выводы выполняют с использованием различных уплотнителей между стенками корпуса и подвижными элементами. В качестве уплотнителей применяют прокладки из резины, фетра и других материалов. Этот способ надежен для защиты от воды, но мало эффективен против водяных паров. Высокой эластичностью, плотностью, тепло- и морозостойкостью обладают материалы на основе кремнийорганических соединений.

Электрические выводы осуществляются через проходные изоляторы, изготовляемые из стекла, стеклокерамики, керамики и других диэлектриков. Стеклянные изоляторы представляют собой трубку, впаянную в изолятор. Недостаток таких изоляторов — высокая чувствительность к резкому изменению температуры. Более надежными являются керамические изоляторы, которые имеют сквозное отверстие для продевания провода и металлизированные поверхности для пайки к корпусу и для герметической заделки вывода.

В настоящее время корпуса интегральных схем изготовляют со стеклянными изоляторами. В качестве металла для спая металла со стеклом применяют ковар, молибден и др.

Процесс спая состоит в нагреве металла и стекла до 900 ... 1100°С, приведении в соприкосновение металла со стеклом, выдержке при высокой температуре для осуществления диффузии окиси в стекле, отжиге для снятия напряжений.

Для получения спая металла со стеклом применяют специальную туннельную конвейерную электрическую печь. Эта печь имеет две технологические зоны с разными газовыми средами, что позволяет производить окисление металла для получения спая и восстановление после получения спая.

Для повышения степени герметизации свободное пространство корпуса заполняют заливочными материалами или нейтральным газом (азот, аргон и др.). Обязательным условием использования газов является очистка их от паров и тщательная сушка изделия. Если необходимо улучшить условие теплоотдачи, то для заполнения свободного пространства надо применять водород или гелий, которые обладают высокой теплопроводностью.

В процессе герметизации производится проверка корпуса с помощью избыточного давления. Наиболее совершенна проверка с помощью течеискателей, которые представляют собой масс-спектрометр, настроенный на гелий.

ГЛАВА 12
ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

12.1. Конструктивно-технологическая характеристика печатных плат

Печатной платой называется материал основания, вырезанный по размеру, содержащий необходимые отверстия и по меньшей мере один проводящий рисунок (ГОСТ 20406—75).

Основными видами печатных плат являются односторонние печатные платы (ОПП), двусторонние печатные платы (ДПП), многослойные печатные платы (МПП), гибкие печатные платы (ГПП) и гибкие печатные кабели (ГПК).

Односторонняя печатная плата (рис. 12.1, *а*) представляет собой основание, на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок, а на другой стороне размещаются электрорадиоэлементы и интегральные микросхемы. Для соединения выводов навесных элементов с печатными проводниками служат монтажные отверстия. Металлизированные контактные отверстия обеспечивают более надежное соединение. Однако ОПП с неметаллизированными отверстиями более просты в изготовлении.

Двусторонняя печатная плата (рис. 12.1, *б*) имеет одно основание, на обеих сторонах которого выполнены проводящие рисунки и все требуемые соединения. Переход токопроводящих линий с одной стороны платы на другую осуществляется металлизированными монтажными отверстиями. С помощью такой платы можно выполнять сложные схемы.

Многослойная печатная плата (рис. 12.1, *в*) состоит из чередующихся слоев изоляционного материала с проводящими рисун-

ками на двух (и более) слоях, между которыми выполнены требуемые соединения.

Многослойный печатный монтаж позволяет уменьшить габаритные размеры вследствие повышения плотности монтажа и трудоемкость выполнения монтажных соединений. При этом хорошо решается задача пересечения и распределения проводников. Однако технологический процесс изготовления МПП является трудоемким.

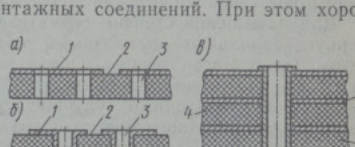


Рис. 12.1. Сечения печатных плат:
а — односторонней; *б* — двусторонней; *в* — многослойной; *1* — медные проводники; *2* — диэлектрик; *3* — отверстие; *4* — межслойная изоляция

Гибкая печатная плата (рис. 12.2, *а*) имеет гибкое основание. По расположению проводников она аналогична обычной двусторонней печатной плате.

Гибкий печатный кабель (рис. 12.2, *б*) состоит из тонких полосок *1* проводящего материала (обычно меди), расположенных параллельно и заклеенных между двумя пленками *2* изоляционного материала (стеклоэпоксид и др.). Число проводников может быть от 2 до 50; их ширина и межцентровые расстояния подходят под стандартные разъемы.

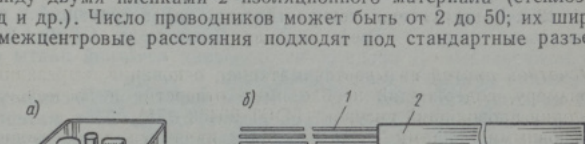


Рис. 12.2. Гибкий печатный монтаж:
а — гибкая печатная плата; *б* — гибкий печатный кабель

Печатные платы выполняют прямоугольной формы. Максимальный размер любой из сторон не должен превышать 470 мм. При увеличении размеров плат снижается их жесткость и виброустойчивость.

Основания печатных плат изготовляют из изоляционного материала, который должен хорошо сцепляться с металлом проводников; иметь диэлектрическую проницаемость не более 7 (во избежание возникновения значительных паразитных емкостей между печатными проводниками) и малый тангенс угла диэлектрических потерь; обладать достаточно высокой механической и электрической прочностью; допускать возможность обработки резани-

ем и штамповкой; сохранять свои свойства при воздействии климатических факторов, а также в процессе создания рисунка схемы и пайки. Таким требованиям удовлетворяют гетинакс, стеклотекстолит и некоторые другие фольгированные и нефольгированные материалы.

Фольгированные материалы представляют собой слоистые прессованные пластики, пропитанные искусственной смолой и облицованные с одной или двух сторон медной электролитической фольгой толщиной 18,35, 50 мкм. К таким материалам относится фольгированный стеклотекстолит, выпускаемый листами с размерами не менее 400×660 при толщине листа до 1 мм и не менее 600×700 мм при толщине листа более 1,5 мм.

Фольгированные диэлектрики марок СФ (СФ-1-35, СФ-2-35 и др.) рекомендуются для изготовления печатных плат, эксплуатируемых при t до 120°С. Более высокими физико-механическими свойствами и теплостойкостью обладает стеклотекстолит марок СФПН-1-50; СФПН-2-50. Диэлектрик слофодит имеет медную фольгу толщиной 5 мкм, которую получают испарением меди в вакууме на медном или алюминиевом протекторе толщиной 70 мкм. В дальнейшем протектор снимается механическим способом при незначительном усилии. Для МПП и ГПП применяют теплостойкий диэлектрик марок СТФ-1, СТФ-2 и травящийся стеклотекстолит марок ФТС-1; ФТС-2. Диэлектрик СТЭФ.1-2ЛК нефольгированный. В процессе изготовления печатной платы его поверхность металлизируется слоем меди.

В качестве материала для печатных проводников используют медь с содержанием примесей не свыше 0,05%. Этот материал обладает высокой электрической проводимостью, относительно стоек по отношению к коррозии, хотя и требует защитного покрытия. При печатном монтаже допустимую токовую нагрузку на элементы проводящего рисунка в зависимости от допустимого превышения температуры проводника относительно температуры окружающей среды выбирают: для фольги — от 100 до 250 А/мм², а для гальванической меди — 60 ... 100 А/мм² (ГОСТ 23751—86), что значительно больше плотности тока, допустимой для круглых проводников.

Благодаря малой массе и развитой поверхности печатного проводника сила сцепления его с основанием оказывается достаточной, чтобы выдержать воздействующие на проводник знакопеременные механические перегрузки до $40g$ в диапазоне частот от 4 до 200 Гц. Толщина проводника принимается 18,35, 50 мкм. Наименьшая ширина проводников и расстояние между ними (пробельные участки) выбираются в зависимости от класса печатной платы (ГОСТ 23751—86). По плотности проводящего рисунка печатные платы и ГПК делятся на пять классов: первый класс характеризуется наименьшей плотностью проводящего рисунка, а пятый — наиболее высокой плотностью рисунка. Наи-

меньшие номинальные значения ширины печатных проводников и пробельных участков для плат первого класса плотности составляют 0,75 мм, а для пятого — 0,10 мм. В широких частях проводника (свыше 2,5 мм) необходимо делать круглые точечные, кольцевые или щелевидные разрывы (рис. 12.3, *а*), которые предотвращают вспучивание фольги при пайке погружением, так как эти отверстия обеспечивают выход газов.

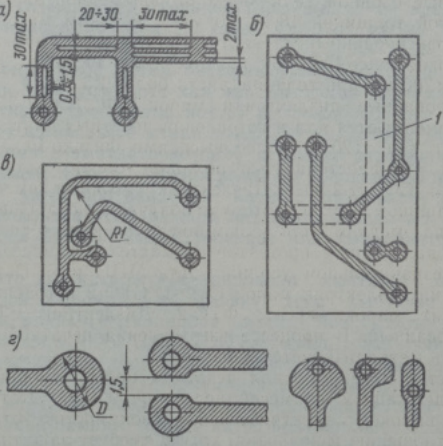


Рис. 12.3. Конструктивное выполнение элементов печатных плат:

а — проводники со щелевидными разрывами; *б* — перемычка; *в* — переходы в печатных проводниках; *г* — контактные площадки

При одностороннем монтаже соединение пересекающихся проводников выполняют путем установки перемычек *1* из медного луженого провода (рис. 12.3, *б*). Перемычку ставят со стороны навесных элементов. Форма, протяженность и расположение печатных проводников могут быть произвольными в зависимости от конструктивных особенностей схемы. Однако во всех случаях не допускаются резкие перегибы, острые углы и переходы (рис. 12.3, *в*). Радиус закругления в местах перехода должен быть не менее 1 мм. Резкое изменение ширины и острые углы снижают механическую прочность сцепления проводников с основанием, и в процессе нагрева при пайке возможно отслаивание. Плавный переход устраняет местные перенапряжения и тем самым компенсирует разницу в тепловых деформациях фольги и диэлектрика.

Соединение печатного проводника с навесными элементами осуществляется контактными площадками круглой, прямоугольной и другой формы (рис. 12.3, *г*). Для образования контактной площадки проводник в местах пайки расширяется до диаметра на 2,5 ... 3 мм больше диаметра отверстия. Если расстояние между соседними проводниками небольшое, то можно сделать срез. Размер контактного отверстия берется больше диаметра вывода (или диагонали сечения для прямоугольного вывода) на 0,4 мм и округляется до ближайшего большего значения из ряда рекомендуемых: от 0,4 до 3 мм через 0,1 мм, кроме размеров 1,9 и 2,9 (ГОСТ 10317—79).

На одной плате нецелесообразно иметь более трех значений разных диаметров отверстий, так как это затрудняет их обработку в связи с необходимостью частой смены инструмента.

В каждое монтажное отверстие платы вставляется только один вывод от навесного элемента. Многоконтактные элементы с расположением выводов по окружности ставят геометрическим центром на пересечении линий координатной сетки. При этом центр хотя бы одного отверстия должен быть расположен на одной из вертикальных или горизонтальных линий координатной сетки.

Размеры печатных проводников и монтажных отверстий на чертежах печатных плат указывают с помощью координатной сетки в прямоугольной системе координат. Правила выполнения чертежей печатных плат (ГОСТ 2.417—78) предусматривают также нанесение координатной сетки в полярной системе координат и указание размеров при помощи размерных и выносных линий. Допускается комбинированный способ указания размеров. Основной шаг координатной сетки в двух взаимно перпендикулярных направлениях принимается равным 2,5 мм. При использовании шага координатной сетки менее основного следует применять шаг, равный 1,25; 0,625 и (0,5) мм (ГОСТ 10317—79). Координатную сетку наносят сплошными тонкими линиями.

За начало координат принимают центр крайнего левого нижнего конструктивного или технологического отверстия (рис. 12.4, *а*—*в*). Допускается за начало координат принимать левый нижний угол платы (рис. 12.4, *г*) или точку, образованную линиями построения плат. Центры монтажных отверстий *1*—*8* располагаются в точках пересечения координатной сетки и задаются следующими способами: нумерацией отверстий с занесением размеров их координат в таблицу (рис. 12.4, *а*), нумерацией линий координатной сетки (рис. 12.4, *б*), указанием размеров координат в мм (рис. 12.4, *в*).

Проводники на чертеже изображаются одной линией, являющейся осью симметрии проводника. При ширине проводника более 2,5 мм они могут изображаться двумя линиями и выделяться зачернением или штриховкой (рис. 12.4, *в*).

12.2. Механическая обработка печатных плат

Механическая обработка является весьма ответственным этапом изготовления печатных плат и должна выполняться с большой тщательностью. Механические повреждения заготовки платы

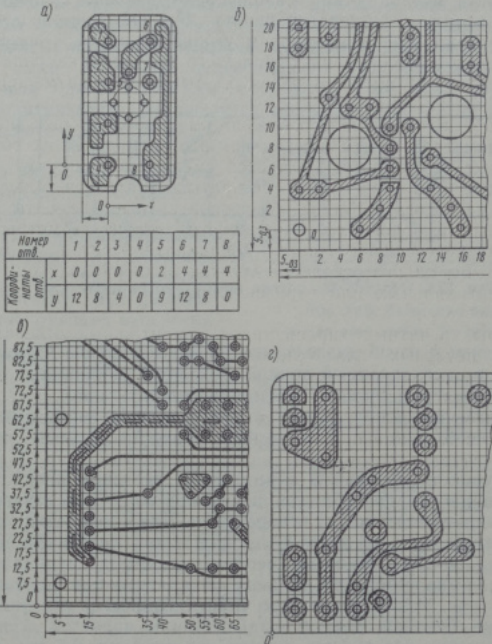


Рис. 12.4. Способы указания начала координат монтажных отверстий

(царапины, вмятины и др.) могут явиться причиной брака на последующих операциях. Например, большие усилия при закреплении платы могут вызвать расслаивание материала и печатные проводники могут частично отделяться от материала.

Основными этапами механической обработки являются входной контроль материала, получение заготовки, сверление монтажных отверстий, обработка по контуру.

Входной контроль фольгированного диэлектрика заключается в проверке размеров листа, состояния поверхности со стороны фольги и диэлектрика, прочности сцепления фольги в исходном состоянии и при воздействии расплавленного припоя, гальванических растворов и других факторов, способности материала к механической обработке, поверхностного сопротивления и некоторых других параметров (ГОСТ 10316—78). При визуальном осмотре листов устанавливается наличие царапин, проколов, пузырей и других повреждений.

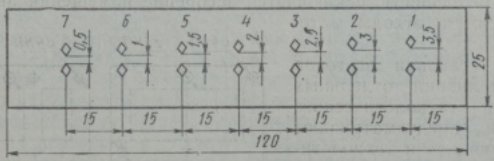


Рис. 12.5. Образец для оценки штампуемости материала

Коробление и изгиб диэлектрика проверяют путем погружения материала в расплавленный припой. При этом выявляются трещины на поверхности и дефекты сцепления между слоями.

Прочность сцепления фольги с диэлектриком характеризуется усилием, необходимым для отрыва полоски фольги от основания.

Штампуемость материала определяется его способностью подвергаться обработке без образования сколов по граням отверстий и трещин в перемычках между отверстиями. Для проведения испытаний на штампуемость из листа фольгированного материала вырезают образцы в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В каждом из них пробивают по 7 пар квадратных или ромбических отверстий (рис. 12.5) с постепенно уменьшающимися расстояниями между ними. Высшей оценкой штампуемости является степень 7, соответствующая расстоянию между отверстиями 0,5 мм, а низшей — степень 1, соответствующая расстоянию 3,5 мм.

Фольгированные стеклотекстолиты при толщине 1,5 мм имеют степень штампуемости не ниже 5, а гетинаксы — не ниже 4.

Способность материала к сверлению определяется пробной обработкой. Изготовление шлифа просверленного отверстия позволяет установить наличие прожигания при сверлении и оплавления поверхности отверстия или наличие шероховатости из торчащих волокон, затрудняющих проведение металлизации отверстий.

Получение заготовки. Заготовку отрезают с припуском по контуру на одну или несколько плат (рис. 12.6, *а*). Групповые заготовки

применяют для небольших по размерам плат (рис. 12.6, *б*). Они обеспечивают лучшее использование материала и повышение производительности при выполнении ряда операций. Ширина технологического поля (припуска) составляет 10 мм для ОПП и 30 мм для МПП.

Резка листа из фольгированного и нефольгированного материала может производиться дисковой фрезой. Для охлаждения применяют сжатый воздух. Необходимо предусматривать отсос образующейся пыли. Наиболее целесообразно резку осуществлять на роликовых или гильотинных ножницах. При этом повышается производительность, исключается засорение помещения пылью и сокращаются отходы материала.

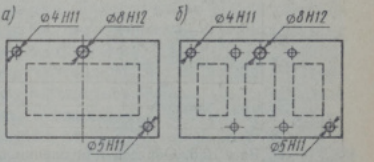


Рис. 12.6. Заготовка платы:
а — на одну деталь; *б* — групповая

Для установки заготовок при выполнении отдельных операций технологического процесса предусматривают фиксирующие и технологические отверстия. В групповой заготовке изготовляют два фиксирующих отверстия на всю заготовку или для каждой платы (рис. 12.6, *б*). Если фиксирующие отверстия используют для установки платы при сверлении отверстий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), то они располагаются в нижней части заготовки параллельно длинной стороне.

Фиксирующие и технологические отверстия изготовляют пробивкой или сверлением. Пробивку обычно применяют при толщине материала до 0,5 мм. Она выполняется на кривошипных прессах или специальных приспособлениях.

Сверление монтажных отверстий. Сверление выполняют в кондукторе спиральным сверлом из твердого сплава с углом при вершине сверла 122...130° без применения охлаждающей жидкости. Заготовки при этом собирают в пакет толщиной не более 4,5 мм. Шероховатость поверхности просверленного отверстия не должна превышать 10 мкм по параметру *Ra*. Для повышения точности отверстия развертывают. Все отверстия, подлежащие металлизации, получают сверлением, так как пробитые отверстия имеют плохое качество поверхности и непригодны для металлизации.

Диаметр просверленного отверстия должен быть больше окончательного на 0,1 мм, что позволяет нанести слои меди толщиной 25 мкм и припоя толщиной 10 мкм. Монтажные отверстия сверлят на станках с ЧПУ. Станки должны обеспечивать частоту вращения шпинделя не менее 10 000 1/мин, механическую подачу не более 0,1 мм/об, биение сверла не более 0,02 мм, усилие прижима во-

круг обрабатываемого отверстия 1,5...2,0 МПа, дискретность координатных перемещений. Использование смазывающей и охлаждающей жидкостей при сверлении не допускается.

Качественное сверление имеет существенное значение для получения хороших металлизированных отверстий. Стенки отверстий должны быть гладкими, без заусенцев, расслаивания, ожогов и вмятин диэлектрика. Они должны быть перпендикулярными наружной поверхности платы и свободными от следов инструмента, смазочных веществ и стружки. Неровности стенок вызывают образование неметаллизированных участков в отверстиях и впоследствии неполное покрытие припоем. Остатки смазки в отверстиях препятствуют осаждению меди. Основной причиной, вызывающей получение недоброкачественных отверстий, является низкая стойкость и износ режущих кромок инструмента, что приводит к возрастанию сил резания. Особенно интенсивный износ происходит при обработке стеклотекстолита.

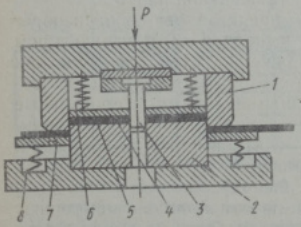


Рис. 12.7. Схема штампа совмещенного действия

Обработка по контуру. Окончательный контур платы (на рис. 12.6 показан пунктиром) получают вырубкой или фрезерованием после изготовления печатных проводников. Такое построение технологического процесса объясняется тем, что травитель, используемый при производстве печатных плат, может глубоко проникать в диэлектрик и вызывать короткие замыкания и низкое сопротивление изоляции. Наружный контур получают отрезкой на гильотинных ножницах или на прецизионной алмазной пиле, вырубкой в штампе или фрезерованием.

Вырубка по контуру может совмещаться с пробивкой отверстий, пазов и других элементов платы, не подлежащих металлизации.

Основными частями комбинированного штампа (рис. 12.7) являются матрица *1* и пуансон *2* для вырубки наружного контура и пуансон *3* для пробивки отверстий. Прижим *5* посредством пружин *6* создает большое давление на материал *4* перед входом пуансона. Снятие материала, остающегося на пуансоне *2*, производится выталкивателем *7* с помощью пружин *8*. Усилие прижима необходимо сосредоточить как можно ближе к поверхности среза. Для этого на съемнике выполняют выступающие ленточки шириной 2...3 мм и высотой 1 мм. При фрезеровании платы собирают в пакет. Между платами прокладывают кабельную бумагу. Метод получения наружного контура платы зависит от типа производства и конфигурации платы.

12.3. Получение рисунка печатной платы

Основными методами получения защитного рисунка печатной платы являются фотопечать и трафаретная печать.

Фотопечать. Фотопечать представляет собой способ нанесения изображения рисунка печатных проводников на материал основания, покрытый светочувствительным слоем (фоторезистом), экспонируемым через фотошаблон с требуемым изображением.

Фотошаблон рисунка печатной платы — это негативное или позитивное изображение требуемого рисунка в масштабе 1 : 1 на стеклянной фотопластинке или пленочном материале, полученное путем фотографирования с оригиналов рисунка печатной платы.

Оригинал рисунка печатной платы представляет собой изображение технологического слоя платы, выполненное в увеличенном масштабе, обычно в позитивном изображении. При этом рисунок оригинала соответствует рисунку чертежа платы по степени почернения (проводники и контактные площадки черные, а пробельные места белые). Если на плате имеются экраны, занимающие большую площадь, то оригиналы рисунка печатной платы выполняют в негативном изображении (рисунок оригинала противоположен рисунку печатной платы по степени почернения).

Для получения оригиналов рисунка печатной платы применяют вычерчивание, наклеивание липкой ленты, резание по эмали и другие способы.

Вычерчивание оригинала печатной платы производят на специальной чертежной бумаге с помощью сдвоенных рейсфедеров, плакатных перьев, лекал и др. Для ускорения процесса вычерчивания рекомендуется на бумагу предварительно нанести типографским способом координатную сетку. Вследствие высокой трудоемкости и низкой точности этот способ используется редко.

Наклеивание липкой ленты значительно сокращает трудоемкость изготовления оригинала печатной платы. При этом на бумагу с координатной сеткой, наклеенную на недеформирующуюся основу (стекло, алюминий и др.), наносят центры монтажных отверстий и контактные площадки, а проводники получают приклеиванием непрозрачной липкой ленты.

Резание по эмали применяют для плат, требующих высокой точности выполнения проводников. Толщина слоя эмали, наносимого на заготовки из стекла, составляет 30...50 мкм. Эмаль наносят краскораспылителем в несколько слоев. После сушки заготовку устанавливают на стол координатографа. Головка, в которой закреплен резец, может перемещаться по координатным осям и прорезать контуры элементов печатной схемы с точностью $\pm 0{,}05$ мм. Надрезанную эмаль удаляют пинцетом. Если оригинал изготовляют в позитивном изображении, то ее удаляют с пробельных мест. Высокая точность изготовления оригинала печатной платы позволяет применять сравнительно небольшое увеличение при его изготовле-

нии и получать фотошаблоны более высокой точности (в 8...10 раз), чем при ручном способе.

Для определения размеров оригинала печатной платы при фотографировании и для совмещения фотошаблонов на технологическом поле оригинала печатной платы выполняют кресты и другие реперные знаки. Кресты, выполненные по углам (рис. 12.8, *а*), предназначены для проверки точности соблюдения заданного масштаба уменьшения при фотографировании. Два из них, расположенные по диагонали или по большой стороне, используют в дальнейшем для пробивки базовых отверстий, а пятый крест — для ориентирования. При изготовлении печатных плат, не требующих высокой точности, допускается использование при фотографировании в качестве базового размер между наиболее удаленными контактными площадками (размер *А*).

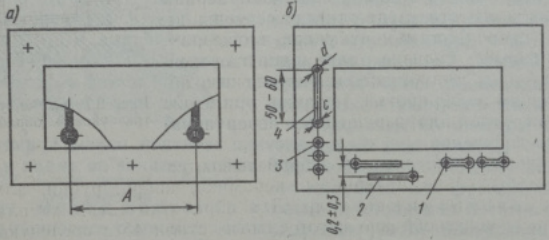


Рис. 12.8. Пример выполнения фотооригинала:
а — односторонней печатной платы; *б* — тест-платы; *с* — диаметр контактной площадки под отверстие минимального диаметра; *d* — диаметр контактной площадки под отверстие максимального размера

На технологическом поле платы могут предусматриваться следующие элементы для контроля параметров печатной платы (рис. 12.8, *б*): *1* — для определения числа перепаек; *2* — для контроля прочности сцепления фольги с диэлектриком; *3* — для контроля сопротивления изоляции между отверстиями; *4* — для контроля сопротивления изоляции между проводниками.

Недостатком рассмотренных методов получения фотошаблонов является необходимость масштабного фотографирования. Этот недостаток устраняется при получении требуемой схемы в масштабе 1 : 1 непосредственно на фотопластинке сканирующим световым лучом с помощью координатографа. Последний позволяет наносить изображения прямолинейных линий шириной 0,25...4 мм и контактные площадки различной конфигурации. Рисунок печатного монтажа кодируется и переносится на перфоленту, которая помещается в считывающее устройство координатографа. Информация одного кадра вводится в блок управления, где преобразуется в импульсы

для шаговых двигателей. Последние работают раздельно, перемещая координатный стол по оси x или y. При совместной работе двигателей стол перемещается под углом 45°. Точность установки координат ± 25 мкм. Форму и размеры контактных площадок определяют диафрагмы. Сменные диски содержат от 16 до 32 различных по конфигурации диафрагм. Требуемые размеры и яркость светового луча обеспечивается оптической головкой.

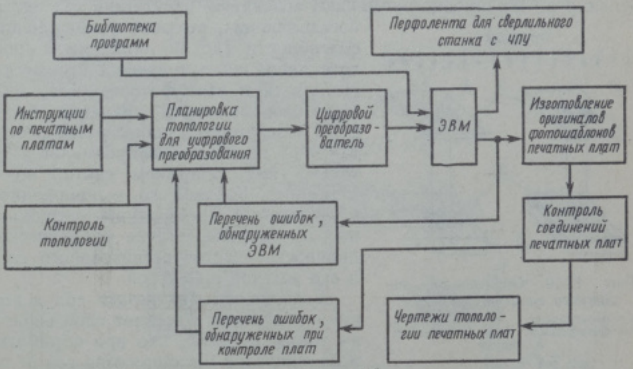


Рис. 12.9. Схема системы автоматизированного проектирования печатных плат

Наиболее целесообразным является получение оригиналов фотошаблонов в системах автоматизированного проектирования печатных плат (рис. 12.9).

Фоторезисты представляют собой тонкие пленки органических растворов, которые должны обладать свойствами после экспонирования полимеризоваться и переходить в нерастворимое состояние. Основные требования, предъявляемые к фоторезистам, — высокая разрешающая способность, светочувствительность, устойчивость к воздействию травителей и различных химических растворов, хорошая адгезия с поверхностью изделия.

Под *разрешающей способностью фоторезиста* понимается число линий, которое можно нанести на один миллиметр поверхности платы с расстоянием между ними, равным их ширине. Разрешающая способность зависит от вида фоторезиста и толщины слоя. При тонких слоях она больше, чем при толстых.

По способу образования рисунка фоторезисты делятся на негативные и позитивные (рис. 12.10).

Участки *негативного фоторезиста*, находящиеся под прозрачными участками фотошаблона, под действием света получают свойство не растворяться при проявлении. Участки фоторезиста, расположенные под непрозрачными местами фотошаблона, легко удаляются при проявлении в растворителе. Таким образом создается рельеф, представляющий собой изображение светлых элементов фотошаблона (рис. 12.10, *а*).

Негативные фоторезисты изготовляют на основе поливинилового спирта. Их широко применяют вследствие отсутствия токсичных составляющих, высокой разрешающей способности (до 50 линий/мм), простоте проявления и низкой стоимости. Недостатком этих фоторезистов является невозможность хранения более 3 ... 5 ч заготовок с нанесенным слоем, так как последний задубливается не только под действием света, но и в темноте. Кроме того, с понижением влажности и температуры окружающей среды уменьшается механическая прочность светочувствительного слоя и его адгезия с фольгой.

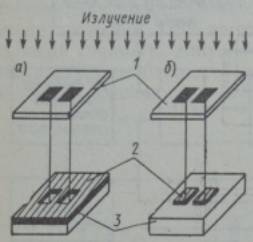


Рис. 12.10. Образование защитного слоя фоторезиста:
а — негативного; *б* — позитивного; *1* — фотошаблон; *2* — фоторезист; *3* — плата

Позитивный фоторезист под действием облучения изменяет свои свойства таким образом, что при обработке в проявителях растворяются его облученные участки, а необлученные (находящиеся под непрозрачными участками фотошаблона) остаются на поверхности платы (рис. 12.10, *б*).

Для позитивных фоторезистов применяют материалы на основе диазосоединений, которые состоят из светочувствительной полимерной основы (новолачной смолы), растворителя и некоторых других компонентов. По адгезионной и разрешающей способности они превосходят негативные фоторезисты, но имеют более высокую стоимость и содержат токсичные растворители. Разрешающая способность позитивных фоторезистов составляет до 350 линий/мм. Достоинством позитивного фоторезиста является отсутствие дубления при хранении заготовок с нанесенным светочувствительным слоем.

В технологическом процессе производства печатных плат применяют жидкие и сухие фоторезисты.

Жидкие фоторезисты наносят погружением (окунанием), поливом с центрифугированием, накатыванием ребристым роликом и другими способами.

Погружение (рис. 12.11, *а*) является самым простым способом, который дает возможность получить слой фоторезиста на двух сторонах платы.

Плата *7*, закрепленная в держателе *6*, погружается в сосуд *8* с фоторезистом. Держатель связан с блоком движения, снабженным электродвигателем *1*, который через редуктор *2* вращает шкив *3*. При этом ползун *5* перемещается в направляющих *4*. Блок движения уравновешивается грузом *9*. Толщина получаемых слоев фоторезиста зависит от скорости, с которой плата извлекается из ванны. Для получения толстых слоев используют многократное окунание с промежуточной сушкой каждого слоя.

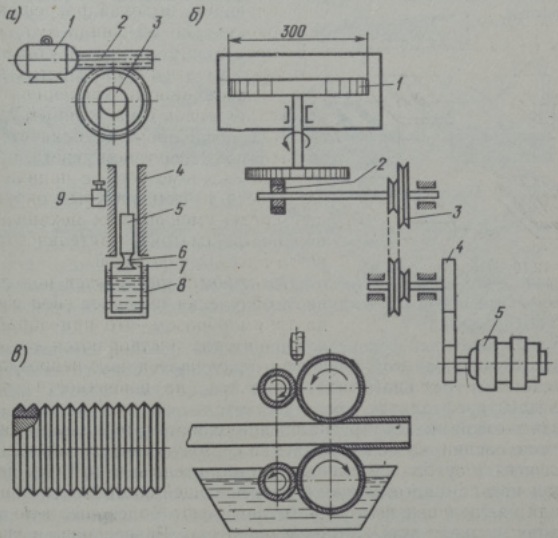


Рис. 12.11. Методы нанесения жидкого фоторезиста:
а — погружением; *б* — центрифугированием; *в* — накатыванием ребристым роликом

Поливом с центрифугированием можно получить почти беспористое покрытие. Плату устанавливают на планшайбу *1* (рис. 12.11, *б*), которая получает вращение от электродвигателя *5* через зубчатые колеса *4*, шкив *3* и фрикционный ролик *2*. Изменяя расстояние между роликом и осью вращения планшайбы, можно регулировать частоту ее вращения. Фоторезист наносят во время первых оборотов центрифуги, а затем частоту вращения увеличивают. Толщина получаемого покрытия зависит от вязкости фоторезиста и частоты вращения центрифуги. Для получения тонких пленок

используют высокую частоту вращения, при этом необходимы фоторезисты с достаточно низкой вязкостью. Толщина слоя обычно составляет от 2 до 4 мкм, а неравномерность толщины 0,5 ... 1,0 мкм.

Накатывание фоторезиста ребристым роликом (рис. 12.11, *в*) обеспечивает большую равномерность нанесенного слоя. Канавки на поверхности ролика служат резервуаром для фоторезиста.

Недостатки жидких фоторезистов — малая толщина и неравномерность слоя покрытия, большая трудоемкость процесса нанесения и невозможность его использования для нанесения на платы с отверстиями.

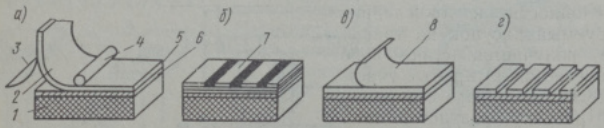


Рис. 12.12. Последовательность фотопечати с применением сухого фоторезиста:
а — нанесение фоторезиста; *б* — экспонирование; *в* — отделение несущей пленки; *г* — удаление неэкспонированных участков

Сухие фоторезисты в настоящее время получили широкое применение. Они заменили жидкие, так как более технологичны и просты в употреблении.

Сухой пленочный фоторезист представляет собой тонкую пленку, полимеризующуюся под действием ультрафиолетового облучения. Он состоит из трех слоев: оптически прозрачной пленки (обычно полиэтилентерефталата), светочувствительного полимера и защитной лавсановой пленки. Покрывающие пленки предохраняют фоторезист от механических повреждений и возможного загрязнения.

Нанесение сухого пленочного фоторезиста (рис. 12.12) осуществляется при помощи валкового механизма (ламинатора). Накатывающий валик *4* оснащен устройством для обеспечения заданного давления на заготовку *1*. Процесс происходит при повышенной температуре. При этом защитная пленка *3* удаляется, а открытая поверхность полимера *5* приклеивается к медной фольге *6*, так как адгезия светочувствительного полимера к фольге больше, чем к несущей пленке *2*. В результате экспонирования на плате образуется изображение светлых мест фотошаблона *7*. Оптически прозрачная пленка *8* отделяется от несущей поверхности, и изображение проявляется в воде. При этом неэкспонированные участки удаляются.

Метод фотопечати обеспечивает высокую разрешающую способность, позволяющую получать проводники, ширина которых и расстояние между ними составляет 0,1 мм.

Трафаретная печать (сеткографический метод). Метод основан на получении необходимого рисунка схемы на поверхности медной

фольги путем продавливания защитной краски резиновым ракелем через сетчатый трафарет. Сетки для трафаретов изготовляют из капроновых или лавсановых нитей. Более высокая точность рисунка схемы получается при использовании сетки из фосфористой бронзы или нержавеющей стали диаметром 35...40 мкм. Размер ячейки трафарета составляет 60...80 мкм. Металлическая сетка выдерживает большое число оттисков и применяется в серийном производстве. Недостатками ее по сравнению с шелковой сеткой являются малая эластичность и склонность к окислению. Требуемый рисунок на трафарете получается с помощью фоторезистов. Открытые участки сетки трафарета соответствуют рисунку печатной платы.

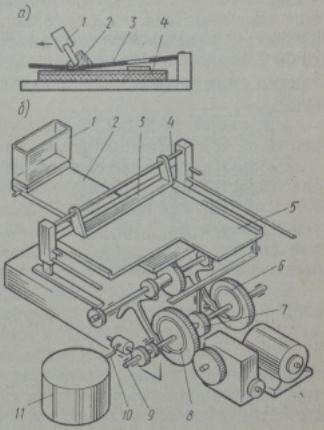


Рис. 12.13. Нанесение защитного слоя через трафарет:
а — принципиальная схема; *б* — схема автомата

Краска для защитного слоя должна обладать высокой кислотостойкостью, хорошей адгезией с платой, минимальным временем сушки и сметанообразной консистенцией. Жидкая краска дает расплывчатое изображение, а густая трудно продавливается через трафарет. Печатные свойства краски и их адгезионная способность зависят от связующего вещества, в качестве которого используют различные смолы с олифами. В состав краски входят также растворители (керосиновая фракция, уайт-спирит и др.), разбавитель и компоненты, улучшающие вязкость, пластичность, растекаемость и адгезионные свойства краски. Наиболее широко используют краску СТЗ.12—51 и гальваностойкую краску СТЗ.13.

При нанесении краски вручную (рис. 12.13, *а*) плату *4* устанавливают по базовым технологическим отверстиям и наносят некоторое количество краски, обеспечивающее образование валика *2* вдоль всей длины шпателя *1* при его движении по трафарету *3*. Волна краски перед шпателем является своеобразным резервуаром, обеспечивающим с некоторым избытком весь процесс печати. Отпечатанную плату помещают в сушилку. Сушку осуществляют до тех пор, пока плату можно будет взять в руки без опасения повредить оттиск. В случае двусторонней платы таким же образом наносят схему с другой стороны платы.

Машинная печать предусматривает осуществление тех же операций, что и ручная. Движение шпателя, подача резиста и подъем трафарета автоматизированы. Платы подаются на рабочую позицию (рис. 12.13, *б*) из магазина *1* столом *2*, снабженным вакуумным присосом. Вакуумный насос *11* включается переключателем *10*. Движением стола управляет кулачок *8*, сидящий на распределительном валу *9*. Сетчатый трафарет *5*, закрепленный в рамке, может перемещаться в вертикальном направлении от кулачка *7*. Рабочий ход ракеля *3* осуществляется при движении стола от кулачка *6*. В конце рабочего хода ракель поворачивается вокруг оси *4*, вакуум снимается и плата с нанесенным рисунком направляется на сушку.

Получение рисунка схемы методом трафаретной печати на 60% дешевле, чем фотохимическим.

Однако метод трафаретной печати имеет малую разрешающую способность, которая определяется размером ячеек в сетке (обычно 0,08 мм). Так как краска растекается, то разрешающая способность уменьшается до 0,10...0,15 мм. Трафаретную печать используют в том случае, если ширина проводников и расстояние между ними более 0,3 мм, точность переноса изображений не выше 0,1 мм.

Типичные дефекты трафаретной печати — поры и проколы в слое нанесенного резиста, неровные края проводников, неравномерная толщина. Основными причинами дефектов являются запыленность помещения, несоответствующая вязкость резиста, износ трафарета, царапины на трафарете, возникающие от твердых частиц, попадающих в краску. На свойство красок существенно влияют климатические условия на участке (температура, влажность).

12.4. Химические и гальванические процессы изготовления печатных плат

Основное назначение химических и гальванических процессов заключается в металлизации монтажных отверстий и защите рисунка печатной платы при травлении.

Типовой технологический процесс химической и гальванической металлизации печатных плат (ГОСТ 23770—79) состоит из этапов подготовки поверхности, сенсибилизации, активации, химического и гальванического меднений, гальванического осаждения сплава SnPb.

Подготовка поверхности монтажных отверстий печатных плат заключается в гидроабразивной обработке, подтравливании диэлектрика в отверстиях серной кислотой и фтористым водородом, промывки в проточной воде.

Сенсибилизация (повышение чувствительности к меди) осуществляется в растворе двухлористого олова, соляной кислоты и металлического олова в течение 5...7 мин с последующей промывкой в дистиллированной воде. В результате сенсибилизации на поверхно-

сти стенок отверстий адсорбируется пленка ионов двухлористого олова, являющаяся восстановителем для палладия.

Активация проводится в водном растворе двухлористого палладия и аммиака в течение 5...7 мин. Металлический палладий служит центром кристаллизации при химическом меднении. Для сокращения технологического цикла и улучшения качества металлизации используют совмещенный активирующий раствор, в состав которого входят соли палладия и олова.

Химическое меднение состоит в восстановлении меди на активированных поверхностях из раствора, в который входят соли меди, никеля, формалина, соды и др. Время осаждения слоя меди толщиной 0,25 ... 0,5 мкм составляет 15 ... 20 мин. Для облегчения удаления водорода, выделяющегося в процессе меднения, и для лучшего смачивания отверстий раствором процесс ведется с плавным покачиванием плат или с наложением ультразвукового поля. Осадки меди в этом случае имеют более плотную структуру, что объясняется лучшими условиями для удаления водорода, закрывающего поверхность диэлектрика.

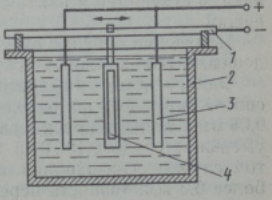


Рис. 12.14. Схема гальванического меднения печатных плат

Гальваническую металлизацию применяют для увеличения тонкого слоя меди, полученного при химической металлизации до толщины 5...8 мкм, и последующего образования проводящего рисунка схемы с толщиной меди в отверстиях 25 мкм.

Гальваническое меднение требует замкнутого контура проводящих покрытий, которое осуществляется технологическими проводниками, прошивкой отверстий медной проволокой и применением специальных рамок. Медь наращивают в сернокислом, борфтористо-водородном и других электролитах. При продолжительном воздействии электролита на изоляционное основание возможно ухудшение его диэлектрических свойств.

Нанесение гальванических покрытий осуществляют в ваннах (рис. 12.14).

Плату *4* зажимают в металлической рамке и подвешивают на шине *1*, установленной в ванне *2* с электролитом. Шину подключают к отрицательному источнику тока, а электроды *3*, изготовленные из электролитической меди, — к положительному источнику тока. На плате, которая является катодом, осаждается медь. Для получения хорошего покрытия на стенках отверстий предусматривается перемещение рамки, что обеспечивает постоянное обновление электролита в отверстиях.

Важным технологическим параметром является *рассеивающая способность процесса*, от которой зависит отношение толщины по-

крытия в отверстии к толщине покрытия на поверхности платы. Так как это отношение не может быть больше единицы, то необходимо наносить более толстый слой на поверхность платы, чтобы получить слой заданной толщины в отверстии.

Гальваническое осаждение сплава «олово — свинец» толщиной 8...20 мкм производится с целью предохранения проводящего рисунка при травлении плат и обеспечения хорошей паяемости. Возможно применение специальных покрытий (палладий, золото и др.) толщиной 2...5 мкм. Осаждение гальванических сплавов более сложно, что вызвано необходимостью поддержания определенного состава покрытия. Адгезия гальванического покрытия зависит от качества подготовки поверхности для металлизации и соблюдения режимов процесса.

Травление является химическим процессом, при котором участки медной фольги, не защищенные резистом, удаляются с поверхности диэлектрического основания, а участки, покрытые резистом, сохраняются и формируют рисунок печатной платы. В качестве резиста используются фоторезист, трафаретная краска или устойчивый к воздействию травителей гальванически нанесенный слой оловянно-свинцового сплава (припоя) или благородных металлов. Процесс травления включает в себя предварительную очистку, собственно травление металла, очистку после травления и удаления фоторезиста.

Травление печатных плат с рисунками, защищенными сплавами на основе олова-свинца или благородных металлов, производится в растворах на основе хлорной меди (ГОСТ 23727—79). Такие растворы имеют низкую стоимость, просты в приготовлении и легко удаляются с платы после травления. Если рисунок платы защищен печатными красками, то травление производится в железомедном хлоридном растворе.

Травление набрызгиванием производится в ваннах (рис. 12.15, *а*). Плата *2* закрепляется в обойме *1* и устанавливается в ванне *6* на небольшом расстоянии от поверхности травильного раствора *5*. Сетка *3* защищает ротор *4* от случайного попадания деталей.

Травильный раствор *5* набрызгивается на плату вращающимися лопастями ротора, установленного на дне ванны. По ходу процесса концентрация раствора изменяется и содержание ванны необходимо своевременно корректировать.

Травление набрызгиванием обеспечивает равномерное удаление фольги и малое ее подтравливание. Однако этим методом можно обрабатывать одновременно небольшое количество плат при невысокой скорости травления.

Струйное травление обеспечивает высокую производительность. Травитель под высоким давлением через систему сопл распыляется на поверхность платы (рис. 12.15, *б*). С поверхностью платы постоянно соприкасается свежий раствор, поступающий из

сопла, что обеспечивает высокую скорость травления. Этот метод является универсальным и обеспечивает травление с высокой разрешающей способностью.

Время травления сокращается при повышении температуры раствора (до 40°С), увеличении силы удара струи травильного раствора о поверхность платы и количества воздуха, подаваемого в раствор. В зависимости от перечисленных факторов время травления фольги толщиной 35 мкм может составлять 2...12 мин.

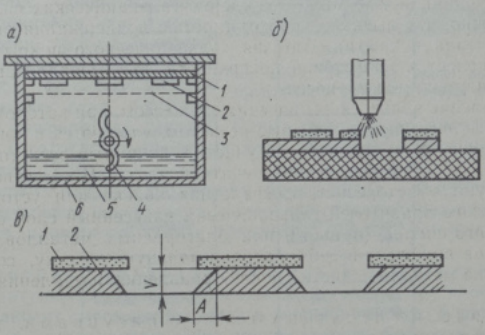


Рис. 12.15. Травление фольги:
а — набрызгиванием; *б* — распылением; *в* — проводники после травления (*1* — фоторезист, *2* — фольга)

Травящий раствор действует со всех сторон и вызывает нежелательные боковые подтравливания (рис. 12.15, *в*), которые оцениваются коэффициентом травления $K=v/A$, где v — толщина фольги; A — боковое подтравливание.

Для уменьшения подтравливания следует применять тонкую (18 мкм) или сверхтонкую (5 мкм) фольгу.

Защитный слой трафаретной краски или фоторезиста снимают в щелочных растворах. Для снятия некоторых красок используется дополнительное механическое воздействие вращающихся щеток. После травления необходима тщательная промывка в горячей проточной воде для удаления травителя.

12.5. Типовые технологические процессы изготовления печатных плат

Все процессы изготовления печатных плат можно разделить на субтрактивные, аддитивные и полуаддитивные.

Субтрактивный процесс (subtractio — отнимать) получения проводящего рисунка заключается в избирательном удале-

нии участков проводящей фольги путем травления; аддитивный процесс (additio — прибавлять) — в избирательном осаждении проводящего материала на нефольгированный материал основания;

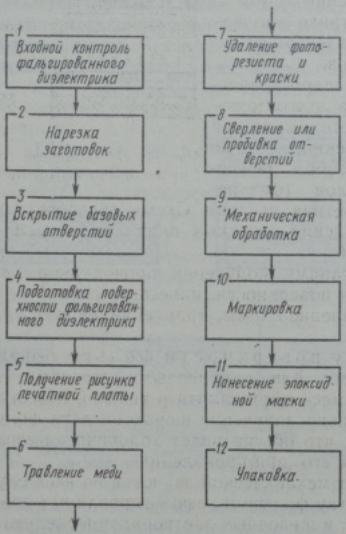


Рис. 12.16. Схема типового технологического процесса изготовления печатной платы химическим методом

полуаддитивный процесс предусматривает предварительное нанесение тонкого (вспомогательного) проводящего покрытия, впоследствии удаляемого с пробельных мест.

В соответствии с ГОСТ 23751—86 конструирование печатных плат следует осуществлять с учетом следующих методов изготовления: химического для ОПП, ГПК; комбинированного позитивного (для ДПП, ГПП); электрохимического (полуаддитивного) для ДПП; металлизации сквозных отверстий для МПП. Все рекомендуемые методы (кроме полуаддитивного) являются субтрактивными.

Химический метод, или метод травления фольгированного диэлектрика. Метод заключается в том, что на медную фольгу, при-

клеенную к диэлектрику, наносят позитивный рисунок схемы проводников. Последующим травлением удаляется металл с незащищенных участков и на диэлектрике получается требуемая электрическая схема проводников.

Наиболее распространенными вариантами этого метода являются фотохимический и сеточно-химический, которые отличаются способом нанесения защитного слоя (фотопечать или трафаретная печать). Схема типового технологического процесса изготовления печатных плат химическим методом показана на рис. 12.16.

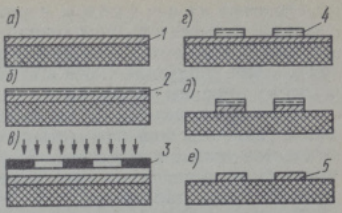


Рис. 12.17. Основные этапы получения проводников фотохимическим методом

Основными этапами получения проводников являются (рис. 12.17) подготовка поверхности, нанесение слоя фоторезиста, экспонирование, проявление схемы, травление фольги, удаление фоторезиста.

Подготовку поверхности фольги выполняют вращающимися латунными или капроновыми щетками. На поверхность фольги наносят смесь маршаллита и венской извести. В результате зачистки желательно получение шероховатости фольги в пределах Ra 2,5...1,25 мкм, что обеспечивает хорошую адгезию фоторезиста и легкое удаление его при проявлении.

Независимо от механической зачистки во всех случаях проводят химическую очистку фольги и нефольгированных поверхностей платы. Ее выполняют в щелочных растворах с последующей промывкой в деионизованной воде. Для нейтрализации остатков щелочи и удалении слоя оксидов платы подвергают декапированию в растворе соляной и серной кислот.

Качество очистки влияет на все последующие операции технологического процесса. Результатом плохой очистки могут явиться проколы, неполное травление меди, отслаивание, недостаточная адгезия фоторезиста и другие дефекты.

Нанесение слоя фоторезиста осуществляют на подготовленную поверхность *1* фольги (рис. 12.17, *а*) слоя фоторезиста *2* и производят его сушку в течение 15...20 мин при температуре 65°С (рис. 12.17, *б*).

Экспонирование осуществляют при помощи фотошаблона *3* с негативным изображением схемы в вакуумной светокопировальной раме для засвечивания. В качестве источника света используют дуговые ртутные и люминесцентные лампы (рис. 12.17, *в*). Для получения резкого изображения необходим плотный контакт между фотошаблоном и фоторезистом.

Проявление схемы состоит в вымывании растворимых участков фоторезиста, находившихся под темными местами негатива. Для фоторезистов негативного действия в качестве проявителей используют спиртовые смеси и др. Время проявления (2...3 мин) зависит от толщины фоторезиста.

Проявление целесообразно выполнять в двух ваннах. В первой ванне удаляется большая часть фоторезиста, а во второй ванне производится тонкое проявление. Загрязнение проявителя во второй ванне будет незначительным, и действие его в течение большого времени будет стабильным.

Качество полученного слоя можно контролировать путем погружения платы в раствор с красителем. Окраска дает возможность визуально определить наличие дефектов в слое фоторезиста. Однако она может снизить кислотоупорность фоторезистивного слоя.

Неизбежные дефекты эмульсионного слоя устраняются ретушированием (обычно эмалью НЦ-25). При этом закрывают точечные отверстия, разрывы, а также удаляют излишки фоторезиста. Трудоемкость ретуширования зависит от количества дефектов и составляет в среднем 10 мин на плату. Снижение трудоемкости ретуширования возможно за счет повышения чистоты и обеспыленности окружающей среды.

Полученный защитный слой *4* (рис. 12.17, *г*) можно подвергать химическому дублению в растворе ангидрида и тепловому дублению (выдержка в термостате при $t=60°C$ в течение 40...60 мин). Необходимость операции задубливания определяется в каждом отдельном случае, так как она уменьшает адгезию фоторезиста.

Дальнейшие этапы являются общими для плат, изготовляемых фотохимическим и сеточно-химическим методами.

Травление представляет собой процесс удаления слоя металла для получения нужного рисунка схемы *5* (рис. 12.17, *д*). Процесс травления включает в себя предварительную очистку, собственно травление металла, очистку после травления и удаления фоторезиста или краски (рис. 12.17, *е*).

Механическая обработка платы заключается в штамповании или фрезеровании по контуру и получении отверстий. Для удаления пыли и грязи плату обдувают сжатым воздухом.

Химические методы при сравнительно простом технологическом процессе обеспечивают высокую прочность сцепления проводников с основанием (2 МПа), равномерную толщину проводников и их высокую электропроводность. Время химических воздействий на плату в процессе изготовления составляет ∽25 мин. Недостатком химических методов является низкая прочность в местах установки выводов, так как отверстия не металлизируются.

Комбинированный позитивный метод (табл. 12.1). Этот метод применяют для изготовления ДПП и ГПП с металлизированными отверстиями на двустороннем фольгированном диэлектрике. Проводящий рисунок получают субтрактивным методом, а металлизацию

Таблица 12.1

Наименование этапа	Комбинированный позитивный метод (материал СФ-2-35)	Электрохимический (полуаддитивный) метод (материал СТЭФ.1-2ЛК)
Механическая обработка до нанесения проводников	Входной контроль фольгированного диэлектрика	
	Нарезка заготовки Вскрытие базовых отверстий Сверление отверстий, подлежащих металлизации	
Гальванохимическая обработка	Химическая и предварительная гальваническая металлизация 5 ... 7 мкм	
	Подготовка металлизированной поверхности заготовки	
	Получение рисунка схемы проводников Гальваническое меднение Нанесение защитного покрытия Sn—Pb Удаление фоторезиста или краски	
	Травление фольги 40 ... 42 мкм	Травление меди 5 ... 7 мкм
	Оплавление защитного покрытия	
Заключительные операции	Обрезка плат по контуру Маркировка, консервация, упаковка	

отверстий осуществляют электрохимическим методом (рис. 12.18). Поверхность обеих сторон платы *1* и отверстия *2* подвергают химическому и предварительному гальваническому меднению для получения слоя меди толщиной 5...7 мкм (рис. 12.18, *а*). После подготовки металлизированных поверхностей на них создается негативное изображение схемы проводников *3* (рис. 12.18, *б*). Это изображение может быть получено с помощью сеткографической краски или сухого пленочного фоторезиста.

На наружные поверхности, не защищенные резистивной маской, и в отверстия осаждается слой меди *4*, толщина которого в отверстиях должна быть не менее 25 мкм. Гальваническое осаждение меди выполняется на заготовке платы, имеющей сплошной слой фольги, которая защищает поверхность диэлектрика и обеспечивает электрический контакт всех элементов схемы. Металлизированные поверхности покрываются защитным слоем сплава «олово—свинец», толщина которого не менее 10 мкм. Покрытие этим спла-

вом хорошо защищает медь от травления и после нанесения этого покрытия участки медной фольги, покрытые ранее фоторезистом, удаляются травлением. После травления на плате остается требуемый рисунок схемы *5*, образованный облуженной медной фольгой (рис. 12.18, *в*).

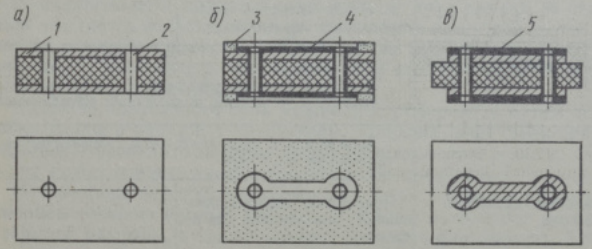


Рис. 12.18. Основные этапы получения проводников комбинированным позитивным методом

Процесс экспонирования двусторонней печатной платы показан на рис. 12.19. В пластину *6* из оргстекла запрессованы два штифта *1*. На плату *5*, имеющую фольгу *4* с двух сторон, нанесен фоторезист *3*. На штифты устанавливают фотошаблон одной стороны платы, а сверху устанавливают другой шаблон *2*.

Изображение проявляют под душем при $t=40...50°C$ с легким протиранием поверхности губкой. Процесс проявления ускоряется при наложении ультразвуковых колебаний. Набухание пленки является диффузионным процессом внедрения низкомолекулярного раствора в высокомолекулярный слой светочувствительной эмульсии. Диффузия в ультразвуковом поле сильно ускоряется за счет акустических микропотоков. Кавитационные пузырьки проникают в образовавшиеся поры и отрывают копировальный слой от поверхности платы.

Удаление продуктов растворения осуществляется акустическими течениями, что ускоряет процесс проявления во много раз. При этом плата меньше находится в растворе.

Проверка после проявления осуществляется внешним осмотром. Рисунки должны быть четкими и ровными, без подтеков и наплывов эмульсии.

При получении проводников возникают эффекты их разрастания и подтравливания. Если толщина металлического покрытия превышает толщину слоя резиста, то начинается боковой рост покрытия с такой же скоростью, что и рост толщины основного покрытия, что приводит к образованию грибообразного сечения проводника (рис. 12.20). После покрытия вдоль всего проводника образуются на-

висающие хрупкие края из сплава SnPb. Обламываясь, они образуют тонкие заусенцы размером 25...50 мкм, которые трудно обнаружить невооруженным глазом. Такие заусенцы необходимо удалить, так как они могут вызвать замыкание соседних проводников.

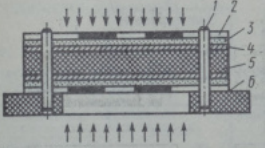


Рис. 12.19. Экспонирование двусторонней печатной платы

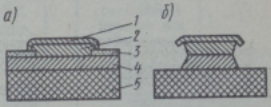


Рис. 12.20. Сечение проводников:

а — разрастание; *б* — подтравливание; *1* — сплав «олово — свинец»; *2* — металлизация; *3* — фоторезист; *4* — фольга; *5* — основание печатной платы

Электрохимический (полуаддитивный) метод. Данный метод применяют для изготовления ДПП с высокой плотностью токопроводящего рисунка (табл. 12.1). Основное отличие от комбинированного позитивного метода заключается в использовании нефольгированного диэлектрика СТЭФ.1-2ЛК с обязательной активацией его поверхности или диэлектрика слофодит с фольгой 5 мкм.

Разрешающая способность электрохимического полуаддитивного метода выше, чем комбинированного позитивного. Это объясняется малым боковым подтравливанием, которое равно толщине стравливаемого слоя и при полуаддитивном методе составляет всего 5 мкм. Метод обеспечивает высокую точность рисунка, хорошее сцепление проводников с основанием и устраняет неоправданный расход меди, который доходит до 80% при использовании фольгированных диэлектриков.

Метод металлизации сквозных отверстий. Метод применяют для изготовления МПП (рис. 12.21). Основные операции технологического процесса получения печатных проводников показаны на рис. 12.22.

Заготовки из фольгированного диэлектрика отрезают с припуском 30 мм на сторону (рис. 12.22, *а*). После снятия заусенцев по периметру заготовок и в отверстиях поверхность фольги защищают на крацевальном станке и обезжиривают механически (смесью венской извести и наждачного порошка) или химически (путем обработки в соляной кислоте и хромовом ангидриде).

Рисунок схемы внутренних слоев (рис. 12.22, *б*) выполняют химическим методом. При этом противоположная сторона платы не должна иметь механических повреждений и подтравливания фольги. Базовые отверстия получают пробивкой, ориентируясь

на метки совмещения, расположенные на технологическом поле. Полученные заготовки собирают в пакет, перекладывая их склеивающими прокладками из стеклоткани, содержащими до 50% терморе-

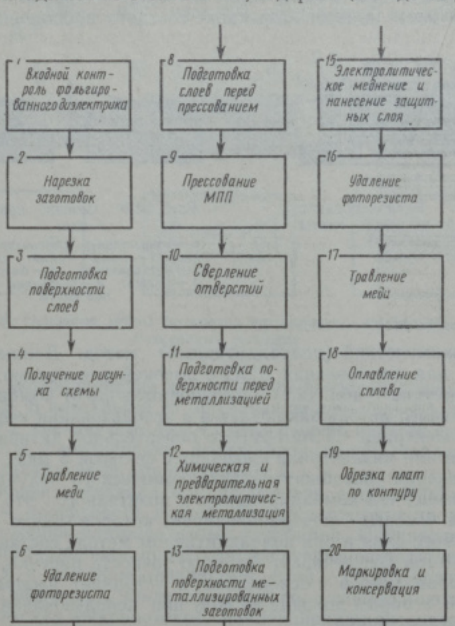


Рис. 12.21. Схема типового технологического процесса изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий

активной эпоксидной смолы. Совмещение отдельных слоев производят по базовым отверстиям.

Прессование пакета (рис. 12.22, *в*) осуществляется горячим способом. Приспособление с пакетом слоев устанавливают на

плиты пресса, подогретые до 120...130°С. Первый цикл прессования осуществляют при давлении 0,5 МПа и выдержке 15...20 мин. Затем температуру повышают до 150...160°С, а давление — до 4... 6 МПа. При этом давлении плата выдерживается из расчета 10 мин на каждый миллиметр толщины платы. Охлаждение ведется без снижения давления.

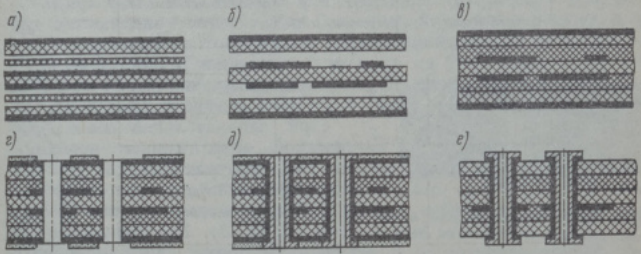


Рис. 12.22. Основные этапы получения печатных проводников МПП:
а — изготовление заготовок фольгированного материала и стеклоткани; *б* — получение рисунка схемы внутренних слоев; *в* — прессование многослойной печатной платы; *г* — сверление отверстий, предварительная металлизация, получение рисунка схемы наружных слоев МПП; *д* — окончательная металлизация отверстий, нанесение защитного покрытия; *е* — травление меди с пробельных мест

Важным моментом в процессе прессования является приложение максимального давления именно в тот момент, когда смола переходит в состояние геля. Если приложить давление, когда смола находится в жидком состоянии, значительное количество ее будет выдавлено и в готовой плате образуются пустоты. Если приложить давление после того, когда смола из состояния геля перейдет в твердое состояние, между слоями возникает плохая связь.

Для определения состояния геля ведут наблюдение за кромкой пакета. Через несколько минут на ней после предварительного сжатия появляется и начинает пузыриться смола. Момент, когда смола перестанет пузыриться (обычно через 1...2 мин), соответствует наступлению геля. В это время надо приложить полное давление. Воздух, находящийся между слоями, проходит через размягченную смолу и выходит наружу. Частично он задерживается у краев, образуя пустоты, которые удаляются при обрезке краев платы. Во избежание коробления после обрезки краев рекомендуется плату зажать между двумя пластинами и поместить на 40 мин в печь при $t = 125$°С.

Сверление отверстий выполняют на станках с ЧПУ. Перед сверлением на обе стороны заготовки наносят защитный слой лака. В процессе механической обработки платы загрязняются. Для устранения загрязнения отверстия подвергаются гидроабразивному

воздействию, что позволяет удалить заусенцы на фольге, образующиеся при сверлении, и очистить от эпоксидной смолы торцы контактных площадок внутренних слоев. При большом числе отверстий целесообразно применять ультразвуковую очистку, которая обеспечивает интенсивное перемешивание раствора за счет акустических течений и повышенную способность проникновения раствора в мельчайшие отверстия. После очистки и обезжиривания плату промывают в горячей и холодной проточной воде. Затем выполняются химическая и предварительная электролитическая металлизации отверстий и операции для получения рисунка наружных слоев (рис. 12.22, *г*).

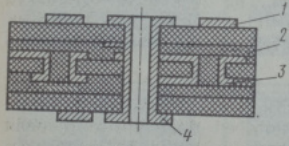


Рис. 12.23. Многослойная печатная плата с внутренними переходами:

1 — проводник; *2* — межслойный диэлектрик; *3* — внутренний металлизированный переход; *4* — металлизированный переход между наружными слоями

При окончательной электролитической металлизации необходимо получить равномерное по толщине покрытие в отверстиях с толщиной слоя меди не менее 25 мкм (рис. 12.22, *д*). Все наружные поверхности платы, не защищенные фоторезистом, и отверстия покрывают защитным сплавом «олово — свинец». После этого фоторезистивную маску удаляют.

Схему проводников на наружных слоях получают травлением (рис. 12.22, *е*). Для обеспечения равномерного травления поверхность фольги зачищают смесью венской извести и наждачного порошка.

Вследствие травления фольги в отверстиях многослойных плат остается большое количество шлака, который удаляют путем очистки при воздействии ультразвуковых колебаний.

Механическая обработка по контуру, получение конструктивных отверстий и пазов осуществляются на фрезерных, координатно-сверлильных и других станках. После окончательного контроля платы подвергают консервированию флюсом ФКСП (канифоль и спирт этиловый).

Метод металлизации сквозных отверстий с внутренними переходами (рис. 12.23). Этот метод отличается от рассмотренного выше наличием дополнительных операций, связанных со сверлением отверстий в отдельных слоях платы и их металлизацией.

Технологический процесс изготовления печатных плат субтрактивными методами имеет ряд недостатков: значительный расход медной фольги; боковое подтравливание, ухудшающее механические и электрические характеристики печатных плат; высокая трудоемкость изготовления и ограниченные возможности повышения плотности монтажа.

С внедрением МПП рост плотности монтажа происходит за счет увеличения числа слоев, а плотность печатного рисунка слоев прак-

тически оставалась на прежнем уровне. По технологическим особенностям увеличение числа слоев больше 10...12 является нецелесообразным. Многослойные печатные платы обладают высокими техническими и эксплуатационными характеристиками, однако их проектирование и производство сопряжены с большими трудностями.

Полуаддитивные методы изготовления позволяют повысить плотность печатного монтажа, значительно уменьшить подтравливание проводников и сократить количество операций технологического процесса. Стоимость таких плат на 20% ниже стоимости ДПП, изготовленных субтрактивными методами. Основной проблемой является повышение качества материалов и технологического оборудования.

Заключительный этап производства печатных плат — контроль механических и электрических свойств. Перед контролем платы подвергаются воздействию нагрузок, которые моделируют условия эксплуатации и транспортировки (удары, вибрации, тепловые воздействия и др.).

При контроле механических свойств проверяют наличие трещин и царапин на металлической фольге, форму отдельных элементов платы, качество соединений проводников с контактными площадками, неплоскостность платы, толщину и непрерывность слоя меди в отверстиях, степень подтравливания проводников, величину адгезии проводников и др. Контроль может быть разрушающий (например, изготовление и оценка шлифов) и неразрушающий (визуальный, радиационный и др.).

При контроле электрических свойств проверяется наличие всех электрических соединений и изоляции между проводниками. Дефекты изоляции возникают вследствие образования перемычек (остатки меди после травления), уменьшения расстояния между проводниками из-за погрешностей оригинала рисунка.

Автоматизированные устройства контроля. Для контроля электрических свойств печатных плат широко применяют автоматизированные устройства контроля с использованием ЭВМ.

Структурная схема установки для автоматизированного контроля печатных плат приведена на рис. 12.24. Установка фиксирует обрыв цепи и короткие замыкания проводников, обеспечивает подключение 1024 контрольных точек [7].

Программное обеспечение построено на базе микроЭВМ, накопителя на гибком магнитном диске (ГМД), дисплея и устройства печати. В состав программного обеспечения входят управляющая программа, оперативная система управления режимами, программа контроля установки. Тест контроля предусматривает выдачу команд управления после подключения к контактному устройству (КУ): коммутатора точек (КТ) и приборов (КП), источников тока и напряжения (ИТН), измерительной системы (ИС) и алфавитно-цифрового преобразователя (АЦП).

Заключение о годности платы формируется управляющей программой, которая проверяет правильность передачи информации через КП в ИС и сохраняет информацию до получения результатов измерения. После окончания контроля выдается сообщение о годности платы на терминал. В процессе работы установки осуществляется самоконтроль измерительной системы с помощью эталонной платы и испытательной программы.

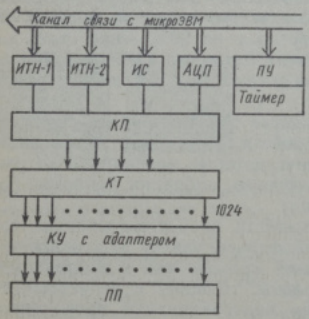


Рис. 12.24. Структурная схема установки для автоматизированного контроля печатного монтажа

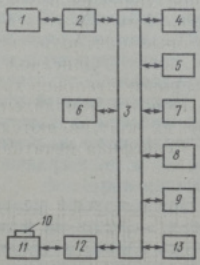


Рис. 12.25. Структурная схема установки для оптического контроля печатных плат:

1 — телевизионная камера; *2* — блок управления и синхронизации; *3* — интерфейс; *4* — мини-ЭВМ; *5* — НМД; *6* — НМЛ; *7* — цифровой телевизионный монитор; *8* — фотосчитывающее устройство; *9* — печатающее устройство; *10* — контролируемый объект; *11* — подвижной стол; *12* — привод; *13* — память для хранения эталонов

Оптические методы контроля. Эти методы являются весьма перспективными, позволяют обнаружить дефекты любого типа и обеспечивают высокую производительность контроля. Они являются бесконтактными, так как контролируется не сама ПП, а ее изображение. При этом проверяются ширина проводников и расстояние между ними, наличие разрывов и замыканий проводников, отслоение проводников от подложки. Общим для всех оптических методов контроля является наличие источника излучения, освещающего ПП, и приемника, преобразующего оптический сигнал в электрический. Основной задачей контроля ПП является получение изображения рисунка проводников с необходимой кон-

трастностью. Методы контроля различаются способом сравнения контролируемого объекта с эталоном, а также формой представления эталона (в дискретной или аналоговой форме).

Схема контролирующего комплекса показана на рис. 12.25.

Для цифровой обработки изображения и управления сканированием по заданному алгоритму используется мини-ЭВМ, в которой хранятся все необходимые программы и эталоны тех ПП, которые контролируются в данное время. Описания комплекса цифровых эталонов хранятся в накопителе на НМЛ.

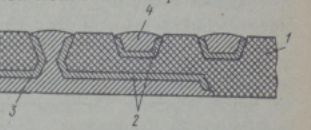


Рис. 12.26. Сечение рельефной платы

Новыми направлениями в проектировании и изготовлении печатных плат являются рельефные и тканые платы.

Рельефная печатная плата (РПП) представляет собой диэлектрическое основание *1*, на котором расположены проводники *2* в виде металлизированных канавок и сквозные отверстия *3* конической формы (рис. 12.26). Канавки и переходные отверстия заполняют сплавом Розе *4*. Обычно РПП бывают двусторонними. Рельефный проводник по ширине в 2...3 раза меньше печатного плоского проводника того же сечения, имеет более надежное сцепление с основанием и не выступает над поверхностью платы. Проводники на одной стороне платы располагаются только в одном направлении — перпендикулярно проводникам на другой стороне.

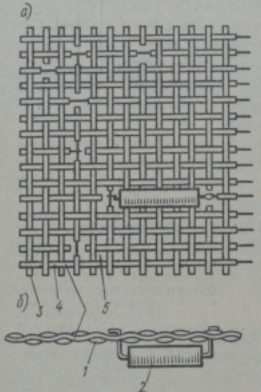


Рис. 12.27. Тканая (плетеная) плата

Коническая форма переходных отверстий обеспечивает хорошее сцепление металлизированного отверстия с диэлектриком. Отверстия имеют диаметр ≈0,2 мм и могут размещаться в любой точке пересечения трасс при минимально допустимых расстояниях между проводниками.

Малая ширина проводников, отсутствие контактных площадок и строгая ортогональность проводников позволяют в 5...6 раз повысить плотность печатного монтажа. Двусторонние РПП превосходят МПП по плотности печатного монтажа.

Рельефные печатные платы изготовляют обычно электрохимическим методом.

Канавки получают фрезерованием на станках с ЧПУ или прес-

сованием. Остальные операции осуществляются по типовому технологическому процессу (табл. 12.1).

Тканые (плетеные) платы (рис. 12.27, *а*, *б*) изготовляются из провода на ткацком станке с программным управлением. Основание платы *1* состоит из переплетенных проводов *3* и *4*, образующих отверстия *5*. В местах крепления элементов *2* с проводов удаляется изоляция. Провода прерываются или соединяются пайкой в соответствии с электрической схемой. Такие платы обладают высокими изоляционными свойствами. Наиболее полно их преимущество реализуется при монтаже интегральных схем с планарными выводами. Вследствие высокой производительности текстильных станков изготовление тканых плат в 5 ... 6 раз дешевле аналогичных по структуре ПП или плат с проводным монтажом. При этом достигаются экономия цветных металлов, химических реактивов и снижение затрат на инструмент.

Процесс выполнения печатных плат на подложках из анодированного алюминия. Такие подложки отличаются хорошими теплопроводящими свойствами, что дает возможность увеличить электрические нагрузки в токопроводящих цепях. Высокие электроизоляционные свойства подложки обеспечиваются оксидной пленкой, создаваемой на ее поверхности. Применение алюминиевых подложек позволят полностью или частично исключить устройства принудительного теплоотвода и обеспечить более надежное крепление электрорадиоэлементов.

ГЛАВА 13

ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СБОРКИ И МОНТАЖА

13.1. Пайка

Пайкой называется процесс образования соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов до температуры плавления, их смачивания припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации. Пайку применяют также для получения электрического контакта с малым переходным сопротивлением.

Соединение, образующееся при пайке, по составу неоднородно. Оно включает в себя паяный шов и зону сплавления. *Паяный шов* — это часть паяного соединения, закристаллизовавшаяся при пайке; *зона сплавления* — поверхность между паяным материалом и паяным швом или граница между ними в сечении паяного соединения. Зона сплавления состоит из диффузионной зоны и прокристаллизованного слоя, который образуется в результате выделения из расплава более тугоплавкой составляющей.

Диффузионная зона представляет собой слой основного материала с измененным химическим составом и микроструктурой, образовавшейся в результате диффузии компонентов припоя и паяемого материала. В зависимости от физико-химических свойств основного материала и припоя, условий и режимов пайки образующийся спай может иметь различное строение.

При низкой температуре и малом времени пайки интенсивность взаимодействия на межфазовой границе снижается. В этом случае возможно образование между основным металлом и припоем химических металлических связей при отсутствии диффузии или ограничении ее до весьма малых пределов. Если диффузией можно пренебречь, то спай называют *бездиффузионным*. Такой спай не изменяет физико-химических свойств основного металла и широко применяется при монтажной пайке.

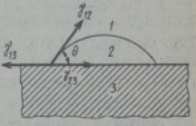


Рис. 13.1. Схема равновесия капли припоя на поверхности твердого тела

В качестве припоя используют различные цветные металлы и их сплавы. Температура плавления припоя значительно ниже температуры плавления соединяемых металлов.

При высокой температуре пайки в месте контакта соединяемых материалов и припоя температура превышает 723 К (~450°С), а при низкотемпературной пайке — не превышает 723 К.

Для получения силовых соединений с высокой механической прочностью применяют высокотемпературную пайку. Ее осуществляют медными, цинковыми, серебряными и другими припоями. Для низкотемпературной пайки используют припои, имеющие температуру плавления 200 ... 300 °С (оловянно-свинцовые, висмутовые, кадмиевые и др.).

Пайка возможна только в том случае, если припой смачивает соединяемые детали. Смачивание представляет собой молекулярное взаимодействие жидкости с поверхностью твердого тела. Оно происходит в том случае, если силы притяжения между атомами припоя и металла больше, чем между атомами самого припоя.

На рис. 13.1 показана капля жидкого припоя, находящаяся на поверхности твердого тела в равновесии с окружающей газовой средой. В момент равновесия в системе имеются три фазы: *1* — газовая (флюс); *2* — жидкая (припой); *3* — твердая (основной металл).

Поверхностное натяжение (вектор γ_{12}) действует по касательной к поверхности жидкого металла. Это натяжение стремится уменьшить поверхность капли припоя. При отсутствии других сил поверхностное натяжение придало бы капле сферическую форму,

так как из всех тел равного объема шар имеет минимальную поверхность. Напряжения на поверхности раздела между жидкостью и окружающей средой противодействуют этому натяжению, и капля припоя принимает форму, отличную от шара.

Натяжение γ_{23} представляет собой силу, действующую между жидким припоем и твердым металлом, а натяжение γ_{13} — между основным металлом и газом.

Для поверхностных сил справедливо соотношение

$$\gamma_{13}=\gamma_{23}+\gamma_{12}\cos\theta, \text{ или } \cos\theta=(\gamma_{13}-\gamma_{23})/\gamma_{12}, \qquad (13.1)$$

где θ — краевой угол, или угол смачивания.

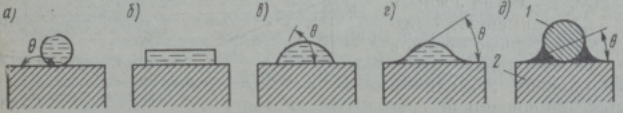


Рис. 13.2. Смачиваемость поверхности металла припоем:
а — отсутствие смачиваемости; *б* — полное смачивание; *в* — частичное смачивание; *г* — хорошее смачивание; *д* — определение угла смачиваемости

Степень смачиваемости припоя характеризуется значением краевого угла (рис. 13.2).

Предельными состояниями являются отсутствие смачивания, когда $\theta=180°$ (рис. 13.2, *а*), и полное смачивание, когда $\theta=0°$ (рис. 13.2, *б*).

При $75°<\theta<90°$ имеет место частичное смачивание (рис. 13.2, *в*), а при $\theta<45°$ — хорошее смачивание (рис. 13.2, *г*). Если капля не смачивает поверхность, то она имеет приблизительно сферическую форму. Сила сцепления припоя с поверхностью детали в этом случае очень мала и капля припоя легко стряхивается, не оставляя следов на поверхности. Капля смачивающей жидкости в том же объеме имеет большую поверхность соприкосновения с поверхностью детали, сила ее сцепления значительная, и припой нельзя полностью удалить стряхиванием.

Паяемость (рис. 13.2, *д*) можно определить по углу смачиваемости. Для этого медную луженую проволоку *1* припаивают к испытываемому образцу *2*. Затем делают срез образца и замеряют краевой угол.

Важными свойствами припоя являются растекаемость и способность затекать в узкие зазоры под действием капиллярных сил.

Растекаемость определяют путем расплавления установленного количества припоя при заданном режиме нагрева на металлической пластине с применением заданного флюса. Растекаемость

характеризуется коэффициентом $K_р$, представляющим собой отношение площади $S_р$, занятой припоем после расплавления или растекания, к площади S_0, занимаемой дозой припоя до расплавления:

$$K_р = S_р / S_0. \qquad (13.2)$$

Для определения способности припоя затекать в узкие зазоры замеряют высоту подъема расплавленного припоя между двумя закрученными стандартными проволоками или между двумя пластинами, установленными с небольшим зазором.

Для монтажной пайки применяют низкотемпературные припои на основе сплава «олово — свинец». Анализ и выбор припоя можно осуществить, используя диаграмму состояния этой системы (рис. 13.3).

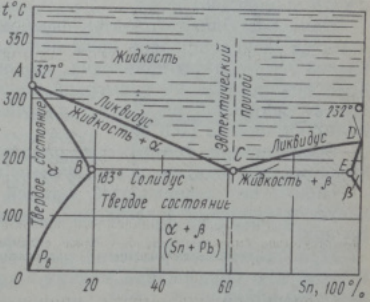


Рис. 13.3. Диаграмма состояния сплава «олово — свинец»

Кривая *ABCED* представляет собой линию солидуса, т. е. линию наивысшей температуры, при которой припой полностью затвердевает и ниже этой линии находится в твердой фазе. Самая низкая температура, при которой металл или сплав остаются жидкими, характеризуется линией ликвидуса (кривая *ACD*). Чистый свинец (точка *A*) имеет температуру плавления 327 °С, чистое олово (точка *D*) — 232 °С. Припои, содержащие от 19,5% (точка *B*) до 97,5% олова (точка *E*), имеют одинаковую температуру солидуса (183 °С). На участке, ограниченном замкнутой кривой *ABCA*, находятся кристаллы твердого раствора олова в свинце (α) и жидкий раствор олова в свинце; на участке, ограниченном линией *DCED*, — кристаллы твердого раствора свинца в олове (β) и жидкий раствор свинца в олове. В интервале температур между линиями *ACD* и *ABCE* сплавы находятся в пастообразном состоянии. Точка *C* обозначает эвтектику, которой соответствует сплав 61,8% олова и 38,2% свинца. При плавлении ($t = 183$ °С) этот сплав полностью становится жидким.

Сплавы, составы которых находятся в области между твердым раствором олова в свинце и эвтектикой (припой ПОС40, ПОС61 и др.), по своему строению характеризуются мелкозернистой основой с включенными в нее отдельными зернами твердого раствора.

Интервал температур между линиями солидуса и ликвидуса называется интервалом кристаллизации. Температурный интервал кристаллизации влияет на качество соединения и ход процесса пайки.

При наличии широкого интервала кристаллизации необходимо поддерживать неизменным положение паяемых поверхностей при охлаждении припоя. В случае относительного их смещения жидкость не сможет заполнить все промежутки между кристаллами. Поэтому наилучшее качество пайки обеспечивает эвтектический припой.

Наиболее близок к эвтектическому составу припой ПОС61, который нашел широкое применение для монтажной пайки из-за низкой температуры плавления, небольшого температурного интервала кристаллизации и высокой коррозионной устойчивости. Для пайки соединений из стали, латуни и монтажных проводов используют припой ПОС40.

Более низкую температуру плавления имеют оловянно-свинцово-кадмиевые припои, используемые при ступенчатой пайке.

Подготовка поверхностей деталей, подлежащих пайке, заключается в удалении загрязнений, ржавчины, оксидных и жировых пленок.

При наличии загрязнений растекаемость припоя будет плохой и возможно образование мелких шариков припоя, ухудшающих качество пайки.

На смачиваемость и растекаемость припоя существенно влияет форма шероховатостей поверхности. Если неровности образуют сеть пересекающихся канавок, то смачиваемость и растекаемость припоя будет усиливаться капиллярным действием канавок. Шероховатости, представляющие собой углубления, окруженные выступами, ухудшают смачивание.

Способ зачистки может оказать решающее влияние на качество пайки. Зачистка наждачной шкуркой или крацевание дают лучшие результаты, чем травление. В последнем случае образуется поверхность, не вызывающая капиллярного эффекта.

Для удаления жира и масла с поверхности деталей применяют различные растворители, горячие щелочные растворы. Для получения чистых поверхностей используют травление кислотами.

Подготовленные поверхности покрывают флюсом непосредственно перед горячим лужением или пайкой.

Механизм действия флюса (рис. 13.4) заключается в том, что оксидные пленки металла и припоя растворяются или разрыхляются и всплывают на поверхность флюса. Вокруг очищенного металла образуется защитный слой флюса, препятствующий возникновению оксидных пленок. Жидкий припой замещает флюс и взаимодействует с основным металлом. Слой припоя постепенно увеличивается и при прекращении нагрева затвердевает.

Флюсы по действию, которое они оказывают на металл, подвергающийся пайке, делят на кислотные (активные), бескислотные, антикоррозионные и активированные.

Кислотные флюсы (хлористый цинк и флюсы на его основе) интенсивно растворяют оксидные пленки, обеспечивая тем самым хорошее сцепление припоя с основным металлом. Остаток флюса после пайки вызывает интенсивную коррозию соединения и основного металла, поэтому необходимы тщательная промывка и полное удаление остатков флюса с поверхности соединения. При монтажной пайке активные флюсы не применяют.

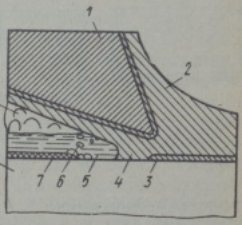


Рис. 13.4. Схема лужения с помощью паяльника:
1 — наконечник паяльника; *2* — припой; *3* — сплав припоя с основным металлом; *4* — зона взаимодействия припоя с основным металлом; *5* — флюс; *6* — растворенный оксид; *7* — оксид на поверхности основного металла; *8* — основной металл; *9* — газообразный флюс

Бескислотные флюсы (канифоль и флюсы, приготовляемые на ее основе с добавлением неактивных веществ спирта, глицерина и др.) химически малоактивны и их можно применять при тщательной зачистке деталей. Остаток канифоля не гигроскопичен и является хорошим диэлектриком; это важное преимущество канифоли при пайке монтажных соединений. Широко применяют флюс марки ФКСп, представляющий собой раствор сосновой канифоли (10...40%) в этиловом спирте. Флюсы на основе канифоли не оказывают коррозионного действия.

Антикоррозионные флюсы (на основе соединений фосфорной кислоты с добавлением различных органических кислот) не вызывают коррозии черных металлов, вследствие чего отпадает необходимость удаления остатков флюса после пайки.

Активированные флюсы (на основе канифоли с добавкой активизаторов — салициловой кислоты и др.) применяют для сплавов, плохо поддающихся пайке. Высокая активность некоторых активированных флюсов позволяет выполнять пайку без предварительного удаления оксидов.

Для пайки твердыми припоями в качестве флюса используют буру или флюсы на ее основе (90% буры и 10% борной кислоты).

Лужение заключается в покрытии поверхностей соединяемых деталей тонкой пленкой припоя. Горячее лужение выполняют паяльником или путем погружения в ванну с расплавленным припоем (рис. 13.5). Лужение детали *3* (рис. 13.5, *а*) можно осуществить окунанием в жидкий флюс, а затем в ванну *1* с расплавленным припоем *2*. На рис. 13.5, *б* показано лужение через слой флюса *4*. Скорость прохождения детали через флюс должна быть такой, чтобы она могла нагреться до требуемой температуры.

При лужении происходит сплавление припоя с основным металлом, поэтому при пайке достаточно сплавить припои с полудой, что возможно при более низкой температуре нагрева. Мелкие монтажные детали можно лудить гальваническим путем.

Одним из способов дозирования припоя при лужении является использование припойных паст. Они представляют собой механические смеси порошкового припоя, связующего вещества и некоторых других компонентов. В пастах ПЛ-1, ПЛ-3 используют порошок припоя ПОС-61 и канифоль. После нанесения пасты ее оплавляют при температуре на 30...50 °С выше температуры плавления сплава.

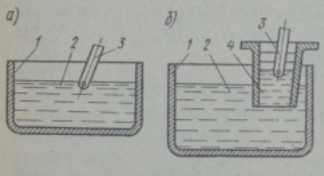


Рис. 13.5. Лужение погружением:
а — в ванну с припоем; *б* — через слой флюса

Пайка заключается в прогреве соединяемых элементов после нанесения припоя и сохранении их в сжатом состоянии до полного затвердевания припоя. Она состоит из двух фаз: 1) смачивание припоем металлических поверхностей; 2) заполнение припоем зазора между смоченными поверхностями. Эти две фазы в зависи-

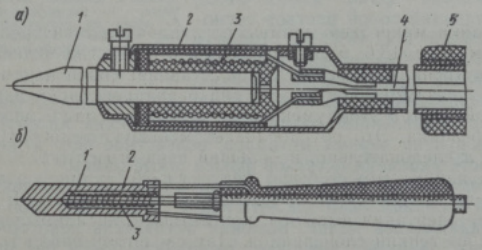


Рис. 13.6. Электропаяльник:
а — с наружным нагревателем (*1* — наконечник; *2* — кожух; *3* — нагреватель; *4* — заземление; *5* — ручка); *б* — с внутренним нагревателем

мости от конкретных условий могут протекать последовательно или одновременно.

При пайке и лужении необходимо некоторое время для осуществления взаимной диффузии припоя и основного металла. Продолжительность этого процесса зависит от состава припоя, температуры и других факторов. Затем место соединения охлаждают до комнатной температуры. Остатки кислотного флюса уда-

ляют в горячем растворе 2%-ной соляной кислоты с последующей промывкой в горячей воде. Остатки некоррозионных флюсов на основе канифоли удалять не требуется, за исключением тех случаев, когда необходима чистая поверхность или когда зону пайки окрашивают или покрывают лаком.

Основным инструментом для пайки служит паяльник с медным наконечником, который нагревают электрическим током напряжением до 36 В.

Нагреватель паяльника (рис. 13.6, *а*) представляет собой керамический каркас с винтовой канавкой на наружной поверхности. В канавке размещается спираль из нихромовой проволоки. Выводы спирали привариваются к медным шинам, которые соединяются с переходной колодкой.

Наконечник из меди имеет высокую теплопроводность и хорошо облуживается. Недостатками таких наконечников являются быстрое образование окалины и износ. При пайке олово, содержащееся в припое, сплавляется с медью. Для сохранения формы наконечника и надлежащей теплоотдачи его необходимо затачивать.

Эрозию паяльника можно замедлить, нанесением покрытий (толщиной 0,1 ... 0,2 мм) из железа, никеля или алюминия. Покрытия предохраняют наконечники от износа, вызванного сплавлением меди с оловом, и значительно снижают образование окалины.

Для пайки микросхем применяют паяльники с внутренним нагревателем (рис. 13.6, *б*), вставляемым в отверстие медного стержня *1*. Внутренний нагреватель представляет собой керамический стержень *2* с намотанной в один ряд оксидированной нихромовой проволокой *3*. При этом уменьшаются размеры паяльника и площадь нагревания. Это обусловливает меньшую температуру нагревателя, а следовательно, и больший срок его службы.

Форма пайки может быть заливной, когда соединяемые элементы полностью скрыты припоем, и скелетной. В последнем случае очертания вывода и контактной площадки просматриваются через тонкий слой припоя. Для скелетной пайки требуется меньше припоя, визуальный контроль ее осуществить проще. Заливная пайка обеспечивает более надежное соединение при значительных механических нагрузках.

Качество соединения оценивают по его внешнему виду, структуре, механической прочности и интенсивности отказов.

Проверка по внешнему виду осуществляется визуально с увеличением в 10 раз и более. При хорошем соединении поверхность припоя должна быть гладкой и блестящей, без инородных включений и наплывов.

Структуру паяного соединения оценивают по ширине диффузионной зоны. Максимальная прочность соединения получается при ширине диффузионной зоны 0,9 ... 1,0 мкм. Увеличение или

уменьшение этой зоны существенно снижает прочность соединения.

Качество структуры проверяют путем металлографического анализа. При этом исследуют характер и величину интерметаллических прослоек на границе раздела «припой — металл», определяют наличие дефектов и инородных включений. Неудовлетворительное состояние структуры соединения свидетельствует о неправильном выборе или нарушении режимов пайки (температуры, времени, скорости охлаждения припоя и др.).

Механическую прочность соединения определяют по усилию разрушения на разрыв или срез; холодный спай выявляется при проверке на вибропрочность.

Качество паяного соединения характеризуется также переходным сопротивлением, которое находят как среднее арифметическое этого сопротивления, определенное по трем замерам. Переходное сопротивление должно быть не более $3 \cdot 10^{-3}$ Ом. Хорошо выполненные паяные соединения имеют интенсивность отказов $10^{-7} \ldots 10^{-8}$ 1/ч.

Наиболее распространенные дефекты в паяных соединениях — это газовые поры (раковины) и холодный спай. Мелкие поры образуются вследствие выделения газов, попадания в припой оксидных пленок и перегрева припоя при пайке. Раковины являются результатом усадки, происходящей при кристаллизации, и недостаточного заполнения зазора припоем.

Большое влияние на качество паяного соединения оказывает р е ж и м п а й к и, т. е. совокупность параметров и условий, при которых она осуществляется. Под параметрами понимают температуру пайки, время выдержки при этой температуре, скорость нагрева и охлаждения, а под условиями — способ нагрева, припой, флюс (газовую среду), давление на соединяемые заготовки.

Холодный спай является следствием заниженной температуры пайки. Для получения качественного соединения температура нагрева паяльника должна быть выше температуры плавления припоя примерно на 50°С. Более высокая температура вызывает сильный окислительный процесс и способствует быстрому выходу паяльника из строя.

Главные условия безопасной работы при пайке — это хорошая вентиляция участка, защита от ожогов и умение обращаться с флюсами и припоями.

Оловянно-свинцовые припои содержат токсичные вещества, которые могут вызвать загрязнения кожи рук и одежды работающих. Все флюсы во время пайки выделяют газы, а канифолевые флюсы — газы и большое количество дыма.

Во избежание попадания токсичных веществ в организм человека необходимо после работы с припоями и флюсами тщательно мыть руки.

13.2. Групповые методы пайки

Групповые методы пайки применяют для монтажа электрорадиоэлементов на печатной плате. Особенностью процесса групповой пайки является одновременное выполнение большого числа монтажных соединений.

В настоящее время применяют различные способы групповой пайки. Однако наиболее широкое распространение получили два способа: пайка погружением в расплавленный припой и пайка волной припоя.

При всех способах групповой пайки процесс начинается с подготовки поверхности печатной платы, которая заключается в зачистке мест пайки и обезжиривании.

Зачистку выполняют эластичными кругами с абразивным порошком или металлическими щетками. Затем поверхность платы обезжиривают в растворе спирта с бензином и обдувают воздухом до полного высыхания.

Защита участков платы, не подлежащих пайке, осуществляется маской из бумажной ленты, пропитанной костным клеем. Маску приклеивают к плате так, чтобы места пайки не выходили за пределы отверстий в маске. Вместо бумажной маски применяют слой краски, наносимой через сетчатый трафарет. Краска должна противостоять непосредственному воздействию расплавленного припоя, температура которого доходит до 260°С. Следующим этапом является нанесение флюса и подогрев платы, который удаляет влагу и уменьшает термический удар в момент погружения платы в расплавленный припой. Испарение влаги уменьшает разбрызгивание припоя и образование газов, приводящих к пористости соединения.

Процесс пайки установленных на плате элементов заключается в нанесении расплавленного припоя на обработанные флюсом поверхности.

При пайке погружением (рис. 13.7) плату помещают в кассету и погружают в расплавленный припой (обычно ПОС61) на половину толщины платы. Затем включают вибратор, что создает условия для проникновения флюса и припоя. Амплитуда вибрации устанавливается экспериментально для каждого типа и размера плат в пределах такого максимального значения, при котором не происходит разбрызгивания флюса и припоя. Время выдержки при температуре припоя 240°С составляет 6 ... 11 с, а при температуре припоя 250°С — 4 ... 8 с.

Ванны для припоя оснащают терморегуляторами, поддерживающими температуру припоя в заданных пределах, и реле времени со звуковой сигнализацией. Нагревательные элементы обеспечивают более интенсивный нагрев дна ванны. В этом случае благодаря естественной конвекции в жидком припое будет происходить непрерывное его перемешивание, обеспечивающее однородность

состава припоя во всем объеме ванны. По окончании пайки плату извлекают из припоя и, не выключая вибратор, выдерживают над ванной 5 ... 7 с.

Недостатками пайки погружением являются коробление плат вследствие температурных деформаций, необходимость поддержания постоянной высоты уровня припоя в ванне и быстрое окисление расплавленного припоя. Повышенное коробление ограничивает применение этого метода для плат размером до 150 мм.

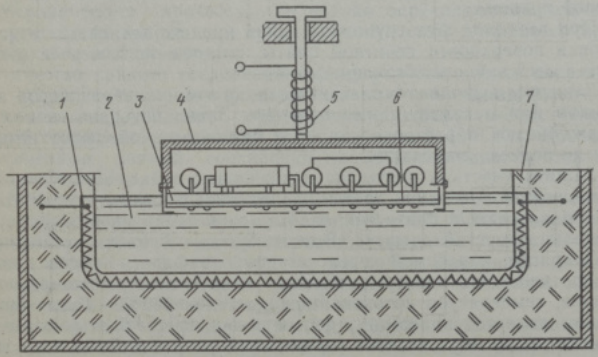


Рис. 13.7. Пайка погружением в расплавленный припой:
1 — электрический обогреватель; *2* — расплавленный припой; *3* — печатная плата с установленными радиодеталями; *4* — приспособление для установки платы; *5* — вибратор; *6* — маска; *7* — изоляция

Предохранение платы от загрязнения оксидной пленкой достигается использованием очистителей зеркала припоя и кассет специальной конструкции. Установка для пайки с очистителем показана на рис. 13.8.

Ванна *1* с припоем (рис. 13.8, *а*) поднимается, и дворник (очиститель) *3* погружается на некоторую глубину в расплавленный припой (рис. 13.8, *б*). Пока ванна неподвижна, дворник, перемещаясь вместе с платой *2*, удаляет с поверхности припоя оксидную пленку. Затем ванна поднимается до соприкосновения зеркала припоя с местами пайки (рис. 13.8, *в*). В этом положении происходит выдержка, необходимая для осуществления пайки, а затем ванна возвращается в исходное положение.

Пайка в кассете показана на рис. 13.9. Плата *4* с приспособлением *3* помещается в кассету *2*. При опускании кассеты в ванну с припоем *1* она раздвигает оксидную пленку *5*, которая располагается по граням кассеты. Когда кассета раскрывается, то

припой, свободный от оксидной пленки, поступает в кассету и осуществляет пайку. После пайки кассету извлекают из ванны и выдерживают некоторое время. Вертикальное погружение всей

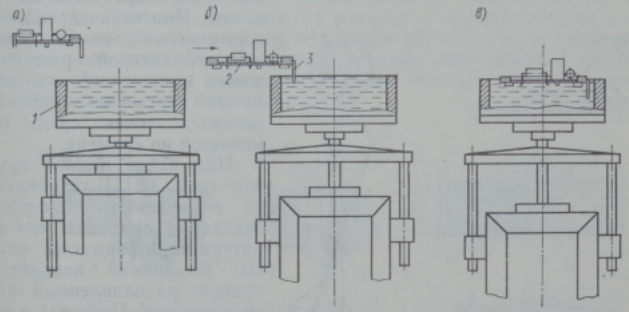


Рис. 13.8. Пайка плат погружением с вертикальным подъемом ванны

платы в расплавленный припой затрудняет удаление жидких и газообразных остатков флюса, что может привести к захвату его припоем и образованию мостиков, соединяющих близко расположенные проводники.

Пайка погружением с опрокидыванием платы (рис. 13.10). При этом методе устраняются недостатки предыдущего метода. В ванну погружают сначала один конец платы (рис. 13.10, *а*), затем постепенно другой конец. Подъем платы производится под некоторым углом α, чтобы припой стекал и не образовывал наплывов. Кинематическая схема установки показана на рис. 13.10, *б*.

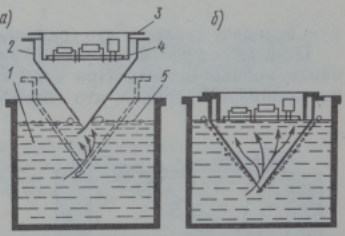


Рис. 13.9. Пайка погружением в кассете:
а — погружение; *б* — пайка

На валу *1* установлены кривошип *2* и кулачки *6*, *7*, взаимодействующие с выключателями, которые управляют частотой вращения электродвигателя. Кривошип соединен с шатуном *5*, который шарнирно закреплен на ползуне *4*, перемещающемся по штанге *3*. При подходе к зеркалу припоя и погружения в припой вал вращается медленно, а после выхода из припоя переключается на быстрое вращение.

Пайка волной припоя представляет собой процесс, при котором нагрев паяемых материалов, перемещаемых над ванной, и подача припоя к месту соединения осуществляются стоячей волной припоя, возбуждаемой в ванне. Под стоячей волной понимается состояние среды, при которой расположение максимумов и минимумов перемещений колеблющихся точек среды не меняется во времени.

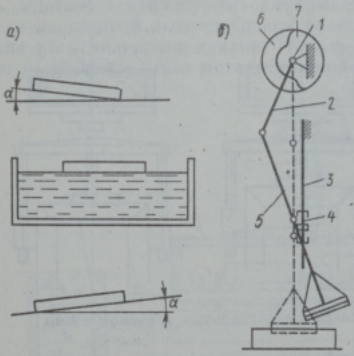


Рис. 13.10. Пайка погружением с опрокидыванием платы:
а — технологическая схема; *б* — кинематическая схема

При пайке волной припоя (рис. 13.11) устраняется возможность быстрого окисления припоя и температурных деформаций платы. В ванне *5* находится припой, расплавленный нагревателем *4*. Печатная плата *2* проходит по гребню волны *1*, которая создается подачей припоя через сопло определенной формы валом с крыльчаткой *3*. Постоянный контакт платы с припоем обеспечивает быструю передачу теплоты, что сокращает время пайки.

Пайка струей припоя является разновидностью метода пайки волной припоя. При этом происходит более интенсивное перемешивание припоя, что обеспечивает большую равномерность

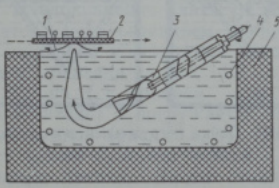


Рис. 13.11. Пайка волной припоя

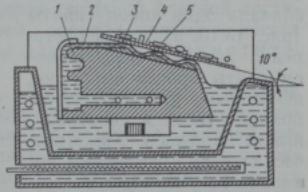


Рис. 13.12. Каскадная пайка

температуры и состава припоя, а также свободную от оксидов поверхность припоя.

Пайка волной припоя может быть реализована каскадным методом (рис. 13.12), обеспечивающим более стабильную волну припоя по высоте.

Каскад *1* состоит из гребней *3*, расположенных под углом 10°. Расплавленный припой *2* из ванны подается на верхнюю ступень каскада. Дальнейшее движение припоя происходит самотеком, с последнего гребня припой стекает обратно в ванну. Плату *4*, покрытую флюсом, помещают в кассету и перемещают по направляющим, расположенным под углом 10°. При этом происходит последовательное трехкратное касание мест пайки с припоем, что обеспечивает качественную пайку выводов всех элементов *5*, установленных на печатной плате.

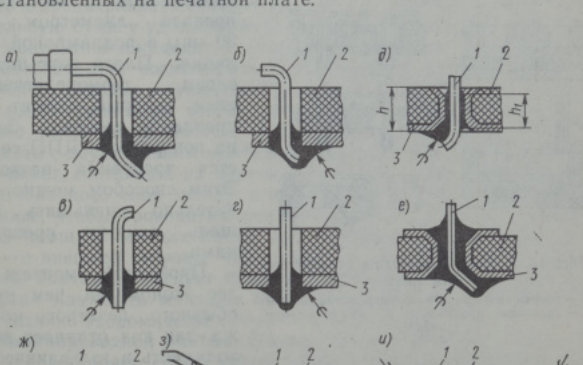


Рис. 13.13. Формы паяных соединений печатных плат:
а—г — с неметаллизированными отверстиями; *д—е* — с металлизированными отверстиями; *ж—и* — с планарными выводами (*1* — вывод; *2* — плата; *3* — контактная площадка)

Заключительной операцией при всех методах групповой пайки является удаление маски. Для этого печатную плату погружают на 0,8 ... 0,9 ее толщины в ванну с горячей водой ($t = 90$ °С) и выдерживают до тех пор, пока она не отклеится (2 ... 3 мин). Затем плату обдувают горячим воздухом до полного высыхания. Удаление флюса осуществляется в ванне со смесью бензина (50%) и спирта (50%).

Форма паяных соединений на печатных платах показана на рис. 13.13. Заполнение припоем металлизированных отверстий производится на высоту $h_1 \geqslant (2/3)h$. Допускаются заливная форма пайки и отсутствие припоя на торцах.

13.3. Проводной монтаж на печатных платах

В единичном и опытном производстве применение МПП нецелесообразно в связи с длительным временем на проектирование и изготовление, а также сложностью внесения изменений при отработке конструкции платы. Более эффективными являются методы, основанные на сочетании проводного и печатного монтажа. В этом случае вместо печатных проводников используют провода диаметром 15... 30 мкм в полиамидной изоляции. Плата покрывается слоем термореактивного клея, который служит для крепления проводов. Затем на поверхности ДПП создается требуемая разводка. Этим способом можно значительно уменьшить площадь, занятую проводниками.

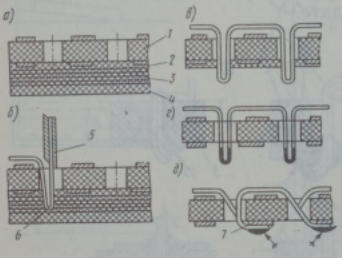


Рис. 13.14. Основные этапы стежкового монтажа:
а — сборка пакета; *б* — формирование петли; *в* — удаление прокладок; *г* — лужение; *д* — пайка

Проводной монтаж более экономичен, чем метод обычного печатного монтажа, так как отпадает необходимость в гальванических процессах. Провода имеют электрическую изоляцию, поэтому их можно прокладывать близко друг к другу и выполнять пересечение. Благодаря этому площадь для размещения схемы может быть уменьшена.

Основными методами проводного монтажа являются стежковый и многопроводный монтаж фиксированными проводами.

Стежковый монтаж. Изолированный провод укладывают на одной стороне ДПП и выводят его в виде петель через монтажные отверстия на другую сторону с присоединением к контактным площадкам платы. Монтаж осуществляется проводом диаметром до 0,15 мм в эмалевой изоляции, которая удаляется в процессе облуживания. Образование петель провода производят путем прошивки трубчатой иглой (рис. 13.14).

Двустороннюю печатную плату *1* устанавливают на эластичную прокладку, состоящую из толстой резины *4*, нескольких слоев тонкой резины *3* и слоя кабельной бумаги *2*. При входе в отверстие игла *5* формирует петлю *6* и прокалывает эластичные прокладки, которые фиксируют петлю. Выходя из отверстия, игла скользит по проводу, а петля остается в прокладке. Затем иглу перемещают по кратчайшему расстоянию к следующему отверстию и цикл повторяют.

Иглу изготовляют из нержавеющей стали со скосом под углом 50 ... 75°. Внутренний диаметр иглы принимается больше диаметра провода на 0,1 мм. Материал прокладки должен хорошо прокалываться иглой и закреплять петли провода. В мягкой прокладке трудно закрепить петлю, так как она будет вытягиваться вместе с иглой. При чрезмерно твердом материале формирование петель будет затруднено. После прокладки проводов резиновые прокладки удаляют, стягивая их с петель. Слой кабельной бумаги остается на плате и предохраняет печатный монтаж при лужении петель. Затем кабельную бумагу удаляют, петли подгибают и производят их пайку к контактной площадке. 7. Размеры контактных площадок должны обеспечивать возможность присоединения провода и вывода элемента, которые осуществляются внахлестку. Паяные соединения имеют скелетную форму. На ДПП со стежковым монтажом можно осуществить монтаж эквивалентной восьмислойной МПП.

Плата с двусторонним монтажом представляет собой спрессованный пакет, состоящий из двух оснований со стежковым монтажом и адгезионного слоя между ними. Основания располагают таким образом, чтобы провода находились внутри, а стороны с контактными площадками для пайки петель провода и выводов элементов — с внешней стороны. Двусторонние печатные платы со стежковым монтажом следует применять только в тех случаях, когда высокая плотность монтажа обеспечивает существенное повышение технико-экономических показателей изделия.

Многопроводной монтаж, фиксируемый проводами. Такой монтаж представляет собой упорядоченное прокладывание изолированных проводов с полиамидной изоляцией на поверхности ДПП. Для фиксации проводов на плату наносят слой адгезива, состоящего из клеевых пленок и стеклоткани. После погружения проводов в слой адгезива производят его окончательное отверждение путем прессования при $t = 180°C$ и давлении 1,5 МПа.

В плате с закрепленными монтажными проводами сверлят отверстия. При этом необходимо, чтобы торец провода по форме соответствовал краю отверстия. После подготовки поверхности отверстие и торец провода подвергаются химико-гальванической металлизации, качество которой определяет надежность электрического соединения проводного и печатного монтажа. На одной стороне такой платы можно разместить несколько слоев проводного монтажа, чередуя нанесение адгезива и раскладку проводов. Плата с тремя слоями многопроводного монтажа эквивалентна одиннадцатислойной МПП.

13.4. Сварка

Сваркой называется процесс получения неразъемного соединения металлических изделий путем местного нагревания их до расплавления или тестообразного (пластического) состояния без

применения или с применением механического усилия. Основными видами сварки являются контактная, электродуговая и диффузионная сварки.

Контактная сварка. Контактная сварка (точечная и шовная) осуществляется методом сопротивления, при котором ток, используемый для нагревания, пропускается последовательно от одного свариваемого изделия к другому через поверхность их соприкосновения.

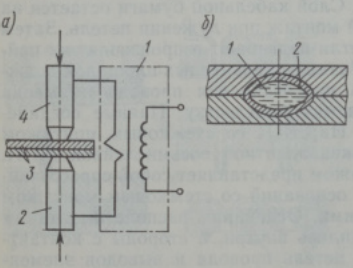


Рис. 13.15. Точечная контактная сварка: *а* — принципиальная схема; *б* — строение сварочной точки

Точечную сварку применяют для соединения листовых материалов небольшой толщины. Свариваемые листы (два или три) вводят в промежуток между медными электродами (рис. 13.15, *а*). При сжатии электродов *2* и *4* от сварочного трансформатора *1* проходит ток. В месте контакта деталей *3* из-за повышенного сопротивления выделяется наибольшее количество теплоты. Центральная часть точки доводится до плавления и образует литое ядро *1* (рис. 13.15, *б*). Расплавленный металл *1* ядра удерживается от вытекания плотным кольцом *2*, нагретым до пластического состояния металла. После выключения тока образовавшаяся точка находится под давлением электродов до окончания процесса кристаллизации расплавленного ядра.

Основными параметрами, определяющими качество соединения, являются сила сварочного тока и длительность воздействия, усилие сжатия электродов и размеры их рабочей поверхности.

Размеры сварочной точки зависят от количества теплоты, выделяемого в зоне сварки, которое определяют по закону Джоуля — Ленца:

$$Q=0{,}24\int_0^t RI^2dt, \qquad (13.3)$$

где I — сила тока, А; t — время сварки, с; R — общее сопротивление в зоне сварки, Ом.

Давление электродов значительно влияет на количество выделяемой теплоты. При малом давлении в месте контакта свариваемых деталей сопротивление большое и металл ядра точки расплавляется быстро; достаточная зона пластичного металла не успевает образоваться и возможно снижение прочности сварочной точки

вследствие выплесков металла. При давлении выше оптимального уменьшаются количество теплоты, выделяемого в месте сварки, и диаметр точки.

Время сварки выбирают таким, чтобы центральная часть точки нагревалась выше температуры плавления. При более низкой температуре сварки не произойдет. Слишком длительный нагрев приводит к образованию большого ядра, которое может выйти за пределы действия электродов, что снижает прочность точки.

Включение тока и сжатие электродов осуществляются с помощью педали, а в автоматических машинах — с помощью специальных электромагнитных или ионных прерывателей.

Большое значение для получения качественного соединения имеет подготовка поверхностей деталей. Свариваемые детали должны плотно прилегать друг к другу в месте контакта и должны быть очищены от грязи, жира и оксидной пленки. Очистку проводят механическим способом (наждачным полотном, щеткой и др.) или химическим (травлением в соответствующих кислотах).

Шовная сварка служит для получения плотных швов внахлестку. В этом случае электроды выполняют в виде роликов. При вращении сжатых роликов свариваемые детали протаскиваются между ними. Сварочные точки располагаются рядом, частично перекрывая друг друга, образуя непрерывный шов. Режим шовной сварки определяется шагом образующих шов точек, усилием, приложенным к роликам, диаметром роликов, скоростью сварки и силой сварочного тока.

Электродуговая сварка. Эта сварка основана на плавлении металла под воздействием электрической дуги, образуемой при прохождении тока через воздушный промежуток между двумя проводниками. Одним из проводников является свариваемый металл, а другим — угольный или металлический электрод.

Особенно важно применение электродуговой сварки при электрическом монтаже. Она обеспечивает надежность соединения при тепловых перегрузках, высокую механическую прочность, надежный электрический контакт, хороший внешний вид соединения, возможность сварки материалов, не поддающихся пайке (нихром, константан и др.). Применение сварки монтажных соединений вместо пайки повышает производительность труда и снижает себестоимость изделия вследствие отсутствия дорогостоящих припоев и флюсов, а также более низких требований, предъявляемых к подготовке поверхностей. Основными недостатками сварки электромонтажных соединений являются невозможность их разъединения в отличие от соединений, выполняемых припоем, и недостаточная стойкость против коррозии. При сварке химически активных металлов и их сплавов используют электродуговую сварку в струе защитных газов (аргона, гелия и др.).

Диффузионная сварка. Для материалов, сварка которых обычными методами затруднена (например, сталь с алюминием, воль-

фрамом, титаном и др.), применяется диффузионная сварка. Ее осуществляют при повышенных температурах с приложением сдавливающего усилия к месту сварки.

Установка для сварки (рис. 13.16) состоит из вакуумной охлаждаемой камеры *2*, внутри которой размещаются свариваемое изделие *4* и нагреватель *3*. Сдавливающее усилие создается штоком *5*, проходящим через вакуумное уплотнение *1*, и механизмом нагружения *6*. После создания в камере вакуума ($133 \cdot 10^{-3}$... $133 \cdot 10^{-5}$ Па) производится нагрев токами высокой частоты до температуры сварки. Глубокий вакуум при местном нагреве и давлении обеспечивает процессы взаимной диффузии с перемещением компонентов соединяемых деталей на расстояния, превышающие межатомные связи. Нагрев способствует ускорению диффузии атомов металлов через поверхность стыка.

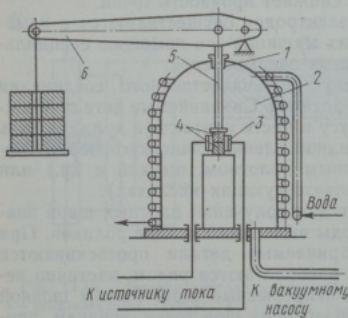


Рис. 13.16. Диффузионная сварка в вакууме

Усилие сжатия прикладывается после нагревания изделия и поддерживается постоянным в течение всего процесса сварки. Величина усилия зависит от свойства металла, температуры сварки и других факторов.

Процесс диффузионной сварки условно можно разделить на две стадии.

На первой стадии создаются условия для образования металлических связей. Для этого необходимо обеспечить тесный контакт свариваемых поверхностей и создать условия для удаления поверхностных пленок оксидов. Тесный контакт обеспечивается за счет использования режимов с повышенными температурами, вследствие чего выступы в зоне контакта деформируются при значительно меньших нагрузках, что дает хороший контакт по всей поверхности свариваемых изделий. Предупреждение образования оксидных пленок достигается тем, что сварка осуществляется в вакууме.

На второй стадии происходят процессы взаимной диффузии атомов свариваемых материалов.

Преимущество диффузионной сварки заключается в том, что свариваемый металл не доводится до плавления. При этом возможно получение высокой точности размеров свариваемого изделия.

13.5. Монтажная микросварка

Обычные методы сварки при выполнении монтажных соединений в интегральных схемах применяют весьма ограниченно, что обусловлено малыми размерами соединений. Микросоединения выполняют золотой или алюминиевой проволокой диаметром менее 50 мкм. Контактные площадки микросхем имеют малую площадь. Для выполнения микросварных соединений используют различные методы сварки. Основными из них являются следующие методы сварки: термокомпрессионная, с косвенным импульсным нагревом, расщепленным электродом, ультразвуковая. Микросварные соединения выполняют на установках, оснащенных оптическими устройствами и манипуляторами.

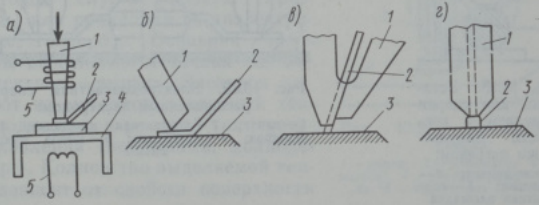


Рис. 13.17. Термокомпрессионная сварка:
а — принципиальная схема; *б* — клином; *в* — с помощью двух игл; *г* — капилляром

Термокомпрессионная сварка. Она осуществляется при одновременном воздействии повышенной температуры и давления (рис. 13.17).

Свариваемые детали *2* и *3* (рис. 13.17, *а*) устанавливают на рабочий стол *4*. Пуансон *1* имеет вертикальное перемещение. Давление можно регулировать в определенных пределах. Теплота подводится к пуансону и рабочему столу от нагревателя *5*, представляющего собой нихромовую спираль.

Нагрев увеличивает пластичность выводов и позволяет уменьшить усилие, необходимое для их деформации. В зависимости от конкретных условий усилие выбирают в пределах 0,5 ... 1,8 Н, температуру 250 ... 400°С, время сварки 5 ... 30 с. При термокомпрессионной сварке часто применяют защитную среду (аргон, азот и др.).

Пуансон изготовляют из материалов, не обладающих адгезией к металлическому проводнику в условиях сварки. К таким материалам относятся вольфрам, молибден, оксид бериллия и др. Инструмент может иметь форму клина (рис. 13.17, *б*) двух игл (рис. 13.17, *в*) или капилляра (рис. 13.17, *г*).

Механизм образования термокомпрессионного соединения связан с разрушением оксидной пленки и созданием тесного контакта между соединяемыми поверхностями. При этом происходит диспергирование поверхностных пленок с последующей взаимной диффузией металлов.

Свойства термокомпрессионного соединения зависят от размеров и материалов проводника. По мере увеличения площади сечения проводника прочность соединения уменьшается. Это объясняет-

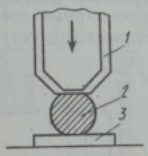


Рис. 13.18. Установка для сварки давлением с косвенным импульсным нагревом:
1 — инструмент; *2* — проволока; *3* — контактная площадка

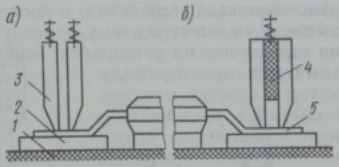


Рис. 13.19. Электроконтактная сварка расщепленным электродом:
1 — плата; *2* — контактная площадка; *3* — электрод; *4* — прокладка; *5* — вывод микросхемы

ся повышением теплопотерь через проводник. Кроме того, для обеспечения нужных деформаций требуются более высокие давления. Для выводов применяют специальные материалы (обычно золото, позолоченную медь), обладающие хорошими электрическими и механическими свойствами.

Термокомпрессионная сварка получила широкое распространение. Недостатками ее являются высокие требования к качеству подготовки поверхности соединяемых деталей, низкая производительность процесса (не более 200 соединений в час) и низкая надежность при сварке алюминиевых проводов.

Сварка с косвенным импульсным нагревом. Такая сварка является наиболее прогрессивной. Она отличается от термокомпрессионной тем, что рабочий инструмент нагревается только в момент сварки, а выделение теплоты сосредоточено в нижней части инструмента.

Электрод-инструмент под небольшим давлением приводится в соприкосновение с проводником (рис. 13.18). При прохождении импульса тока торец электрода нагревается и локально нагревает проводник до более высокой температуры, чем при термокомпрессионной сварке. При этом проводник переходит в пластическое состояние, происходит его осадка под воздействием давления и образуется соединение.

Электрод имеет У-образную форму, что позволяет регулировать продолжительность и степень нагрева с большой точностью. Размеры электрода выбирают такими, чтобы разогревался только его торец, т. е. та часть, которая непосредственно контактирует со свариваемым элементом. Усилие сжатия зависит от пластичности материала и диаметра привариваемой проволоки. Для золотых и алюминиевых проводов давление берут в пределах 0,5 ... 5 Н, а температуру 400 ... 490° С.

Электроконтактная сварка расщепленным электродом (рис. 13.19). Эта сварка осуществляется за счет нагрева при пропускании электрического тока через свариваемые проводники между изолированными друг от друга электродами. Изолятором служит воздух (рис. 13.19, *а*) или прокладка из диэлектрика (рис. 13.19, *б*). Основная часть теплоты выделяется в точках контакта «электрод — вывод». Электрод выполняют из металлов с хорошей теплопроводностью и высокой температурой плавления (вольфрама, молибдена и др.). Количество выделяемой теплоты зависит от свойств поверхности раздела.

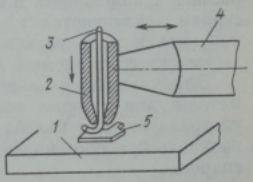


Рис. 13.20. Ультразвуковая сварка:
1 — плата; *2* — капилляр; *3* — проволока; *4* — ультразвуковая головка; *5* — контактная площадка

При нагреве проводников и наличии давления электродов выступы, нагретые до температуры рекристаллизации, сминаются. Площадь контакта вследствие этого увеличивается и облегчается сцепление за счет металлических связей. Длительность нагрева при сварке сдвоенным электродом значительно меньше, чем при сварке с косвенным импульсным нагревом, и возможность повреждения элементов схемы сведена к минимуму.

Расщепленный электрод применяют и для бесфлюсовой пайки. В отличие от сварки здесь нагрев требуется только для расплавления припоя, предварительно нанесенного на соединяемые детали. Этот метод особенно пригоден в тех случаях, когда подводить припой в момент нагрева затруднительно.

При пайке сопротивлением необходимо строгое соблюдение режимов технологического процесса. Для этого используют схемы с обратной связью, работающие по принципу поддержания определенного напряжения между электродами или сохранения заданной температуры.

Ультразвуковая сварка. Ультразвуковая сварка позволяет получить неразъемное соединение металлов при совместном воздействии на деталь механических колебаний высокой частоты и относительно небольших сдавливающих усилий (рис. 13.20). Это воздействие приводит к разрушению оксидных пленок и сглаживанию неровностей с созданием чистых поверхностей, что интенси-

фицирует процесс образования активных центров и приводит к образованию соединения.

Для выполнения монтажных соединений в микросхемах используют ультразвуковые генераторы мощностью около 100 Вт с частотой колебаний 20 ... 60 кГц и при амплитуде колебаний инструмента 0,5 ... 10 мкм.

Преимуществами ультразвуковой сварки являются отсутствие нагрева, что позволяет соединять химически активные металлы; возможность соединения тонких деталей; небольшие усилия. Время, затрачиваемое на сварку, вдвое меньше, чем при термокомпрессии, а надежность в 3 раза выше. Недостатки ультразвуковой сварки заключаются в сложности поддержания режима в зоне контакта и в более высоких требованиях, предъявляемых к поверхности соединяемых деталей, чем при термокомпрессии.

Для улучшения качества сварки применяют комбинированные методы, при которых косвенный импульсный нагрев сочетается с ультразвуковыми колебаниями. Микросварные соединения можно получить при помощи лазерной, электронно-лучевой и плазменной сварок.

13.6. Склеивание

Склеивание применяют для неразъемного соединения деталей из различных материалов (металлических и неметаллических) в любых сочетаниях. В основе процесса склеивания лежит явление адгезии, т. е. способность некоторых веществ прилипать к поверхности других материалов. Адсорбционная теория (теория молекулярных сил) объясняет адгезию и когезию (сцепление между молекулами самого клея) главным образом взаимодействием сил Ван-дер-Ваальса, т. е. сил притяжения между незаряженными молекулами склеиваемых тел.

При склеивании обеспечивается гладкая поверхность изделия и герметичность соединения. Преимущества клеевого соединения по сравнению с заклепочными заключаются в том, что уменьшается стоимость соединения, так как отпадает необходимость в сверлении отверстий и изготовлении заклепок и обеспечивается равномерное распределение напряжений. Последнее обусловливает более высокие статические и динамические характеристики прочности соединения, которые для тонких листов превышают прочность материала.

Преимущество склеивания состоит также в том, что при соединении разных металлов вследствие изоляционных свойств клея отсутствует контактная коррозия. Кроме того, благодаря наличию клеевой пленки затрудняется передача колебаний.

Недостатками клеевых соединений являются сравнительно низкая прочность, незначительная тепловая стойкость, а также длительность технологического процесса (длительная выдержка при

отверждении), что затрудняет сборку таких соединений на потоке. Для клеевых соединений недопустимы длительные нагрузки, так как эти соединения склонны к ползучести (текучести).

Клеи выпускают в виде жидких, пастообразных и твердых веществ (прутки, гранулы, порошки, пленки) или нанесенными на подложку (клеящие ленты, ткани и т. д.). Клеи могут быть холодного и горячего отверждения.

Обычно клей — это композиционные материалы, в состав которых входят связующие вещества, растворители, наполнители, пластификаторы и катализаторы.

Связующая основа обладает клеящими свойствами и обеспечивает необходимую прочность соединения. Растворители определяют вязкость клея, а наполнители (металлические порошки, волокнистые материалы и др.) увеличивают прочность, уменьшают усадку и повышают вязкость. Пластификаторы повышают эластичность пленки, а катализаторы ускоряют процесс отверждения клея.

В зависимости от назначения клеи делят на конструкционные и неконструкционные (табл. 13.1) Конструкционные клеи (на основе термореактивных смол) используют для получения прочных соединений, а неконструкционные (на основе термопластичных смол) — для ненагруженных соединений.

Наиболее перспективными являются эпоксидные клеи, отверждающиеся без выделения побочных продуктов. Они универсальны, выдерживают кратковременный нагрев до $t=430°C$. Прочность эпоксидных клеев почти не зависит от толщины клеевого слоя, что значительно упрощает их нанесение. Обычно адгезионные свойства таких клеев выше когезионных. Вследствие малой ползучести они деформируются под действием длительной нагрузки значительно меньше, чем другие клеи.

В микроэлектронных устройствах для создания электрических контактов применяют токопроводящие клеи (контактолы). Адгезионные свойства таких клеев определяются связующей основой (эпоксидной смолой и др.), а проводимость достигается применением наполнителей (мелкозернистых порошков золота, серебра, меди и др.). Скорость загустения контактолов зависит от состава и количества растворителя. Приготовленный контактол хранят при температуре ниже нуля в парах растворителя.

Контактол наносят с помощью шприца, что позволяет дозировать количество клея. Это имеет важное значение для обеспечения высокого качества контактного соединения. Если капля окажется слишком большой, то она может не затвердеть после высыхания наружной области. Такое же явление произойдет при быстрой горячей сушке (при $t=75°C$) без выдержки на воздухе в течение 1 ч.

Удельное сопротивление проводящего эпоксидного клея находится в пределах $1 \cdot 10^{-2} ... 6 \cdot 10^{-4}$ Ом·см.

Прочность клеевого соединения определяется не только силами адгезии, но и когезии. Опасные внутренние напряжения в

клеевых соединениях могут быть значительно ослаблены, если клеевой слой делать тонким (в пределах 0,05 ... 0,25 мм). При значительных неровностях склеиваемых поверхностей надо применять безусадочные клеи или вводить в состав клея порошкообразные наполнители.

Процесс склеивания состоит из следующих этапов: подготовка поверхностей соединяемых деталей, нанесение клея, его подсушивание (открытая выдержка) и отверждение клеевых соединений.

Таблица 13.1

Марка клея	Прочность при сдвиге, МПа	Режимы склеивания			Связующая основа клея и примеры применения
		температура, °С	время, ч	давление, МПа	
Конструкционные клеи					
БФ-4	7	60 ... 80 120 ... 130	6 ... 8 4	0,1 ... 0,5	Фенолформальдегидная смола. Склеивание медной фольги с диэлектриком, магнитопроводов и др.
ВК-3	19	165	1	0,5 ... 1	Фенолформальдегидная смола, склеивание металлических деталей с неметаллическими
ЭКС-4	7,5	140	2	0,1	Эпоксидная смола. Склеивание пластин магнитных головок
ВК-9	7,5	25	24	0,2	Эпоксидная полиамидная смола. Для герметизации микросхем, крепления навесных элементов
К-400	17	25	48	0,1	Эпоксидная, кремнийорганическая и полиамидная смолы. Приклеивание стекол, герметизация микросхем
Неконструкционные клеи					
АК-20	—	25	8	0,4	Нитроцеллюлоза. Склеивание ткани, кожи, микросхем на печатной плате
88-НП	—	25	24 ... 28	0,1	Каучук. Склеивание резины

Подготовка поверхностей соединяемых деталей. Чтобы места соединения могли быть хорошо смочены клеем, их необходимо очистить. Очистку (обезжиривание и промывку) осуществляют в ацетоне, бензине и водных растворах, различных моющих веществ. Признаком чистой и хорошо смачиваемой поверхности является сохранение на ней сплошной пленки воды в течение 1 ... 2 мин.

Большое влияние на прочность соединения оказывает шероховатость поверхности. Наибольшая прочность получается при шероховатости поверхности соединяемых деталей R_a 10 ... 2,5 мкм.

Нанесение клея. Клеи наносят кисточкой, пульверизатором или погружением. Для вязких клеев применяют накатывание, а пастообразные клеи наносят шпателем. Толщину наносимой пленки клея берут в пределах 0,05 ... 0,25 мм. При более толстых пленках наблюдается значительное уменьшение прочности соединения.

Подсушивание клея. Подсушивание клея необходимо для удаления растворителя. Оно может быть выполнено без нагревания или при повышенной температуре, которая не должна вызывать преждевременного отверждения клея. Степень удаления растворителя влияет на прочность и пористость клеевого соединения. Клеи, не содержащие растворителей (например, эпоксидные), не требуют открытой выдержки.

Соединение деталей, покрытых клеем, выполняется в приспособлениях, обеспечивающих определенное их положение. Необходимое давление создается грузом, струбцинками, пружинными зажимами, винтами и т. д.

Время, необходимое для достижения клеевым соединением при определенной температуре оптимальной прочности, называется *временем отверждения*.

Горячее отверждение производится в нагревательных печах с принудительной циркуляцией воздуха, в подогреваемых приспособлениях и пресс-формах.

Важнейшим показателем качества клеевых соединений является предел прочности при сдвиге

$$\tau = P/F, \qquad (13.4)$$

где P — разрушающая сила; F — площадь склеивания.

На качество клеевых соединений большое влияние оказывают режимы технологического процесса (температура, время, давление при склеивании), а также шероховатость и неплоскостность склеиваемых поверхностей, толщина пленки клея и физико-химические свойства клеевой пленки.

Клеящие вещества в большинстве случаев токсичны, поэтому на всех этапах технологического процесса необходимо соблюдать правила техники безопасности и охраны труда.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОБЩАЯ СБОРКА ЭВМ

ГЛАВА 14

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

14.1. Виды функциональных элементов

Основным методом разработки электронных устройств является разделение сложной электрической схемы на функциональные элементы (ФЭ), из которых собирают более сложные устройства.

Функциональным элементом (модулем) называется конструктивно и функционально законченная часть схемы, имеющая унифицированные размеры и способная самостоятельно и в совокупности с другими элементами решать требуемые задачи.

Применение ФЭ значительно сокращает время на проектирование новых изделий. При этом резко уменьшается объем технической документации, которая разрабатывается только на специальные модули, ускоряется процесс оформления общих видов, принципиальных схем и др.

Эксплуатационная надежность устройства увеличивается, поскольку исключается возможность применения случайных и неотработанных схем. Номенклатура модулей должна постоянно обновляться на базе новейших схемных решений.

Функциональные модули изготовляют на специализированном производстве, что позволяет снизить их стоимость, так как процесс изготовления и контроля модулей может быть автоматизирован.

Эффективность применения ФЭ зависит от ряда факторов, важнейшими из которых являются следующие.

Универсальность функционального элемента. Она заключается в возможности применения его в возможно большем числе электронных устройств.

Размерная и функциональная взаимозаменяемость. Она обеспечивает возможность замены модуля без применения подгоночных операций и смены остальных модулей, удовлетворяющих техническим требованиям.

Унификация конструкций. Унификация заключается в приведении модулей к наименьшему числу типоразмеров. Наиболее удобной геометрической формой является параллелепипед.

Стабильность параметров, т. е. модуль должен обеспечивать заданные выходные значения при наихудшем сочетании параметров электроэлементов, изменении напряжения источников питания, механических и климатических условий.

Высокая надежность. Она обеспечивается рационально разработанной схемой и конструкцией, правильно выбранной и реализованной технологией изготовления, а также соответствующими условиями эксплуатации.

Технологичность. Конструкция модуля и блока должна предусматривать возможность применения высокопроизводительных методов изготовления деталей и сборки, разделения технологического процесса монтажа на отдельные операции и т. п. Эти требования можно реализовать за счет использования типовых элементов, сокращения номенклатуры применяемых деталей и материалов, возможности групповой пайки, наличия деталей с простой формой выводов.

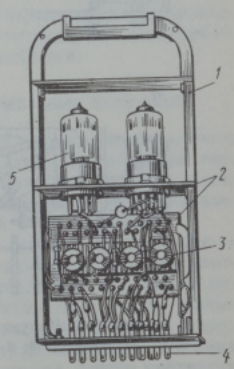


Рис. 14.1. Пример конструктивного выполнения ячейки

Малые размеры модуля. Уменьшение размеров функционального элемента является характерной особенностью развития электроники и оценивается рядом коэффициентов. Наиболее часто используются коэффициенты плотности упаковки $K_у$ и заполнения объема $K_{зо}$:

$$K_у = n/v; \qquad (14.1)$$

$$K_{зап} = v_{акт}/(v - v_{акт}), \qquad (14.2)$$

где n — число элементов и компонентов; v — объем функционального элемента без учета объема выводов; $v_{акт}$ — объем, занимаемый материалами, без которых невозможно выполнение заданного физического процесса, например кристалл полупроводникового материала в транзисторе, сердечник магнитопровода, обмотка трансформатора и др.

Функциональные элементы, применяемые в ЭВМ, можно разделить на две большие группы: 1) модули и микромодули на дискретных компонентах; 2) интегральные микросхемы и микросборки.

К ФЭ первой группы относятся ячейки (ламповые, безламповые); модули (плоские, объемно-залитые, объемно-гнездовые и др.)

Ячейки применялись в ЭВМ первого поколения. Они представляют собой металлическую рамку *1*, в которой размещаются на пластмассовых панелях *2* электронные лампы *5*, дискретные электрорадиоэлементы *3* (ЭРЭ) и электрический соединитель *4*, (рис.

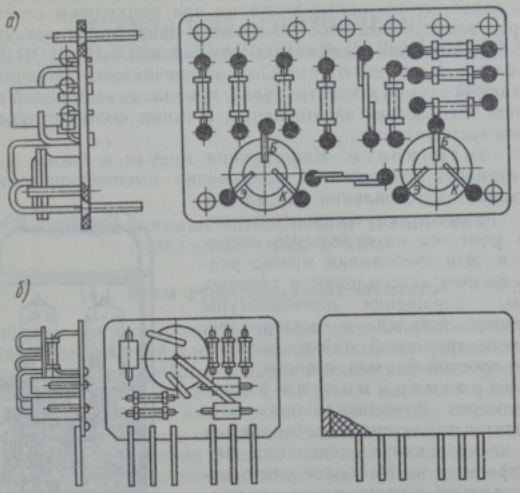


Рис. 14.2. Модули на дискретных компонентах
а — плоский; *б* — объемно-залитой (до и после заливки)

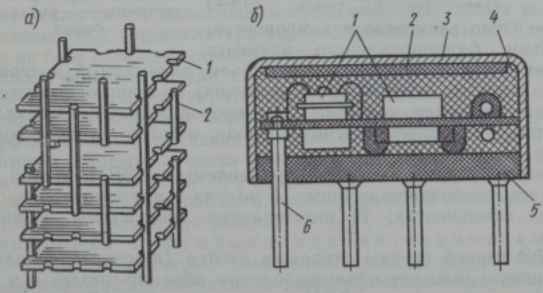


Рис. 14.3. Микромодули:
а — этажерочного типа (до заливки) (*1* — плата, *2* — соединительные проводники); *б* — плоский микромодуль (*1* — бескорпусные ЭРЭ, *2* — изоляционная прокладка, *3* — колпачок, *4* — заливочная масса, *5* — компаунд, *6* — вывод)

14.1). Основные недостатки ячейки — низкая надежность, большие габаритные размеры, высокая потребляемая мощность.

Модули используют в ЭВМ второго поколения. Плоские модули (рис. 14.2, *а*) представляют собой печатную плату стандартных размеров, на которой монтируются различные ЭРЭ. Объемно-залитые модули (рис. 14.2, *б*) имеют более высокую виброустойчивость и хорошую защиту от влаги. Микромодули этажерочного типа и плоские (рис. 14.3) собирают на керамической плате и защищают от воздействия внешней сферы заливкой компаундом и металлическим кожухом.

В ЭВМ третьего поколения основными ФЭ являются микросхемы среднего уровня интеграции, а в ЭВМ четвертого поколения — большие интегральные микросхемы и микросборки.

14.2. Микроминиатюризация функциональных элементов

В качестве общего названия различных методов значительного уменьшения размеров электронной аппаратуры применяется термин «микроминиатюризация». Одним из наиболее удобных показателей степени микроминиатюризации является количество элементов электрической схемы, размещенной в 1 см^3 объема.

Плотность монтажа можно повысить за счет миниатюризации — уменьшения размеров обычных навесных элементов и более плотного их размещения, что широко используется при модульном методе проектирования. Применение малогабаритных ламп, уменьшение размеров полупроводниковых триодов, конденсаторов и других навесных элементов позволяет получить плотность монтажа до 0,1 см^3. В микромодулях плотность монтажа можно увеличить до 10 ... 20 дет/см^3.

Микроминиатюризации свойственны трудности, связанные с рассеянием теплоты и вопросом о допустимых уровнях мощности. Для того чтобы температура внутри электронного устройства не превышала допустимую, оно должно иметь вполне определенную величину поверхности рассеяния теплоты. Если в тот же объем поместить значительно большее число элементов с такой же мощностью рассеяния, то температура внутри устройства превысит допустимую величину и оно выйдет из строя.

В связи с этим большое значение имеет разработка схем с меньшей мощностью рассеяния, а также использование материалов и элементов, способных выдерживать более высокие температуры. В настоящее время средняя мощность рассеяния одной интегральной логической схемы равна примерно 10 мВт. Имеется тенденция уменьшения этой величины. Но так как мощность рассеяния растет пропорционально скорости работы схемы, то проблема отвода теплоты всегда будет существовать.

Проблема теплоотдачи решается также путем увеличения диаметра токопроводящих жил, создания больших металлизирован-

ных площадок на платах с печатными схемами, применения элементов специальной формы, предусматривающих пространство для движения воздуха, который может быть охлажден. В последнем случае требуется специальная аппаратура для подачи воздуха.

Важное значение имеет правильное размещение элементов. Элементы, выделяющие большое количество теплоты, помещают вблизи теплообменника (если он применяется), а радиодетали, чувствительные к повышенным температурам, располагают возможно дальше от сильно нагревающихся деталей. В ряде конструкций применяют отвод теплоты через эпоксидные заливочные материалы, имеющие металлический заполнитель. Заливочный материал отводит теплоту от всех радиодеталей равномернее, чем металлический проводник.

Трудностью микроминиатюризации является также соединение узлов в блоки и устройства. При высокой плотности монтажа объем, приходящийся на соединения, становится соизмеримым с объемом самих блоков. Для электронных устройств с повышенной степенью интеграции характерно наличие паразитных связей, имеющих емкостный и индуктивный характер. Уровень паразитных связей повышается при увеличении числа пересечений проводников и уменьшением толщины изоляции. Помехи можно снизить путем увеличения расстояния между проводниками и расположения их во взаимно перпендикулярном направлении. Предельный уровень микроминиатюризации определяется также технологическими ограничениями.

14.3. Интегральные микросхемы и микросборки

Элементной базой современных ЭВМ являются микросхемы.

Интегральная микросхема (ИС) представляет собой ряд элементов, который нераздельно выполнен и электрически соединен между собой таким образом, что с точки зрения технических требований, испытаний, торговли и эксплуатации рассматривается как целое (ГОСТ 17021—88). Микросхему рассматривают как единое изделие, имеющее высокую плотность расположения элементов и (или) компонентов, эквивалентных элементам обычной схемы.

Элемент — часть ИС, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента (ЭРЭ), например транзистора, резистора и др., которая выполнена нераздельно от кристалла или подложки и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований, предъявляемых к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

Компонент — часть ИС, реализующая функция какого-либо ЭРЭ. Компонент может быть выделен как самостоятельное (комплектующее) изделие и отделен от ИС. По функциональному назначению ИС делят на аналоговые и цифровые.

Аналоговые ИС служат для преобразования и обработки сигна-

лов, изменяющихся по закону непрерывной функции. Их применяют в аналоговых вычислительных машинах (АВМ), измерительных приборах, системах контроля. Особое место среди аналоговых ИС занимают операционные усилители, которые являются универсальным базовым элементом для построения аналоговых узлов.

Цифровые ИС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной, например двоичной, функции. Переменные величины и функции от них, которые могут принимать только два значения: 0 и 1, — называются *логическими переменными*.

Логические ИС выполняют операции конъюнкции (И), дизъюнкции (ИЛИ), инверсии (НЕ) и более сложные логические операции. Они могут состоять из нескольких логических элементов, объединенных единой подложкой и корпусом, и, как правило, имеют общие выводы для подключения источника питания.

Большинство цифровых ИС включают триггеры, которые обычно выполняются на логических элементах и реализуют переключающие функции. Наряду с простейшими ИС изготовляются микросхемы, реализующие функции типовых узлов ЭВМ. Такими узлами являются регистры, счетчики, сумматоры, запоминающие устройства и др.

Сложность ИС характеризуется *степенью интеграции*, т. е. числом содержащихся в ней элементов:

$$K = \lg N, \qquad (14.3)$$

где K — коэффициент, определяющий степень интеграции (значение K округляют до ближайшего целого числа); N — число элементов интегральной микросхемы, в том числе содержащихся в составе компонентов, входящих в интегральную микросхему.

Различают интегральные микросхемы шести степеней интеграции: первой степени интеграции — до 10 элементов и компонентов; второй степени — свыше 10 ... 10^2; третьей степени — свыше 10^2 ... 10^3; четвертой степени — свыше 10^3 ... 10^4; пятой степени — свыше 10^4 ... 10^5; шестой степени — 10^5 ... 10^6.

В зависимости от числа компонентов и элементов, а также технологии изготовления различают малые, средние, большие и сверхбольшие ИС. Так, например, большой интегральной микросхемой (БИС) называется ИС, содержащая 500 элементов и более, изготовленных по биполярной технологии, 1000 элементов и более, изготовленных по МОП-технологии.

Показатель степени интеграции особенно важен для цифровых ИС, так как чем меньше схемный элемент, тем выше его быстродействие.

Интегральные схемы. По конструктивно-технологическому исполнению ИС делятся на три группы: полупроводниковые, гибридные и прочие. К прочим относятся пленочные ИС, вакуумные и керамические. Этим группам в системе условных обозначений

присвоены следующие цифры: 1, 5, 6, 7 — полупроводниковые ИС (обозначение 7 присвоено бескорпусным ИС); 2, 4, 8 — гибридные ИС; 3 — прочие ИС.

Полупроводниковые ИС. Они являются основными элементами ЭВМ. Имеют высокую надежность, обеспечивают большую плотность упаковки элементов и низкую стоимость при крупносерийном производстве.

Полупроводниковые ИС изготовляют на специализированных предприятиях. Наряду с этим применяют микросхемы специального назначения со специфическими функциями и электрическими характеристиками. Разработка и производство таких микросхем осуществляются неспециализированными предприятиями, так как потребность в них относительно небольшая.

В качестве микросхем специального назначения широко применяют гибридные тонко- и толстопленочные интегральные схемы (ГИС), которые дают возможность получения высококачественных пассивных элементов. Паразитные емкости пленочных резисторов примерно в 10 раз меньше, чем у диффузионных, и последующая подгонка дает возможность повысить точность резисторов до $\pm 0{,}1\%$.

Недостатками ГИС являются низкая плотность компоновки, более высокая стоимость и малая надежность.

Тип микросхемы выбирают прежде всего исходя из показателей назначения, определяющих соответствие их требованиям технических условий.

Полная номенклатура параметров микросхем, выпускаемых промышленностью, приводится в справочниках и отраслевых стандартах. Эта номенклатура постоянно пополняется схемами вновь освоенными промышленностью.

При выборе типа микросхемы необходимо также учитывать эффективность их производства и эксплуатации.

Производство полупроводниковых ИС требует больших капитальных затрат и оправдывает себя при достаточно большом объеме производства (более 50 тыс. в месяц). Наиболее дешевыми при мелкосерийном производстве являются толстопленочные ГИС. При одинаковых рабочих характеристиках тонкопленочные ГИС будут дешевле толстопленочных, если они изготовляются в количестве больше 10 тыс. в месяц.

При мелкосерийном производстве простота разработки и производства обеспечивают преимущество ГИС.

В табл. 14.1 приведена сравнительная характеристика параметров различных типов микросхем. Для оценки показателей использована четырехбалльная шкала: 3 — отлично; 2 — хорошо; 1 — удовлетворительно; 0 — неудовлетворительно.

В каждом конкретном случае необходимо учитывать дополнительные (специфичные) показатели (перспективность изделия, состояние производственной базы и др.).

Микросборка представляет собой микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала, состоящее из элементов и (или) компонентов, размещенных на общей подложке, разрабатываемое для конкретной аппаратуры с целью улучшения показателей ее миниатюризации и рассматриваемое как единое целое с точки зрения требований к приемке, поставке и эксплуатации.

Таблица 14.1

Наименование параметра	Полупроводниковые схемы	Тонкопленочные ГИС	Толстопленочные ГИС
Предельная мощность	1	2	3
Предельное напряжение	1	3	3
Быстродействие	3	1	1
Интеграция элементов	3	1	1
Паразитные связи	1	3	3
Точность и стабильность пассивных элементов	1	3	2
Надежность	3	2	2
Стоимость подготовки производства	1	2	3
Стоимость при крупносерийном производстве	3	2	1
Стоимость при мелкосерийном производстве	1	2	3
Длительность производственного цикла	1	2	3
Число операций технологического процесса	1	2	3
Капитальные затраты на оборудование	1	2	3
Воспроизводимость технологического процесса	1	2	3
Трудоемкость монтажных работ	3	2	2

Выпуск микросборок характеризуется малым объемом и большой номенклатурой, что ограничивает выбор методов их изготовления.

ГЛАВА 15
ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

15.1. Подложки тонкопленочных микросхем

Тонкопленочными интегральными микросхемами называются микросхемы, все элементы и межсоединения которых выполнены на одной общей подложке в виде пленок из резистивных, диэлектрических, проводящих и других материалов толщиной от

нескольких сотых до десятых долей микрометра (но не более 1 мкм).

Пассивные элементы схемы (резисторы, конденсаторы и др.) изготовляют методами тонкопленочной технологии; активные элементы схемы (диоды, транзисторы и др.) — по обычной технологии, но в миниатюрном или бескорпусном оформлении и монтируют на подложке.

Тонкопленочные микросхемы, в которых используются навесные активные элементы, называют *гибридными интегральными микросхемами*.

Достоинства тонкопленочных микросхем — возможность получения резисторов и конденсаторов с широким диапазоном номиналов и точными параметрами, высокая температурная стабильность их и возможность автоматизации процесса напыления.

Надежность повышается за счет сокращения числа соединений в схеме и уменьшения механических напряжений от ударов, ускорений и вибраций вследствие уменьшения массы. Ускорение в $1000g$ воздействует на элемент с массой 1 мг силой 0,01 Н.

Основной недостаток тонкопленочных интегральных микросхем — невозможность изготовления в настоящее время по тонкопленочной технологии активных элементов схемы. Это связано с трудностью получения монокристаллических полупроводниковых пленок на аморфных и поликристаллических подложках, обычно применяемых для тонкопленочных микросхем. Необходимость в монтаже активных элементов снижает надежность и увеличивает стоимость микросхем.

Конструктивной основой тонкопленочных микросхем является изоляционная подложка, которая существенно влияет на параметры тонких пленок и надежность всей схемы. Общие требования, предъявляемые к подложке независимо от конструкции и назначения микросхем, следующие: гладкая поверхность, высокая плоскость, беспористость, механическая прочность, близость коэффициентов термического расширения подложки и пленки, хорошая теплопроводность, стойкость к термоударам, химическая стойкость, большое удельное электросопротивление, низкая стоимость.

Гладкая поверхность (R_a 0,01...0,04 мкм) необходима для обеспечения однородности и воспроизводимости электрических параметров схемных элементов. Например, шероховатость поверхности может влиять непосредственно на эффективную длину пробега электронов.

Плоскостность поверхности (особенно волнистость) влияет на четкость линий при фотолитографическом процессе. Если поверхность фоторезиста не имеет хорошего контакта с фотошаблоном, то четкость отдельных участков будет ухудшаться. Отклонения от плоскостности допускаются в пределах 0,1 ... 5 мкм/мм.

Беспористость (высокая плотность) материала подложки позволяет исключить интенсивное газовыделение, так как

плотные материалы (сапфир и некоторая керамика) могут нагреваться до высоких температур и обезгажены более тщательно.

Механическая прочность зависит от модуля упругости. Подложки должны обладать значительной механической прочностью при небольших толщинах. В процессе обработки подложки могут возникать поверхностные трещины, которые снижают модуль упругости.

Стойкость к термоударам характеризуется коэффициентом термического расширения, который определяет напряжения, возникающие в подложке при резком изменении температуры.

Химическая стойкость подложки важна на всех стадиях ее обработки. Наиболее высокую химическую стойкость имеют подложки из оксида бериллия и сапфира. На них не оказывают действия растворы на основе плавиковой кислоты и длительное пребывание во влажной среде.

Большое удельное электросопротивление и хорошая теплопроводность являются важными требованиями в связи с повышением уровня интеграции микросхем. Первыми материалами, из которых изготовлялись подложки, были стекло и керамика.

Стеклянные подложки имеют гладкую поверхность и обладают хорошей адгезией со всеми материалами, применяемыми для изготовления тонкопленочных микросхем. К недостаткам подложек из стекла относятся плохая теплопроводность, малая прочность и трудности, связанные с механической обработкой.

Керамические подложки обладают повышенной механической прочностью и теплопроводностью. Их применяют для схем, рассеивающих большие мощности. Максимальная высота неровностей полированной керамической подложки из материала 22ХС составляет 0,02 мкм, что допустимо при толщине пленки не менее 0,1 мкм. Возможность получения сквозных отверстий в подложке позволяет присоединять обычные элементы (транзисторы, диоды и др.), что расширяет функциональные возможности схемы. Сквозные отверстия используют также для проволочных выводов, которые перед пайкой расклепывают в отверстиях.

В настоящее время основным материалом, применяемым для изготовления подложек, являются ситаллы (марка СТ-50-1 и др.), которые получают термической обработкой стекла. При такой обработке стекло выдерживают некоторое время при температуре, близкой к температуре плавления, что приводит к частичной кристаллизации и образованию мелкой однородной и равномерно распределенной кристаллической структуры. По своим физико-механическим свойствам ситалл превосходит стекло, так как имеет большую теплопроводность, теплостойкость и механическую прочность. Его можно прессовать, вытягивать, выдувать, прокатывать и отливать. Температура деформации ситалла составляет 1150 °С. Материал выдерживает резкие перепады температур в воздушной среде (от +700 до —60 °С). Ситалл обладает высоким электрическим со-

противлением, которое уменьшается с повышением температуры до 400°С, и имеет высокую химическую стойкость.

Для изготовления подложек ограниченного применения используют фотоситалл и монокристаллические материалы.

Фотоситалл получают путем кристаллизации светочувствительного стекла. Основными составными частями фотоситалла являются оксиды кремния (75%), лития (11,5%), алюминия (10%) и калия (3,5%) с небольшими добавками азотнокислого серебра и диоксида церия. Фотоситалл инертен к кислотам, обладает высокой механической и термической стойкостью. При воздействии ультрафиолетового облучения на фотоситалле проявляется конфигурация рисунка фотошаблона.

Наиболее перспективными являются монокристаллические материалы и, в частности, синтетический сапфир. На подложках из таких материалов можно получать активные элементы схемы. Подложки из сапфира обладают хорошими физико-механическими свойствами и однородным составом. Однако такие подложки имеют высокую стоимость. Высокой теплопроводностью обладают алюминиевые подложки с оксидным слоем в качестве электроизоляции. Подложки тщательно очищают, так как любые загрязнения ухудшают условия конденсации, влияют на текстуру тонкой пленки и ее адгезию. Подложки из ситалла очищают кипячением в водном растворе перекиси водорода и аммиака. Затем производятся промывка, кипячение в дистиллированной воде и сушка в парах изопропилового спирта. Очищенные подложки хранят в эксикаторах или в 95%-ном этиловом спирте. Непосредственно перед напылением подложки подвергаются окончательной очистке в вакуумной камере с помощью ионной бомбардировки. При этом удаляются поверхностные слои материала вместе с различными загрязнениями и адсорбированными газами.

Наиболее простой метод контроля качества очистки — испытание на разрыв высыхающей пленки дистиллированной воды. При этом подложку погружают в сосуд с дистиллированной водой при 20°С и вынимают из воды в вертикальном положении. В течение 1 мин наблюдают за поверхностью подложки. Подложка считается свободной от загрязнений, если водная пленка распределяется по ее поверхности тонким сплошным слоем в течение не менее 1 мин. Если поверхность загрязнена, то пленка будет разрываться и стягиваться к смоченным участкам.

Для количественной оценки степени смачиваемости поверхности измеряют угол смачивания, который зависит от соотношения сил когезии внутри капли и адгезии между подложкой и каплей. Чем меньше этот угол, тем лучше качество очистки. Значение угла смачивания не должно превышать 3°.

Метод царапины основан на измерении усилия перемещения металлической иглы (обычно титановой) по поверхности подложки. При таких испытаниях увеличивают груз до тех пор, пока не полу-

чат видимой царапины. Этот способ оценки чистоты подложки дает воспроизводимые результаты и является весьма чувствительным к поверхностным загрязнениям, которые играют роль смазки. Чистые поверхности обладают высоким коэффициентом трения. Для получения видимой царапины на неочищенных стеклах требуется груз 400 г, а для хорошо очищенных — всего 30 г. Степень очистки можно установить используя контроль электропроводности очищающей дистиллированной воды до и после промывки.

15.2. Элементы тонкопленочных интегральных микросхем

Основными элементами тонкопленочной интегральной микросхемы являются резисторы, конденсаторы и соединительные проводники.

Резисторы. Их выполняют в виде полосок различной формы (рис. 15.1, *а—г*). Отношение длины к ширине у таких резисторов много больше единицы. В отдельных случаях бывает необходимо изготовить резисторы, у которых отношение длины к ширине меньше единицы. Трудность изготовления таких резисторов заключается в том, что ширина резистора получается малой. При большой длине резистора ему придают Г- или П-образную форму.

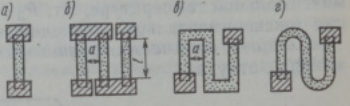


Рис. 15.1. Тонкопленочные резисторы:
а — прямоугольный; *б* — составной из прямоугольных полосок; *в* — меандр; *г* — змейка

Сопротивление определяют из соотношения

$$R = \rho_0 l/(db), \qquad (15.1)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление материала; l — длина резистивной пленки; d — толщина; b — ширина.

Основные характеристики резистивной пленки. Основной характеристикой резистивных пленок является *удельное сопротивление* $\rho_к$ — сопротивление постоянному току, измеренное между противоположными сторонами квадрата. Значение удельного сопротивления (Ом/□) не зависит от размеров квадрата и определяется только материалом и толщиной пленки:

$$\rho_к = \rho_0/d.$$

Понятие удельного сопротивления специфично для микроэлектроники и не применяется в других областях техники. Сопротивление резистора можно представить в следующем виде:

$$R = \rho_к l/b = \rho_к k_ф, \qquad (15.2)$$

где $k_\Phi = l/b$ — коэффициент формы резистора, представляющий отношение длины резистора к его ширине или число квадратов резистора.

Коэффициент формы прямоугольных резисторов $k_\Phi = 0{,}1 \ldots 100$. При $1 \leqslant k_\Phi \leqslant 10$ выбирают резистор прямоугольной формы (рис. 15.1, *а*), при $k_\Phi > 10$ — резистор сложной формы (рис. 15.1, *б*, *в*), при $0{,}1 \leqslant k_\Phi \leqslant 1$ — резистор прямоугольной формы, у которого длина меньше ширины.

Допустимая мощность рассеяния тонкопленочных резисторов зависит от площади S, занимаемой ими на подложке. Она должна быть достаточно большой во избежание перегрева:

$$S \geqslant P/P_д, \qquad (15.3)$$

где P — мощность рассеяния, выделяемая в сопротивлении при максимальной температуре, Вт; $P_д$ — допустимая мощность рассеяния (экспериментально определяемая величина), Вт/см^2.

Площадь, занимаемая резисторами на подложке, $S = lb$ или $S = b^2 R/\rho_к$, откуда

$$b = \sqrt{\frac{P}{K_\Phi P_д}}. \qquad (15.4)$$

Полная относительная погрешность изготовления пленочного резистора представляет собой сумму погрешностей:

$$\gamma_R = \gamma_{к.ф} + \gamma_{\rho к} + \gamma_{Rt} + \gamma_{R\,ст} + \gamma_{R к}, \qquad (15.5)$$

где $\gamma_{к.ф}$ — погрешность коэффициента формы; $\gamma_{\rho к}$ — погрешность воспроизведения величины $\rho_к$ резистивной пленки; γ_{Rt} — температурная погрешность; $\gamma_{R\,ст}$ — погрешность, обусловленная старением пленки; $\gamma_{R\,к}$ — погрешность сопротивления, обусловленная контактами.

Погрешность коэффициента формы зависит от погрешностей геометрических размеров резистора:

$$\gamma_{к.ф} = \Delta l/l + \Delta b/b, \qquad (15.6)$$

где Δl и Δb — погрешности длины и ширины резистора.

Погрешность воспроизведения резистивной пленки $\gamma_{\rho\,к}$ зависит от условий напыления и материала резистивной пленки и обычно не превышает 5%.

Температурная погрешность зависит от материала пленки:

$$\gamma_{Rt} = \alpha_R (T_{max} - 20°C), \qquad (15.7)$$

где α_R — температурный коэффициент сопротивления материала пленки (ТКС), 1/°С.

Погрешность $\gamma_{R\,ст}$ зависит от материала пленки, эффективности ее защиты, а также от условий хранения и эксплуатации.

Погрешность сопротивления контактов $\gamma_{R\,к}$ составляет обычно 1 ... 2% и этой погрешностью можно пренебречь.

Допустимое значение погрешности формы

$$\gamma_{к.ф}=\gamma_R-\gamma_{рк}-\gamma_{Rt}-\gamma_{R\,ст}-\gamma_{Rк}. \qquad (15.8)$$

Если значение $\gamma_{к.ф}$ превышает допустимое, то необходимо выбрать другой материал с меньшим ТКС либо использовать подгонку резисторов.

Расчетное значение ширины резистора должно быть не менее наибольшего значения одной из трех величин:

$$b_{расч} \geqslant \max(b_р;\ b_{тех};\ b_{точ}), \qquad (15.9)$$

где $b_р$ — минимальная ширина резистора, при которой обеспечивается заданная мощность рассеяния [определяется по формуле (15.4)]; $b_{тех}$ — минимальная ширина резистора, определяемая возможностями технологического процесса (при масочном методе $b_{тех}=0{,}3$ мм; при фотолитографическом методе $b_{тех}=0{,}1$ мм); $b_{точ}$ — ширина резистора, определяемая точностью изготовления геометрических размеров.

На основании формулы (15.6) получим

$$b_{точ} \geqslant (\Delta b+\Delta b/k_ф)/\gamma_{к.ф}. \qquad (15.10)$$

За *ширину резистора* b принимают ближайшее к расчетному значению $b_{расч}$ большее значение ширины, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии с учетом масштаба. Если шаг координатной сетки принят 1 мм при масштабе 20 : 1, то округление производят до величины, кратной 0,05 мм.

Расчетная длина резистора

$$l=bk_ф. \qquad (15.11)$$

За *длину резистора* принимают значение, кратное шагу координатной сетки. При этом необходимо оценивать погрешность, возникшую вследствие округления размеров b и l.

Для резисторов, имеющих $k_ф<1$, определяют длину, а затем ширину резистора.

Расчет геометрических параметров резисторов типа «меандр» при известной ширине пленки сводится к определению расстояния между резистивными полосками и числа звеньев меандра (рис. 15.1, *в*).

Для получения стабильных пленочных сопротивлений толщина пленки должна быть 0,01 ... 1 мкм. Очень тонкие пленки (до 0,005 мкм) значительно изменяют свои параметры в процессе кристаллизации. Кроме того, последующее воздействие воздуха вызывает поверхностное окисление пленки, которое приводит к изменению ее сопротивления. В более толстых пленках это окисление сказывается меньше. Пленки толщиной более 1 мкм не обеспечивают достаточно прочного сцепления с основанием.

При выборе линейных размеров резистивных пленок необходимо учитывать, что при очень узких пленках даже небольшие отклонения от заданной ширины вызывают значительные изменения сопротивления. Точность изготовления резистивных пленок по ширине зависит от техники получения рисунка пленки на подложке. Практически путем напыления получают сопротивления с отклонением от номинала до ±5%. Эту точность можно повысить с помощью подгонки.

Таблица 15.1

Материал		$\rho_к$, Ом/□	$P_д$, Вт/см²	ТКС, град$^{-1}$ (при температуре −60 ... +125°С)
резистивной пленки	контактной площадки			
Хром (Cr)	Медь (луженая)	500	1	$0{,}6 \cdot 10^{-4}$
Тантал (Ta)	Алюминий с подслоем нихрома	100	3	$-2 \cdot 10^{-4}$
Нихром NiCr (Ni = =80%; Cr=20%)	Медь	300	2	$1 \cdot 10^{-4}$
Сплав МЛТ (Si= =43,6%; Cr=17,6%; Fe=14,1%; W= =24,7%)	Медь с подслоем ванадия	500	2	$2 \cdot 10^{-4}$
Кермет (Cr=50 ... 90%; Si=50 ... 10%)	Золото с подслоем хрома	3000	2	$3 \cdot 10^{-4}$
Сплав РС-3001 (Cr=37,9%; Ni= =9,4% Si=52,7%)	Золото с подслоем хрома	3000	5	$1 \cdot 10^{-4}$

Материал, используемый для изготовления резистивных пленок. Такой материал должен обеспечивать возможность получения стабильных по времени резисторов с низким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), обладать хорошей адгезией, высокой коррозионной стойкостью и устойчивостью к длительному воздействию высоких температур. При осаждении материала на подложку должны образовываться четкие линии с хорошей повторяемостью рисунка от образца к образцу.

Материалом для резистивных пленок могут быть различные металлы, металлические сплавы, оксиды металлов и металлокерамические соединения (табл. 15.1). Из чистых металлов наиболее часто используют хром, тантал, вольфрам и рений.

Хром удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к материалу резистивной пленки. Он хорошо совместим с любыми проводящими материалами, имеет достаточно высокое удельное сопротивление, может служить в качестве адгезионного слоя, образует стабильную и плотную пленку.

Тантал используют для создания резисторов с высоким удельным сопротивлением. На основе тантала можно изготовить законченные интегральные микросхемы, включая сопротивления, резисторы и конденсаторы. Универсальность тантала объясняется возможностью изменения электрических параметров путем легирования и оксидирования. Термически обработанные и анодированные пленки тантала характеризуются высокой стабильностью электрических свойств с малым значением ТКС.

Вольфрам и рений используют для изготовления резисторов с высоким удельным сопротивлением при малом ТКС. Основные преимущества пленок рения — устойчивость и стабильность при высоких температурах. Тугоплавкость рения позволяет использовать его при очень малых толщинах пленки. Пленки рения получают чаще всего путем электронно-лучевого разогрева гранул рения в вакууме (10^{-4} Па). Осаждение осуществляется при температуре подложки ~350°С.

Хромоникелевый сплав (нихром) дает возможность изготовлять пленки толщиной 100 А при малом ТКС. *Многокомпонентный металлосилицидный сплав (МЛТ)* применяют для получения резисторов с хорошей воспроизводимостью и малым ТКС.

Оксидно-металлические пленки получают путем распыления в атмосфере кислорода. Наиболее часто применяют пленки на основе оксида олова. Керметы представляют собой смеси металлов с изолирующими материалами. Хорошими адгезионными свойствами, стабильностью, высокой температурной устойчивостью и хорошими механическими свойствами обладают керметы на основе оксида кремния и хрома. В зависимости от состава смеси сопротивление может варьироваться в широких пределах.

Удельное сопротивление резистивных пленок обычно не превышает 100 ... 300 Ом/□. Этот диапазон может быть расширен до 30 ... 1500 Ом/□, но стоимость резисторов возрастает в два раза. При этом получаются номиналы в пределах 100 ... 100 000 Ом. Такой диапазон охватывает все значения современных транзисторных схем.

Конденсаторы. Их получают в виде трехслойной структуры (рис. 15.2, *а*) проводник — диэлектрик — проводник. При этом нижняя обкладка *2* конденсатора выходит за периметр верхней обкладки *3*, а периметр диэлектрической пленки *1* выходит за периметр нижней обкладки. Это исключает возможность замыкания обкладки и устраняет погрешность от их смещения. Такая конструкция характерна для конденсаторов повышенной емкости (сотни — тысячи пикофарад) и имеет площадь верхней обкладки более

5 мм². Для конденсаторов небольшой емкости (десятки пикофарад) обкладки конденсаторов выполняют в виде двух взаимно пересекающихся проводников *1*, разделенных пленкой диэлектрика *2*. Расчетная площадь конденсаторов составляет 1 ... 5 мм² (рис. 15.2, *б*).

Емкость конденсатора с параллельно расположенными электродами

$$C = 0{,}0885\varepsilon S/d, \qquad (15.12)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя; S — активная площадь конденсатора, равная площади верхней обкладки, см², d — толщина диэлектрического слоя, см; $C_0 = 0{,}0885\varepsilon/S$ — удельная емкость.

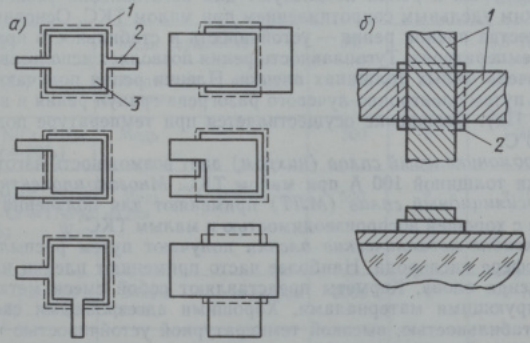


Рис. 15.2. Тонкопленочные конденсаторы:
а — повышенной емкости; *б* — небольшой емкости

Минимальную толщину диэлектрика определяют по формуле

$$d_{\min} \geqslant K_з \frac{U_{раб}}{E_{пр}}, \qquad (15.13)$$

где $K_з = 2 \ldots 3$ — коэффициент запаса электрической прочности; $U_{раб}$ — рабочее напряжение, В; $E_{пр}$ — электрическая прочность материала диэлектрика, В/мм.

При расчете конденсаторов необходимо обеспечить возможно меньшую площадь конденсатора, выбирая материал с большой диэлектрической проницаемостью. Толщину материала желательно свести к минимуму, который необходим для того, чтобы выдерживать заданное напряжение. Если требуется большая емкость, то диэлектрик наносят в несколько слоев, что, однако, значительно

усложняет производство. Наиболее экономичное использование площади обеспечивают конденсаторы квадратной формы.

Материал, используемый для изготовления диэлектрических пленок конденсатора, должен иметь хорошую адгезию с металлом, применяемым для обкладок конденсатора, не подвергаться механическому разрушению при воздействии температур, обладать высоким пробивным напряжением и малыми диэлектрическими потерями, иметь высокую диэлектрическую проницаемость и обладать минимальной гигроскопичностью.

В качестве материала для диэлектрической прослойки конденсаторов применяют диоксид кремния SiO_2, оксид германия CeO, халькогенидное стекло ХГ-44, оксиды алюминия Al_2O_3, тантала Ta_2O_5, титана TiO_2 и др. Особенно перспективны диэлектрические пленки из сложных по составу стекол. Эти материалы имеют низкие диэлектрические потери на разных частотах вплоть до самых высоких.

Хорошим материалом для изготовления обкладок конденсаторов является алюминий, дающий значительно меньшее по сравнению с другими металлами количество коротких замыканий. Это объясняется относительно низкой температурой испарения алюминия и тенденцией к оксидированию. Поверхностный слой алюминия легко можно превратить в диэлектрик путем его оксидирования. Полученные таким образом конденсаторы обладают малыми диэлектрическими потерями и имеют высокое пробивное напряжение.

Емкость тонкопленочного конденсатора выбирают от 10 до 10^4 пФ. Наименьшее значение емкости зависит от толщины диэлектрического слоя, принимаемой 0,5 мкм. В более толстых слоях образуются внутренние напряжения, приводящие к их отслаиванию. При точности $\pm 20\%$ нижним пределом является емкость в 50 пФ. Верхний предел емкости зависит от рабочего напряжения и определяется наименьшей толщиной слоя диэлектрика, при которой наступает пробой. Кроме того, площадь, отводимая под пленочные конденсаторы, ограничена и обычно не превышает 1,6 см^2.

Отклонение емкости тонкопленочного конденсатора от номинального значения обусловлено производственными погрешностями, изменением температуры и старением материала. К производственным погрешностям относятся разброс емкости C_0 и геометрических размеров верхней обкладки конденсатора. Удельная емкость определяется диэлектрической проницаемостью диэлектрика и его толщиной.

Конденсаторы подгоняют путем уменьшения верхнего электрода. При этом они должны иметь специальную топологию с подстроечными секциями, которые можно отключать путем удаления перемычек. Отключение дополнительной секции уменьшает емкость конденсатора. Для увеличения емкости используют несколько не связанных между собой секций, которые присоединяют параллельно друг другу.

Соединительные проводники. Соединительные проводники выполняют в виде проводящих пленок толщиной 0,5 ... 5 мкм. Более толстые пленки не обеспечивают хорошей адгезии с основанием.

Проводники должны быть по возможности короткими и широкими. Сопротивление проводника может влиять на эксплуатационные характеристики схем, что надо учитывать при проектировании.

Материал, используемый для проводящих пленок и контактных площадок, должен иметь низкое сопротивление, высокую коррозионную стойкость, хорошую адгезию к подложке и другим пленкам. Всем этим требованиям одновременно не удовлетворяет ни один из материалов. Поэтому в настоящее время применяют двухслойный метод получения проводящих слоев и контактных площадок. Эти слои получают последовательно в одном процессе напыления. Один из компонентов образует прочную связь с подложкой (хром, марганец, титан), другой обеспечивает хорошую пайку (медь, серебро, золото). Наиболее часто применяют сочетание марганца с серебром. Вначале испаряется марганец, хорошо сцепляющийся с подложкой, а затем серебро, которое образует проводящую пленку. Ценным свойством этого сплава является близость коэффициентов линейного расширения в широком диапазоне температур.

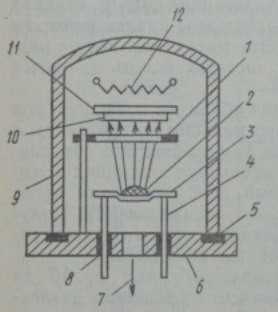


Рис. 15.3. Установка для термического напыления в вакууме:

1 — заслонка; *2* — испаряемый материал; *3* — испаритель; *4* — вакуумплотные выводы; *5* — герметизирующая прокладка; *6* — плита; *7* — присоединение к вакуумному насосу; *8* — изолятор выводов; *9* — колпак; *10* — подложка; *11* — держатель подложки; *12* — нагреватель

15.3. Методы получения тонких пленок

Основными методами получения тонких пленок являются термическое напыление (испарение) в вакууме и ионное распыление.

Термическое напыление в вакууме. Такое напыление основано на свойстве атомов (молекул) металлов и некоторых других материалов при испарении в условиях высокого вакуума перемещаться прямолинейно (лучеобразно) и осаждаться на поверхности, поставленной на пути их движения.

Установка для напыления в вакууме (рис. 15.3) состоит из плоской плиты *6*, на которой устанавливается стеклянный или металлический колпак *9*. В последнем случае он снабжается смотровым стеклом. На плите предусмотрены два изолированных вакуумплотных вывода *4* для питания испарителя *3*. На некотором расстоянии от испарителя помещается подложка *10*, на которую наносится

тонкая пленка. Подложка нагревается и до достижения заданного режима закрыта заслонкой *1*.

В соответствии с физическими процессами, происходящими при испарении в вакууме, можно выделить следующие области образования пленки: 1) перевод напыляемого материала в парообразное состояние; 2) перенос пара от источника испарения к подложке; 3) конденсация пара на подложке и образование пленки.

Перевод напыляемого материала в парообразное состояние. В области образования паров происходит испарение материала, который нагревается до тех пор, пока давление его паров не превысит давления остаточных газов. При этом наиболее нагретые молекулы, обладающие высокой кинетической энергией, преодолевают силы молекулярного притяжения и отрываются от поверхности расплава. Вследствие резко пониженной теплопередачи в условиях высокого вакуума перегрева подложек не происходит.

Для некоторых материалов условная температура испарения ниже температуры плавления. Например, хром имеет температуру плавления 1800°С, а испаряется при нагревании в вакууме при температуре 1205°С. Переход вещества из твердого состояния в парообразное минуя жидкое называется *сублимацией*.

Перенос пара от источника испарения к подложке. Область переноса паров составляет 10 ... 20 см. Чтобы траектории молекул испаряемого вещества были прямолинейными, длина свободного пробега молекул остаточного газа должна в 5 ... 10 раз превышать линейные размеры области переноса паров.

Длина свободного пробега λ — расстояние, проходимое молекулой пара вещества без столкновения с молекулами остаточных газов. В высоком вакууме, когда $\lambda \geqslant d$ (d — расстояние от источника испарения до подложки), молекулы испаряемого вещества пролетают расстояние практически без соударений. Такой поток испаряемого вещества называется *молекулярным* и для его создания необходим вакуум порядка $10^{-5} \ldots 10^{-6}$ Па.

Конденсация пара на подложке и образование пленки. Конденсация пара зависит от температуры подложки и плотности атомарного потока. Атомы испаряемого вещества адсорбируются на подложке после хаотической миграции по ее поверхности.

При миграции атомы могут сталкиваться, образуя скопления (рис. 15.4, *а*), которые становятся более устойчивыми относительно реиспарения, так как к связи с подложкой добавляется энергия механической связи. Атомы, которые уже находились на подложке к рассматриваемому моменту времени, обозначены черными кружками, а белыми — атомы, которые только что попали на поверхность (рис. 15.4, *б*, *в*).

Наименьшая группа, для которой частота отрыва атомов меньше частоты присоединения, называется *критическим зародышем*.

Так как в процессе кристаллизации равновесие между газовой фазой и поверхностью смещено в сторону осаждения атомов, то концентрация последних на поверхности непрерывно растет. К зародышам присоединяются другие мигрирующие атомы (рис. 15.4, *г*), образуя целые агрегатные состояния. При дальнейшей конденсации островки, соединяясь между собой, образуют сплошную пленку.

Размер критических зародышей и частота их зарождения определяют структуру конденсирующейся пленки. Если в начальной стадии роста пленка состоит из мелких и многочисленных зародышей, то ее структура в дальнейшем сохраняется и сплошная пленка будет иметь мелкозернистую структуру. При крупных и малочисленных зародышах тонкая пленка будет иметь крупнозернистую структуру.

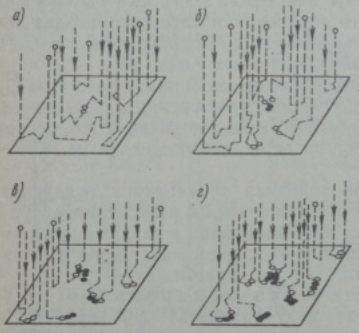


Рис. 15.4. Модель начальной стадии роста тонкой пленки

По механическим и физическим свойствам тонкие пленки существенно отличаются от объемного материала. Например, удельная прочность некоторых пленок примерно в 200 раз превышает прочность хорошо отожженных объемных образцов и в несколько раз — прочность материалов, подвергнутых холодной обработке. Это объясняется мелкокристаллической структурой и малой пластичностью. Температура испарения металлов лежит в пределах от нескольких сотен градусов (например 430°С у цезия) до нескольких тысяч (например, 3500°С у вольфрама). В связи с этим при вакуумном испарении применяют испарители различной конструкции. По способу нагрева вещества испарители разделяют на резистивные, электронные и индукционные.

В *резистивных испарителях* тепловая энергия получается за счет выделения теплоты при прохождении тока через нагреватель или непосредственно через испаряемый материал. Наиболее часто используют испарители с косвенным подогревом. В этом случае предусматривают специальные подогреватели, при помощи которых испаряемое вещество нагревается до требуемой температуры. Материалом испарителя обычно служит вольфрам, тантал, молибден и др.

Выбор материала подогревателя определяется следующими требованиями: испаряемый материал в расплавленном состоянии должен хорошо смачивать подогреватель, образуя хороший тепловой

контакт, и не должен вступать в химические реакции с материалом подогревателя, которые могут привести к его загрязнению и разрушению. В основном применяют подогреватели из вольфрама, молибдена, тантала.

Конструкция испарителей с косвенным подогревом показана на рис. 15.5, *а — в*. При небольших количествах испаряемого металла применяют V-образные, W-образные, волнообразные и спиральные испарители. Испаряемый металл в виде загнутых кусочков проволоки или полосок листового материала насаживается на подогреватель. При пропускании тока кусочки испаряемого материала расплавляются и смачивают подогреватель; смачивание и поверхностное натяжение удерживают расплавленный металл на поверхности подогревателя.

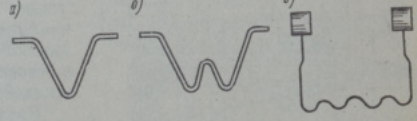


Рис. 15.5. Проволочные испарители с косвенным подогревом:
а — V-образные, *б* — W-образные, *в* — волнообразные

Резистивные испарители не обеспечивают требуемого состава пленок при испарении сплавов. Вследствие различия в упругости паров различных компонентов состав пленки значительно отличается от исходного материала. Например, напыляемый сплав нихром (80% Ni и 20% Cr) образует на подложке пленку, имеющую состав 60% Ni и 40% Cr. Для получения пленок требуемого состава из многокомпонентных сплавов (например, МЛТ и др.) применяют метод микродозирования или взрывного испарения. При этом методе на ленточный испаритель, нагретый до температуры, превышающей на 200 ... 300°С температуру испарения наиболее тугоплавкого компонента, подается микродоза порошка испаряемого сплава с размерами частиц 100 ... 200 мкм. Испарение микродозы происходит практически мгновенно.

В электронных испарителях кинетическая энергия электронов преобразуется в тепловую энергию. Испаряемый материал используется в виде сплошной проволоки, на свободный конец которой воздействует электронный луч (рис. 15.6). В связи с кратковременностью нагрева ($10^{-8} \ldots 10^{-9}$ с) различные компоненты сложного соединения испаряются и осаждаются на подложку практически одновременно. Электронно-лучевой нагрев дает возможность испарять тугоплавкие металлы и их сплавы.

Для повышения стабильности параметров тонкие металлические пленки подвергают термической обработке путем нагревания до $t = 300 \ldots 400°$ С. При этом происходит укрупнение кристаллов, связь между ними усиливается, пленка получается более плотной и компактной, а удельное электрическое сопротивление уменьшается.

Кроме того, такие пленки отличаются большой твердостью, механической прочностью и стабильностью параметров.

Прочность сцепления пленки с подложкой во многом зависит от наличия оксидного слоя, который может возникнуть между пленкой и подложкой. На образование оксидов большое влияние оказывает состав остаточных газов в рабочем объеме установки, особенно наличие паров воды.

Загрязнения подложки значительно влияют на электрофизические свойства пленок. Поэтому перед напылением необходимо тщательно очищать подложки, а также предохранять их от появления масляных пленок, возникающих в результате проникновения паров рабочих жидкостей из насосов.

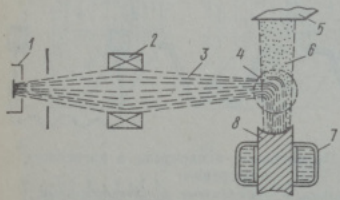


Рис. 15.6. Схема электронно-лучевого испарителя:

1 — катод; *2* — фокусирующая катушка; *3* — поток электронов; *4* — отклоняющая система; *5* — подложка; *6* — поток пара материала; *7* — охлаждаемый держатель; *8* — испаряемый материал

Вакуумная установка должна иметь достаточно высокую скорость откачки для быстрого удаления газов, выделенных источником испарения и другими деталями установки во время напыления. Медленная откачка может привести к загрязнению получаемых пленок и ухудшению их качества. При этом необходимо принимать меры для уменьшения количества паров, попадающих в камеру напыления от насосов, так как конденсированные молекулы масла или продукты их разложения также могут загрязнять покрываемую поверхность и искажать структуру наносимой пленки. Для улавливания паров между откачиваемым объемом и насосами устанавливают конденсационные или сорбционные ловушки.

Шероховатость поверхности подложки существенно влияет на структуру пленки. Для устранения микронеровностей на подложку иногда напыляют слой диоксида кремния. Структура и свойства тонких пленок в значительной мере определяются условиями их конденсации и зависят от природы испаряемого вещества и соответствия его структуре подложки, материала подложки, температуре поверхности, степени вакуума, скорости испарения вещества и толщине пленки.

Пленки, наносимые с большой скоростью, обычно имеют мелкозернистую структуру. Скорость напыления зависит от давления паров испаряемого вещества и остаточных газов. В процессе осаждения пленочных элементов подложку подогревают, что позволяет повысить адгезию пленки, снизить внутренние напряжения и улучшить ее свойства. Последние зависят от температуры нагрева под-

ложки. Например пленки, осаждаемые при температуре подложки 300°С, химически устойчивы и механически прочны, а пленки, осаждаемые при температуре до 160°С, имеют низкие механические свойства. Тонкопленочные элементы защищают от коррозии путем нанесения оксида кремния, пленка которого при соответствующих условиях напыления получается плотной и негигроскопичной.

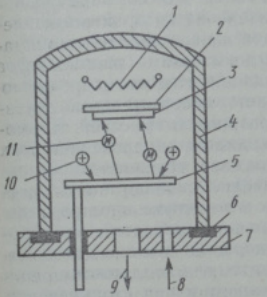


Рис. 15.7. Установка для катодного распыления:

1 — нагреватель; *2* — держатель подложки; *3* — подложка (анод); *4* — колпак; *5* — мишень (катод); *6* — герметизирующая прокладка; *7* — плита; *8* — подвод аргона; *9* — присоединение к вакуумному насосу; *10* — ион аргона; *11* — атом металла

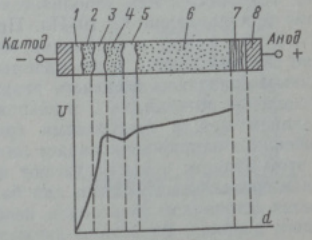


Рис. 15.8. Тлеющий разряд и распределение потенциала напряжения в его областях:

1 — темное астоново пространство; *2* — первое катодное свечение; *3* — темное катодное пространство; *4* — отрицательное тлеющее свечение; *5* — темное фарадеево пространство; *6* — положительный столб; *7* — анодное свечение; *8* — темное анодное пространство

Вакуумное напыление широко применяют для получения резистивных пленок, проводников из меди, алюминия и некоторых других сплавов, диэлектрических покрытий из оксида кремния и др. Основными преимуществами процесса являются высокая чистота получаемой пленки, удобство контроля ее толщины в процессе напыления, простота выполнения. Наиболее существенные недостатки процесса — изменение процентного соотношения составляющих при испарении веществ сложного состава; малая равномерность пленки по толщине при осаждении на большую площадь из точечных источников; трудность испарения тугоплавких материалов; высокая инерционность процесса при использовании резистивных испарителей; сравнительно невысокая прочность сцепления пленки с подложкой.

Ионное распыление. Оно основано на явлении разрушения твердых материалов при бомбардировке их поверхности ионизированными молекулами разряженного газа. Процесс не связан с вы-

сокими температурами и позволяет получать пленки тугоплавких металлов и сплавов. Различают следующие виды ионного распыления: катодное, ионно-плазменное и магнетронное.

Катодное распыление («диодная» система) (рис. 15.7) производится в вакуумной камере, где расположены два плоскопараллельных электрода. Один электрод (катод) изготовлен из распыляемого материала и является мишенью для бомбардировки. Другой электрод (анод) служит подложкой, на которой осаждается пленка. В вакуумной камере создается низкое давление (10^{-3} ... 10^{-4} Па), после чего заполняется инертным газом (обычно аргоном) при давлении 1 ... 10 Па. При подаче высокого напряжения (1 ... 3 кВ) между электродами возникает самостоятельный тлеющий газовый разряд, возбуждаемый электронной эмиссией. Характерным признаком тлеющего разряда является определенное распределение потенциала U в разреженном газе, обусловленное расстоянием между электродами (рис. 15.8). Основная часть приложенного напряжения падает на темном катодном пространстве. В этой области ионы достигают наибольших скоростей, приобретая максимальные энергии для бомбардировки катода. Катод является источником электронов, необходимых для поддержания тлеющего разряда. Электроны движутся к аноду и при столкновении с молекулами нейтрального газа выбивают новые электроны, что приводит к резкому нарастанию потока электронов. Молекула инертного газа при этом превращается из нейтральной в положительный ион, обладающий по сравнению с электроном большей массой. Так происходит ионизация газа, который с большим или равным количеством электронов и ионов называют плазмой. Электроны перемещаются к аноду и нейтрализуются. Положительные ионы движутся к другой границе плазмы и ускоряются в темном катодном пространстве, приобретая большие энергии для распыления мишени (катода). Атомы материала мишени с высокой энергией осаждаются на поверхности подложки, которая располагается достаточно близко к катоду. Обычно это расстояние составляет полторы-две длины темного катодного пространства.

Катодное реактивное распыление осуществляется в смеси инертного и активного газов. Оно позволяет получать различные по составу пленки. Разряд в смеси газов «аргон — кислород» применяют для получения оксидов. Реактивное распыление тантала в среде аргона с добавлением кислорода, азота и углерода позволяет получить ряд соединений с самыми различными свойствами.

Ионно-плазменное распыление (трехэлектродная система) осуществляется при более низких давлениях (рис. 15.9).

В камере создается давление 10^{-3} Па и включается накал катода. Затем она заполняется инертным газом при давлении 10^{-1} Па. Создание газоразрядной плазмы обеспечивается дуговым разрядом, возникающим между анодом и катодом при напряжении в 150 ... 250 В. Источником электронов служит термокатод.

Распыляемый материал (мишень) вводится в газовый разряд в качестве независимого электрода, не связанного с поддержанием разряда. Имитируемые термокатодом электроны ускоряются по направлению к аноду и ионизируют по пути молекулы остаточного газа. Плотность образующейся плазмы более чем на порядок превышает плотность плазмы тлеющего разряда. Катод-мишень и подложку помещают на противоположных границах активного плазменного пространства. Распыление начинается с того момента, когда к мишени прикладывают отрицательный по отношению к аноду потенциал в 200... 1000 В. Этот потенциал отталкивает электроны и притягивает ионы из плазменного пространства. Ионы бомбардируют мишень так же, как в рассмотренном «диодном» варианте. Распыляемые атомы, двигаясь преимущественно в направлении, перпендикулярном поверхности, осаждаются на подложке. Распыление при низких давлениях дает возможность получить высокую адгезию пленки с подложкой за счет большей энергии распыляемых частиц. Так как при этом давлении длина свободного пробега молекул составляет несколько сантиметров, то распыляемые атомы на своем пути от мишени до подложки почти не соударяются с молекулами и ионами инертного газа и газовых примесей, что существенно уменьшает степень загрязненности пленки посторонними газовыми включениями. Возможность сокращения расстояния между мишенью и подложками связана с тем, что в триодной системе распыления образование электронов и ионов происходит автономно от мишени.

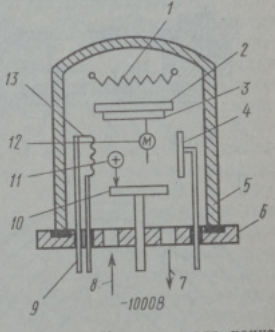


Рис. 15.9. Установка для ионно-плазменного распыления:

1 — нагреватель; *2* — держатель подложки; *3* — подложка; *4* — анод; *5* — колпак; *6* — плита; *7* — присоединение к вакуумному насосу; *8* — подвод аргона; *9* — токопровод; *10* — катод (мишень); *11* — ион аргона; *12* — атом металла; *13* — термокатод

Недостатками триодной системы являются малый срок службы проволочного катода и разная скорость распыления на отдельных участках плоской мишени.

Высокочастотное ионное распыление применяют для распыления диэлектриков и полупроводниковых материалов. В процессе обычного распыления проводящих материалов, ударяющихся о катод-мишень, ион нейтрального рабочего газа получает с мишени электрон и разряжается, превращаясь на некоторое время в нейтральную молекулу. Если распыляемый материал мишени — диэлектрик, то нейтрализации ионов на мишени не будет и она быст-

ро покрывается слоем положительных зарядов, препятствующих распылению мишени.

Влияние положительного заряда можно исключить подавая к металлическому электроду, на котором закреплен распыляемый диэлектрик, переменное напряжение. В период, когда напряжение на мишени отрицательно, происходит ее распыление, сопровождаемое накоплением положительного заряда. При смене полярности положительный заряд компенсируется электронами, вытягиваемыми из плазмы. Диэлектрические материалы можно распылять на любой частоте. Однако на низких частотах оно малоэффективно. Вследствие большого различия в подвижности электронов и ионов существенно меньшее число ионов попадает на мишень за период отрицательного напряжения.

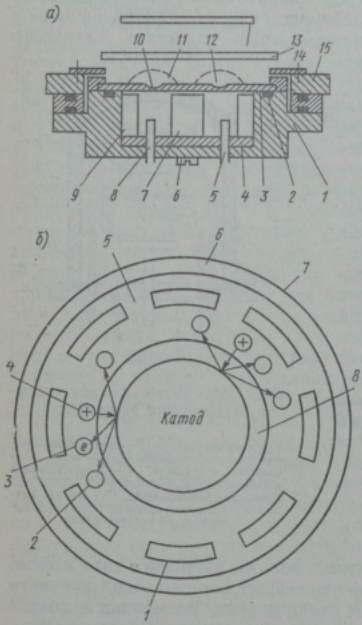


Рис. 15.10. Магнетронное распыление:
а — магнетрон с плоским катодом; *б* — схема бомбардировки катода: *1* — подложка; *2* — нейтральный атом; *3* — электрон; *4* — ион; *5* — плазма; *6* — темное анодное пространство; *7* — анод; *8* — темное катодное пространство

Магнетронное распыление (рис. 15.10, *а*) является вариантом «диодных» систем распыления. Все конструктивные элементы монтируются в корпусе *1*, который присоединяется к вакуумной камере (на рис. 15.10 камера не показана) через изолирующее кольцо *2*, *14* и фланец *15*. Дискообразный катод-мишень *3* охлаждается проточной водой, поступающей по трубкам *5* и *8*. Под катодом расположен магнитный блок, состоящий из центральных *7* и периферийных *9* магнитов, закрепленных на основании *4*. На катод через клемму *6* подается высокое напряжение (300...700 В). Магнитный блок создает над поверхностью катода дугообразное неоднородное поле. Область распыления обозначена *10* и *12*, а силовые линии магнитного поля — *11*. Над катодом расположены кольцевой анод *13* и диск, на котором установлены подложки.

Такое расположение анода обеспечивает образование электрического поля с составляющей, перпендикулярной плоскости катода. Высокие скорости осаждения достигаются при давлении 0,1...0,5 Па. При подаче отрицательного потенциала на катод в прикатодной области возникает неоднородное электрическое поле, силовые линии которого скрещиваются с силовыми линиями магнитного поля *11*, замыкающими магнитную систему. На вылетающие с поверхности катода электроны действуют эти пересекающиеся поля, которые удерживают электроны в темном катодном пространстве (рис. 15.10, *б*). Покинуть это пространство электроны не могут: с одной стороны этому препятствует магнитное поле, возвращающее электроны на катод, с другой стороны — поверхность мишени, отталкивающая электроны. В результате осцилляции электронов возникает интенсивная ионизация рабочего газа в непосредственной близости от катода. При этом возрастают интенсивность бомбардировки катода, скорость его распыления и осаждения материала на подложку. Потери энергии приводят к тому, что электроны покидают темное катодное пространство и при движении к аноду описывают сжимающиеся спирали. Это повышает эффективность ионизации и существенно уменьшает энергию, рассеиваемую электронами на аноде. Основным источником нагрева подложек становится энергия, выделяемая при торможении и конденсации осаждаемых атомов вещества. Температура подложки при этом не превышает 100 ... 200°С. Высокие скорости роста пленок в магнетронных системах обеспечиваются также сравнительно низким давлением у подложки, что снижает потери энергии распыленных атомов при достижении поверхности подложки. Этим в основном определяется высокая адгезия пленок к подложке при использовании магнетронных распылительных систем, что позволяет получать пленки из тугоплавких металлов и многокомпонентных сплавов без адгезионного подслоя.

Распыление ионной бомбардировкой имеет следующие преимущества:

1) обеспечивается высокая адгезия пленки к подложке, что объясняется высокой энергией распыленных атомов;

2) сохраняется состав материала пленки вследствие низкой температуры распыления;

3) отсутствует перегрев вакуумной камеры при получении пленок из тугоплавких металлов;

4) обеспечивается малая инерционность процесса, так как распыление прекращается при снятии напряжения;

5) вследствие большой площади распыляемой пластины (мишени) получаются равномерные по толщине пленки на подложках больших размеров, что обеспечивает эффективную реализацию группового метода напыления;

6) мишень является длительно не изменяемым источником рас-

пыляемого материала, что облегчает автоматизацию процесса и обеспечивает однородность получаемых пленок.

Большинство промышленных установок основаны на использовании трехэлектродных систем распыления.

15.4. Контроль толщины тонких пленок

Для определения толщины тонких пленок применяют такие методы: резистивный, микровзвешивания, оптический, интерференционный, радиочастотный и др. Многие из них позволяют производить измерение толщины пленки в процессе термического напыления в вакууме и управлять режимами технологического процесса.

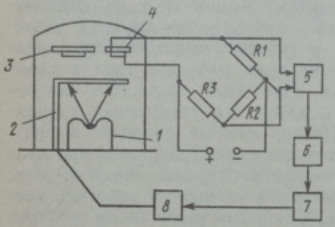


Рис. 15.11. Измерение толщины пленки резистивным методом

Резистивный метод. Данный метод основан на измерении сопротивления контрольного образца, напыляемого одновременно с основной пленкой (рис. 15.11).

В вакуумной камере устанавливаются подложки *3* и *4*, на которые напыляется пленка. На подложке *4* формируется контрольное сопротивление R_x, определяемое параметрами моста:

$$R_x = R_1 R_3 / R_2. \qquad (15.14)$$

С моста сигнал поступает на усилитель *5*. Достижение баланса моста соответствует заданной толщине пленки. При этом срабатывает электронный ключ *6*, который включает блок управления приводом *7*. Заслонка *2* с помощью электромеханического устройства *8* перекрывает поток напыляемого вещества с резистивного испарителя *1*.

Точность измерения толщины пленки резистивным методом составляет 5...10%. Этот метод применим только к проводящим пленкам. Он не пригоден для измерения пленок с малым сопротивлением ($\leqslant$1 Ом/□), так как переходные сопротивления соизмеримы с сопротивлением пленки.

Резистивный метод позволяет контролировать скорость осаждения пленки и прекращать напыление по достижении заданной толщины путем включения заслонки.

Метод микровзвешивания. Он основан на определении толщины пленки по количеству осажденного вещества. Толщина пленки

$$h = G/(F\gamma), \qquad (15.15)$$

где G — разность массы подложки до и после осаждения пленки; F — площадь, покрытая слоем пленки; γ — плотность вещества пленки.

За толщину пленки принимают толщину такого слоя, при котором образующий его металл равномерно распределен по всей поверхности с плотностью сплошного материала. При измерении малых масс требуется очень чувствительная система, что является недостатком метода. Для измерения толщины пленки при ее осаждении в вакууме применяют весы. Коромыслом весов служит стеклянный капилляр, на концах которого приклеиваются тонкие кварцевые нити. На одном конце коромысла помещают подложку, на другом — противовес. Массу пленки определяют по величине тока, необходимого для компенсации отклонения коромысла. Тарировкой весов установлено, что существует линейная зависимость между массой пленки и компенсационным током.

Оптический интерференционный метод. Этот метод основан на использовании эффектов, возникающих в системе «пленка — подложка» при изменении толщины пленки. Они состоят в том, что по мере утолщения пленки интенсивность отраженного света уменьшается и достигает минимума в тот момент, когда толщина пленки становится равной $^1/_4$ длины волны падающего света. При дальнейшем увеличении толщины пленки отражение усиливается и достигает максимума при толщине, равной половине длины волны. Практически можно производить наблюдения до 10 ... 20 экстремумов в зависимости от оптических свойств наносимого вещества. Положительным свойством метода является возможность измерять толщину в процессе напыления пленки.

Радиочастотный метод или метод кварцевого резонатора. Метод основан на измерении отклонения частоты колебаний кварцевого кристалла при осаждении на нем напыляемого материала.

При изменении массы m кварцевого кристалла на величину Δm частота его колебаний f меняется пропорционально изменению массы на величину Δf:

$$\Delta f/f = \Delta m/m. \qquad (15.16)$$

Объем напыленной планки $v = Sh = \Delta m/\gamma$, (S — площадь кварцевого кристалла; h — толщина пленки; γ — плотность пленки), откуда толщина пленки

$$h = \Delta m/(\gamma S) \text{ или } h = m\Delta f/(f\gamma S). \qquad (15.17)$$

Обозначая все постоянные параметры через c, получим

$$h = c\Delta f, \qquad (15.18)$$

где c — коэффициент пропорциональности.

Приборы с кварцевым резонатором имеют удовлетворительную точность, высокую чувствительность и малую инерционность.

Выпускаемый отечественной промышленностью кварцевый измеритель (КИТ) позволяет проверить толщину пленок в пределах 0,01 ... 5 мкм с точностью ±10%. Он подает сигнал окончания процесса после получения пленки нужной толщины, который управляет перемещением заслонки.

Недостатком метода является уход частоты, связанный с нестабильностью температуры кристалла, неточным выполнением его среза и с паразитными колебаниями, возникающими при плохом креплении.

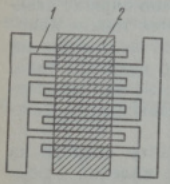


Рис. 15.12. Гребенчатый конденсатор

Для контроля скорости осаждения применяют ионизационный, емкостный и другие методы.

Ионизационный метод. Этот метод основан на ионизации паров испаряемого вещества электронами катода. Скорость испарения измеряют путем определения ионного тока паров этого вещества специальным манометром, установленным над испарителем. Ионизационный метод является универсальным, имеет широкие пределы измерения с точностью до 1% и может быть использован для стабилизации процесса напыления.

Емкостный метод. Его применяют для измерения скорости осаждения только диэлектрических пленок. В основу метода положено измерение малых приращений емкости плоского гребенчатого конденсатора (рис. 15.12) при осаждении на него пленки диэлектрика. Гребенчатый плоский конденсатор представляет собой чередующиеся проводящие полоски *1*, нанесенные на изолирующую подложку и соединенные с контактами. При напылении сверху диэлектрической пленки *2* и заполнении ее каналов между обкладками емкость C возрастает вследствие изменения диэлектрической проницаемости. При малых толщинах диэлектрических пленок изменение емкости ΔC от толщины диэлектрика практически имеет линейный характер. Приращения емкости измеряют с помощью измерительного моста.

Для измерения остаточного давления в вакуумных установках применяют в основном термоэлектрические и ионизационные приборы.

В термоэлектрических приборах в качестве задающей величины используется зависимость теплопроводности от давления, а в ионизационных приборах — ионный ток. Наиболее совершенным методом исследования тонких пленок является растровая электронная микроскопия.

15.5. Основные этапы технологического процесса изготовления тонкопленочных интегральных микросхем

Основными этапами технологического процесса изготовления тонкопленочных микросхем являются составление топологии схемы, изготовление оригинала интегральной микросхемы, фотошаблона и масок, напыление элементов схемы.

Составление топологии схемы. Этап заключается в определении конфигурации, геометрических размеров и рационального размещения на подложке пленочных и навесных элементов, а также порядка их соединения.

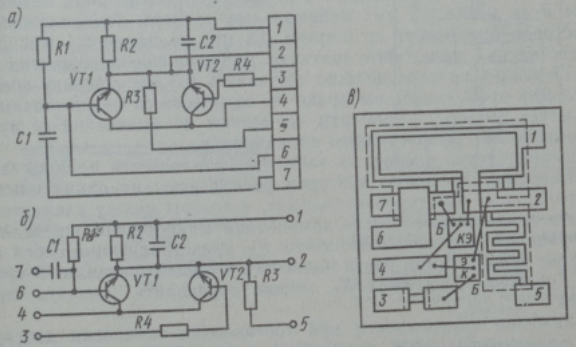


Рис. 15.13. Последовательность разработки топологии тонкопленочной интегральной микросхемы

При разработке топологии необходимо иметь принципиальную электрическую схему с перечнем элементов и их параметров. Топология для самостоятельных функциональных схем разрабатывается в такой последовательности:

1) разрабатывается коммутационная схема взаимного размещения элементов;

2) выбирается форма и рассчитываются размеры пленочных элементов;

3) размещаются пленочные элементы на подложке;

4) соединяются пленочные и навесные элементы;

5) определяются размеры подложки.

Заданная электрическая схема (рис. 15.13, *а*) должна быть упорядочена в соответствии с особенностями пленочной технологии. Количество пересечений проводников сводится к минимуму (рис. 15.13, *б*). Топология микросхемы показана на рис. 15.13, *в*. Контактные площадки *1—7* входов и выходов должны быть макси-

мально удалены друг от друга и расположены по периметру платы.

Отношение максимального и минимального значений номиналов резисторов в схеме не должно превышать 50.

В общем случае топологическая задача допускает весьма большое количество решений. Однако при этом можно выделить общие положения, которые необходимо учитывать при проектировании. Пленочные элементы располагают на расстоянии не менее 0,6... 1,0 мм от края подложки; расстояние до края подложки берут не менее 0,3... 0,5 мм; минимальное расстояние между двумя соседними элементами одного слоя составляет 0,3 мм; расстояние от навесного элемента до контактной площадки должно быть не более 3 мм и не менее 0,5 мм; минимальные размеры тонкопленочных резисторов принимают по ширине 0,2 мм, по длине 0,4 мм. Для осуществления надежного контакта минимальное перекрытие токопроводящих полосок должно составлять 0,3 мм. Ширину соединительных проводников выбирают по возможности максимальными (не менее 30 мкм). Элементы соединяют по кратчайшему пути, что определяет конфигурацию проводников.

Распределение пленочных элементов в плоскости должно быть равномерным. Элементы контуров располагают на одних линиях (вертикальных или горизонтальных), а зазоры между элементами делают одинаковыми. После компоновки микросхемы определяют *коэффициент заполнения подложки* K_S, представляющий собой отношение используемой части подложки к общей площади. В среднем $K_S=0{,}45...0{,}55$. Зная K_S, можно определить площадь подложки.

Снижение трудоемкости при составлении топологии достигается применением ЭВМ, при помощи которой решают задачу оптимального размещения элементов микросхемы и проводников на подложке.

Оригинал интегральной микросхемы. Он представляет собой чертеж конфигурации топологического слоя тонкопленочной микросхемы, предназначенного для получения фотошаблона. Размеры тонкопленочных микросхем обычно не превышают 50 мм. При увеличении 30^x оригинал будет иметь размеры $1{,}5\times1{,}5$ м, которые являются максимально допустимыми при фотокопировании.

Оригиналы схемы получают вычерчиванием на жестком полупрозрачном пластике или методом клейкой ленты. Применение прецизионной резательной машины дает возможность обеспечить точность по ширине $\pm0{,}025$ мм. Более высокую точность можно получить применяя металлические ленты.

Изготовление оригинала интегральной микросхемы и фотошаблона. Фотошаблон представляет собой фотокопию оригинала интегральной микросхемы, выполненной на прозрачном материале в масштабе 1 : 1 по отношению к размерам микросхемы.

Изготовление масок. Маски служат для получения требуемого рисунка схемы. Различают свободные и контактные маски. Свободные маски выполняют в виде пластин (трафаретов) из бериллиевой бронзы, нержавеющей стали и других материалов с отверстиями требуемой конфигурации. С помощью маски производится экранирование отдельных участков подложки от потока осаждаемого материала при его напылении в вакууме. При ионном распылении металлические маски не применяют, так как они искажают электрическое поле между анодом и катодом, а маски из диэлектрических материалов не находят широкого применения в связи со сложностью их изготовления. Свободные маски изготовляют механической обработкой или фототравлением.

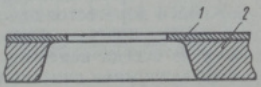


Рис. 15.14. Биметаллическая маска:
1 — тонкий слой никеля; *2* — основание маски (бериллиевая бронза)

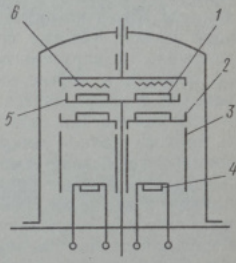


Рис. 15.15. Установка многооперационного типа для напыления в вакууме:
1 — подложки; *2* — диск с масками; *3* — экран; *4* — резистивный испаритель; *5* — карусель с подложками; *6* — нагреватель

Напыления элементов схемы. Вакуумное напыление через свободную маску в общем случае обеспечивает повторение конфигурации маски с точностью ±25 мкм, а в некоторых случаях до ±10 мкм. Получаемая точность зависит от зазора между маской и подложкой, а зазор в свою очередь — от плоскостности маски и подложки.

Особую проблему представляет коробление маски, которая вследствие малой толщины имеет недостаточную жесткость. Решением задачи получения жесткой маски при малой ее толщине является применение биметаллической маски (рис. 15.14). Ее выполняют из достаточно толстой (150 мкм) фольги *2* с нанесением на ее поверхность тонким (10 ... 15 мкм) слоем другого металла *1*, который несколько выступает за вырезы в фольге. Этот слой влияет на рассеивание атомов осаждаемого вещества на подложку.

В практике применяют одноопераційный и многоопераційный методы получения тонкопленочных элементов.

При о д н о о п е р а ц и о н н о м м е т о д е одновременно на ряд подложек осаждается один слой (например, только диэлектрик или нижние обкладки конденсаторов). Затем подложки вы-

нимают и меняют маски, через которые осаждают следующий слой. Осаждение каждого слоя требует разгерметизации рабочего объема установки. Достоинством метода является высокая точность получения конфигурации элементов схемы, так как совмещение масок с подложками производится на воздухе. Однако при этом возможно загрязнение нанесенных слоев и увеличение продолжительности выполнения операции, так как для получения рабочего вакуума порядка 10^{-4} Па затрачивается 1,5 ... 2 ч.

При многооперационном методе используют установки (рис. 15.15), в которых смонтированы испаритель и соответствующая маска. Каждая позиция защищена экраном. Подложки расположены на карусельном устройстве и могут перемещаться из одной позиции в другие, совмещаясь с неподвижными масками. Напыление осуществляется одновременно на всех позициях и за один технологический цикл откачки можно изготовить пассивную часть тонкопленочной микросхемы. В этом случае полностью исключается воздействие атмосферного воздуха. Однако многооперационный метод требует применения сложной и дорогостоящей технологической оснастки, работа которой в условиях высокого вакуума и высоких температур может быть не всегда надежна.

Перед нанесением пленок производится вакуумная очистка подложек. Эта операция осуществляется при помощи специального электрода, к которому подводится положительное напряжение тлеющего разряда.

В начале напыления желательно применять заслонку между источником и подложкой, на которую осаждается первоначальная пленка, содержащая летучие элементы.

Контактные маски образуются непосредственно на поверхности подложки и предназначаются для однократного использования. В качестве материала контактной маски применяют фоторезист или другой материал, стойкий к химическим воздействиям (хром, медь и др.). Наиболее широко такие маски применяют для получения микросхем со сложным рисунком и из материалов, трудно поддающихся травлению.

Получение тонкопленочных структур с помощью контактной маски производят методом прямой или обратной (взрывной) фотолитографии.

При методе прямой фотолитографии (рис. 15.16) на подложку *2* наносят сплошную пленку *1* материала будущего элемента схемы (рис. 15.16, *а*) и покрывают слоем фоторезиста *4* (рис. 15.16, *б*). После экспонирования с фотошаблона *3* и проявления на поверхности подложки образуется фоторезистивная маска *5* (рис. 15.16, *в*), через окна в которой производится травление (рис. 15.16, *г*). Контактная маска удаляется в растворителе и получается требуемая схема *6* (рис. 15.16, *д*).

При методе обратной («взрывной») фотолитографии (рис. 15.17) на подложку *3* наносят слой фоторезиста *2*,

толщина которого больше толщины будущего элемента, и экспонируют с фотошаблона *1* (рис. 15.17, *а*). После проявления на поверхности подложки создается контактная фоторезистивная маска *4*, представляющая негативное изображение схемы (рис. 15.17,*б*). На открытые и закрытые участки подложки наносят пленку *5* из материала будущего элемента схемы (рис. 15.17, *в*) и подложку помещают в слабый травитель, не оказывающий действия на материал элемента схемы. Фоторезистивная маска под действием растворителя отрывается от подложки, увлекая за собой часть пленки, расположенной на маске. В результате образуется требуемая схема *6* (рис. 15.17, *г*).

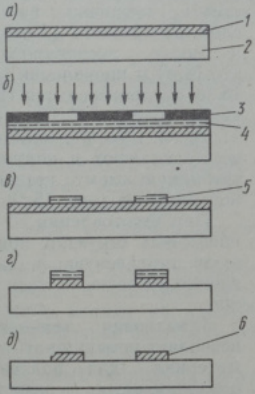


Рис. 15.16. Схема прямой фотолитографии

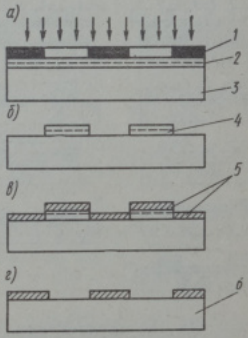


Рис. 15.17. Схема обратной («взрывной») фотолитографии

Недостатками фоторезистивной маски являются трудности, связанные с очисткой подложки через отверстия в фоторезисте, и температурные ограничения, связанные с необходимостью сохранения маски. Эти недостатки устраняет металлическая контактная маска. В качестве материала для таких масок применяют медь, хром и другие материалы. Они выдерживают высокую температуру при напылении и не требуют сильных травителей.

На рис. 15.18 представлены основные этапы типового технологического процесса изготовления резистивной матрицы методом

селективного травления, которое применяется для получения сложного рисунка схемы с высокой точностью. На ситалловую подложку (рис. 15.18, *а*) напыляют четыре сплошных слоя: сплав МЛТ, хром, золото и фоторезист. После экспонирования фоторезиста через фотошаблон (рис. 15.18, *б*) и проявления на поверхности золотой пленки образуется фоторезистивная маска (рис. 15.18, *в*). Затем производят селективное локальное травление пленки золота в смеси азотной и соляной кислоты (царская водка). Этот травитель не действует на слой хрома (рис. 15.18, *г*). Резистивную маску удаляют (15.18, *д*) и травят пленку хрома в соляной кислоте, которая не действует на золото и сплав МЛТ (рис. 15.18, *е*). Для получения нужной схемы вторично наносят слой фоторезиста (15.18, *ж*) и после экспонирования (15.18, *з*) и проявления (рис. 15.18, *и*) производится травление сплава МЛТ (рис. 15.18, *к*). Фоторезистивную маску удаляют и получают требуемую схему резистивной матрицы (рис. 15.18, *л*).

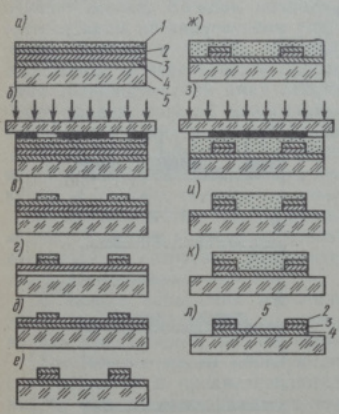


Рис. 15.18. Последовательность изготовления тонкопленочной резистивной матрицы методом селективного травления:
1 — фоторезист; *2* — пленка золота; *3* — пленка хрома; *4* — сплав МЛТ; *5* — подложка

При изготовлении тонкопленочных структур применяют танталовую и электронно-лучевую технологии.

Танталовая технология позволяет использовать один материал для получения проводниковых, резистивных и диэлектрических пленок. Пленки тантала получают катодным распылением. Для получения резистивных пленок с большим диапазоном удельного сопротивления применяют катодное реактивное распыление, а диэлектрические слои получают анодированием пленок тантала.

Электронно-лучевая технология наиболее целесообразна для изготовления микросхем, содержащих только пленочные резисторы и проводники. При этом на подложку напыляют сплошные резистивный и проводящий слои.

Для получения требуемой конфигурации элементов производится обработка при помощи электронного луча по заданной программе.

ГЛАВА 16
ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

16.1. Материалы толстопленочных элементов

Толстопленочными интегральными микросхемами называются такие, в которых резисторы, конденсаторы, контактные площадки и межсоединения изготовляют путем последовательного нанесения на поверхность подложки различных по составу паст с последующим их вжиганием. Пассивные элементы формируются из пленок толщиной более 1 мкм (обычно от 5 до 25 мкм).

В гибридных интегральных микросхемах используют активные элементы, которые изготовляют по обычной технологии и монтируют на подложке, присоединяя к соответствующим контактным площадкам.

Производство толстопленочных интегральных микросхем более экономично, чем тонкопленочных. Это объясняется простотой процесса, так как не требуется создавать вакуум, и малыми затратами на оборудование. Толстопленочные микросхемы обладают высокой надежностью и могут быть рассчитаны на относительно большие мощности рассеяния.

Основные недостатки толстопленочных микросхем — необходимость выполнения операции вжигания, высокая стоимость некоторых паст, сложность получения четкого рисунка схемных элементов.

Подложка. Конструктивной основой толстопленочных микросхем является подложка. Материал подложки и его обработка существенно влияют на параметры пленочной схемы. Материалом для изготовления подложки обычно служит высокоглиноземная керамика марки 22ХС.

В мощных гибридных схемах может возникнуть необходимость рассеяния большой мощности. В этих случаях применяют подложки из оксида бериллия, теплопроводность которого в 9 раз выше, чем из глиноземной керамики. Однако такие подложки имеют высокую стоимость и низкую прочность. Обработка их затруднена вследствие токсичности бериллия.

Подложки имеют прямоугольную форму, что обеспечивает возможность создания большего числа выводов с двух противоположных сторон микросхемы. Минимальная площадь подложки составляет 6 мм^2, максимальная — 500 мм^2, а наименьшая толщина — 0,6 мм.

Керамические подложки изготовляют литьем под давлением или прессованием с последующим обжигом. В подложках могут быть выполнены различные отверстия, углубления, выемки и др. Последующая механическая обработка обеспечивает шероховатость поверхности Rz 1,6 ... 3,2 мкм и неплоскостность 0,1 мм на 25 мм длины.

Пасты. В качестве материала для изготовления элементов толстопленочных схем применяют различные по составу пасты. Они должны обладать определенной *вязкостью*. Величина, обратная вязкости, называется *текучестью*. Слишком большая текучесть приводит к растеканию пасты и искажению рисунка схемы, а малая текучесть — к плохому продавливанию пасты через трафарет. Способность пасты под действием механического давления увеличивать текучесть, а после прекращения давления затвердевать называется *тиксотропностью*. Вследствие тиксотропности она остается на трафарете, просачиваясь через его ячейки только при приложении вдавливающих усилий, а после снятия усилий не растекается по подложке. Для придания пастам тиксотропных свойств в их состав вводят высокомолекулярные соединения (например, терефталатную кислоту).

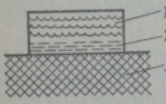


Рис. 16.1. Структура толстопленочного проводника:
1 — наполнитель; *2* — фритта; *3* — подложка

Основными видами паст являются проводящие, резистивные, диэлектрические и лудящие.

Проводящие пасты должны обеспечивать получение пленок с низким удельным сопротивлением и обладать малой активностью при контакте с химически активными материалами (припоем и др.) при высокой температуре. В состав проводящих паст входят мелкодисперсные порошки металлов (функциональный материал), стекло (постоянное связующее) и смесь нескольких органических жидкостей (временное связующее). Электрические свойства проводящей пленки определяются металлом, а стекло обеспечивает адгезию пленки к подложке и предотвращает ее растворение при лужении (рис. 16.1).

Порошок стекла, предназначенный для применения в пасте, называют *фритта*. Его получают быстрым охлаждением расплавленного стекла в воде или распылением сжатым воздухом с последующим размолом частиц до размера 1 ... 3 мкм.

Органические жидкости (жидкие смолы, этилцеллюлоза и др.) обеспечивают равномерное распределение компонентов и придают пасте требуемую вязкость.

Проводящие пасты изготовляют на основе благородных металлов: золота, платины, серебра, палладия и их сплавов.

Высокую стабильность пленок, наименьшее удельное сопротивление (0,002 ... 0,005 Ом/□) и надежность в эксплуатации обеспечивают пасты на основе золота и платины, которые имеют высокую стоимость, но в ряде случаев являются незаменимыми.

Пасты на основе серебра обеспечивают высокую адгезию пленок, но подвержены миграции частиц серебра на поверхность подложки. В результате такой миграции могут создаваться токопроводящие мостики между элементами схемы. Интенсивность

миграции усиливается с повышением влажности окружающей среды и при действии электрических полей. Для уменьшения этих нежелательных явлений и снижения стоимости применяют пасты на основе серебра и палладия. Такие пасты имеют малое сопротивление (до 0,04 Ом/□), высокую адгезию, хорошо облуживаются и совместимы с большинством других материалов.

Для снижения стоимости проводящих паст исследуются композиции, не содержащие драгоценных металлов (на основе меди, никеля и др.).

Резистивные пасты отличаются от проводящих по составу функциональных материалов, в качестве которых используют те же металлы в комбинации с изоляционными и полупроводниковыми материалами. Изменяя процентное содержание компонентов в пасте, можно получить сопротивление резистивных пленок в широких пределах. Постоянное и временное связующие у них те же.

Пасты на основе серебра с палладием позволяют получить резисторы с удельным сопротивлением до 10^6 Ом/□. Более низкой чувствительностью к процессу вжигания обладают пасты на основе диоксида рутения. Резистивные композиции, не содержащие драгоценных металлов, получают на основе оксидов таллия, индия, олова, кадмия и тугоплавких соединений различных металлов (боридов, карбидов и др.).

Диэлектрические пасты применяют для создания изоляционных слоев и конденсаторов. Изоляционные слои изготовляют из паст, состоящих из стекла с керамическим наполнителем. Такие пасты выдерживают многократные термообработки, однако керамический наполнитель создает значительную пористость слоев, что приводит к снижению сопротивления изоляции под воздействием влаги. Эти недостатки устраняют пасты на основе кристаллизирующего стекла с различными наполнителями. Содержание стекла составляет 20...30%. В качестве наполнителя применяют титанат бария и др.

Для защиты резисторов и конденсаторов от воздействия влаги используют специальные покрытия (глазури), представляющие легкоплавкие стекла, не влияющие на величину сопротивления резисторов.

Лудящие пасты состоят из низкотемпературного припоя и органического связующего, в состав которого входит флюс на основе канифоли. Нанесение лудящих паст на контактные площадки осуществляется трафаретной печатью, что обеспечивает однородную толщину нанесенного слоя. В процессе оплавления пасты основная часть связующего испаряется и выгорает.

16.2. Элементы толстопленочных интегральных микросхем

Элементами толстопленочных интегральных микросхем являются резисторы, конденсаторы и соединительные проводники.

Резисторы являются основными элементами, определяющими качественные показатели микросхем и микросборок. Толстопленочная технология позволяет получать резисторы в диапазоне от 1 Ом до 1 МОм с отклонениями в пределах ±20%. Последующая подгонка обеспечивает точность до ±1%. Уменьшение разброса резисторов желательно и при наличии подгонки, которая осуществляется за счет изменения геометрии резистора и почти всегда сопровождается ухудшением других характеристик (ТКС, влагостойкости, уровня шумов).

Толстопленочные резисторы идеальной формы рассчитывают по формуле (15.1). Однако параметры реального резистора существенно зависят от неоднородности структуры, что приводит к изменению на 15...50% значения сопротивления. Источниками погрешностей являются также непрямоугольность сечения резистора, неравномерность толщины пленки, влияние контактных площадок на величину перекрытия и др.

На точность резистора влияет направление нанесения пасты. Для облегчения нанесения пасты и последующей подгонки резисторов длинная сторона резисторов должна располагаться параллельно направлению нанесения пасты. Наименьшая площадь резистора принимается 0,25 мм². Следует избегать зигзагообразной формы вследствие трудностей, связанных с подгонкой резистора. Отношение сторон прямоугольного резистора обычно принимают равным 3 или меньше. Оно никогда не должно превышать 10.

Для обеспечения нужного контакта резистор должен быть уже проводника на 0,25 мм, а длина перекрытия резистора проводником — не менее 0,125 мм. Отношение n максимального и минимального значения сопротивления резисторов, имеющихся в одной схеме, должно быть меньше 16. При $n>16$ возникает необходимость применения различных паст, что связано с изготовлением отдельного трафарета и увеличением стоимости схем. Применение дискретных резисторов допустимо в тех случаях, когда необходимо иметь 1...2 резистора с номиналами, находящимися за пределами диапазона паст. В этих случаях экономически нецелесообразно введение еще одного типа пасты.

Конденсаторы в толстопленочных микросхемах используют малой емкости (до 300 пФ). В толстопленочных гибридных микросхемах используют многослойные дискретные (навесные) керамические конденсаторы. На площади, необходимой для нанесения конденсатора с номиналом 300 пФ, можно расположить навесной многослойный конденсатор на 10 000 пФ.

Соединительные проводники изготовляют из золота и сплавов «платина — золото» или «палладий — золото». Сопротивление зо-

лотых проводников составляет 0,005 Ом/□, а из сплавов «палладий — золото» — 0,10 Ом/□. Проводники располагают только на одной стороне подложки. Ширину проводника и расстояние между ними обычно принимают не менее 0,25 мм. Минимальные размеры площадок для контактных выводов навесных элементов принимают равными 0,4×0,4 мм. Точность изготовления элементов и их расположение от базы составляют ±0,1 мм.

Для определения площади подложки надо вычислить общую площадь, занимаемую резисторами, конденсаторами и навесными элементами схемы. Для учета площади, занимаемой межсоединениями, необходимо увеличить вычисленную площадь в 3...5 раз.

16.3. Основные этапы технологического процесса изготовления толстопленочных микросхем

Последовательность процесса производства толстопленочных микросхем представлена на рис. 16.2.

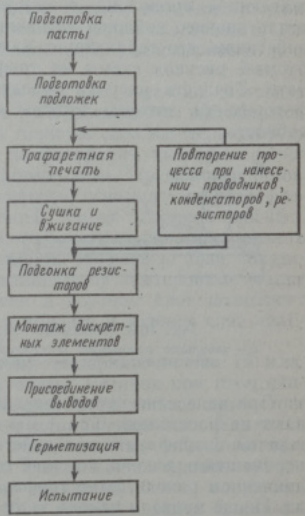


Рис. 16.2. Последовательность изготовления пленочной части микросхем

Подготовка пасты заключается в повторном диспергировании. Диспергирование выполняют перемешиванием вручную при помощи шпателя из нержавеющей стали до тех пор, пока не исчезнут все комочки и осадки. Хранить пасты следует при температуре 10...30 °С и относительной влажности 30...90%. Каждые три месяца пасты необходимо перемешивать и добавлять растворитель по мере его испарения.

Поверхность подложки обезжиривается в растворителе с целью удаления органических загрязнений, а затем промывается в деионизированной воде для удаления неорганических примесей. При этом нельзя допускать соприкосновения шлифованных поверхностей подложки с металлическими поверхностями и другими подложками. Очищенные подложки могут храниться в эксикаторе не более 3 сут. Подложки, пролежавшие более длительный срок, подвергаются термообработке при 600°С в течение 30 мин.

Трафаретная печать является наиболее простым способом получения элементов толстопленочных схем. Она заключается в продавливании вязкого материала через отверстия в трафарете для нанесения необходимого рисунка на подложку. В практике применяют сетчатые и фольговые трафареты.

Сетчатые трафареты изготовляют из нейлона или нержавеющей проволоки диаметром 0,04 ... 0,07 мм. Нержавеющая сталь прочнее нейлона, устойчива к истиранию и химическим воздействиям, что гарантирует длительную эксплуатацию сетки. Требуемый рисунок схемы на трафарете создается методом фотопечати. Точность рисунка определяется качеством фотошаблона и фоторезиста, которые должны иметь высокую разрешающую способность.

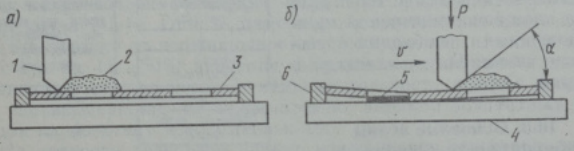


Рис. 16.3. Нанесение пасты через сетчатый трафарет:
а — начальное положение; *б* — нанесение пасты; *1* — ракель; *2* — паста; *3* — сетчатый трафарет; *4* — подложка; *5* — отпечаток пасты; *6* — рамка

При нанесении пасты (рис. 16.3) сетчатый трафарет устанавливают на расстоянии 0,2 ... 1 мм от подложки. Паста заполняет отверстия в трафарете под действием давления, возникающего при перемещении ракеля, который гонит перед собой волну пасты. Под давлением ракеля сетка трафарета изгибается и касается подложки. После прохода ракеля зазор восстанавливается.

Трафарет является многоразовым инструментом, который обеспечивает дозирование пасты, поступающей на подложку. Как правило, размеры трафарета в 4 раза превышают размеры подложки. Размеры ячеек сетки влияют на ширину линий и толщину наносимого покрытия. Мелкие ячейки обеспечивают хорошую четкость линий, а крупные — большую однородность толщины пленки.

Для нанесения паст из резистивных и проводниковых составов применяют сетку в 250 меш *, диаметр отверстия в такой сетке составляет около 0,06 мм. Диэлектрические пасты наносят через сетку в 165 меш с размером отверстия около 0,1 мм.

Ракель изготовляют из резины, полиуретана и других материалов. Важное значение имеют форма ракеля и его жесткость. Давление, прикладываемое к ракелю, влияет на однородность толщи-

* Меш — единица, обозначающая число отверстий сетки, приходящихся на отрезок в один дюйм.

ны пленки. Толщина пленки зависит от деформируемости и других свойств маски, расстояния между маской и подложкой, вязкости пасты, от скорости движения ракеля, толщины эмульсионного слоя и др. Давление обычно создается пневматическим методом и изменяется в пределах 2 ... 20 Н.

На воспроизводимость элементов рисунка схемы влияют скорость движения ракеля, его материал, форма, давление и угол наклона, толщина эмульсионного слоя на трафарете, вязкость пасты, зазор между трафаретом и подложкой, равномерность толщины подложки и др.

Фольговые трафареты (металлические маски) используют при контактном методе нанесения пасты. Их изготовляют из металла толщиной, равной толщине слоя пасты, и закрепляют в жесткой рамке. Требуемая конфигурация трафарета получается травлением через окна в фоторезисте. Применение биметаллических трафаретов (бронза — никель) повышает точность размеров рисунка и позволяет получить линии шириной до 75 ... 100 мкм. Недостатками металлических масок являются трудность очистки, хрупкость и высокая стоимость трафарета. Для получения линий шириной до 25 мкм используются трехслойные маски (медь — латунь — никель). Отверстия в верхнем слое позволяют точно отмерить количество пасты, а полости в нижнем слое получить четкий рисунок на подложке.

После нанесения пасты подложку выдерживают 5 ... 15 мин. Это время необходимо для усадки пасты. Рисунок при этом становится более однородным по толщине. Затем пленки сушат при $t = 100 \ldots 150$°С для удаления летучих компонентов паст. Удаление последних должно осуществляться постепенно во избежание возникновения пустот и раковин. Для сушки целесообразно применять инфракрасные лампы. В этом случае излучение проникает в пленку и равномерно сушит ее. При других методах сушки на поверхности образуется корка, задерживающая испарение растворителя, что приводит к скручиванию пленки и появлению раковин.

Вжигание паст выполняют в конвейерных печах с кварцевым муфелем (рис. 16.4). Печь имеет три температурные зоны.

В зоне *I* выжигается органическая связка. Процесс ведется при $t = 300 \ldots 350$°С с медленным подъемом температуры (~20°С в минуту). При быстром протекании процесса возникают пузырение и отслаивание пасты от подложки. Удаление органических выделений, которые не должны попадать в горячую зону печи, производится потоком сухого воздуха через вентиляционную систему. На этом этапе процесса не требуется точно выдерживать температуру.

Вжигание выполняется в зоне *II* при высокой температуре (до 1000°С) и в оксидной среде. Хорошей оксидной средой является воздух, состав которого достаточно стабилен. Во время вжигания

нелетучая часть органического связующего разлагается и стеклянная фритта размягчается, смачивая керамическое основание и связывая частицы с образованием сплошных металлических и диэлектрических слоев. Режимы вжигания влияют на адгезию проводников, плотность конденсаторов и на различные характеристики резисторов. Температура и время на этом этапе критичны, так как химические реакции, определяющие состав пленки и их свойства, протекают со скоростью, которая примерно удваивается при повышении температуры всего на 10 °С. Температуру выдерживают с точностью ±1 °С.

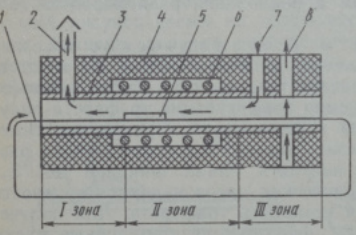


Рис. 16.4. Печь для вжигания паст:
1 — конвейерная лента; *2* — вытяжка; *3* — муфель; *4* — основание печи; *5* — плата; *6* — нагреватель; *7* — вход воздуха; *8* — воздушная завеса

Химические процессы, происходящие во время вжигания, можно регулировать путем изменения состава газов, находящихся в печи. Однако это значительно усложняет конструкцию печи.

Органические выделения, которые не должны попадать в горячую зону печи, удаляют потоком воздуха. Воздух является хорошей оксидной средой, а состав его довольно стабилен. Газы, выделяющиеся при сгорании, уходят через выходное отверстие, не влияя на процесс обжига пленок.

В зоне *III* происходит охлаждение.

Так как температура вжигания проводящих, резистивных и диэлектрических паст различна, то последовательность нанесения слоев идет в сторону уменьшения температуры обжига. Сначала наносится проводящая паста, образующая проводники, контактные площадки и нижние пластины конденсаторов, а затем паста для диэлектриков, конденсаторов и изоляции пересечений проводников. Третьим слоем является паста, образующая верхние обкладки конденсаторов и пересекающиеся проводники. Последними наносятся резистивные пасты, температура обжига которых наименьшая. Вжигание производится после нанесения каждого слоя. Возможно совместное вжигание диэлектриков и проводников.

При изготовлении резисторов пленка обычно наносится на большую площадь и значение сопротивления получается меньше требуемой. Подгонка резисторов заключается в удалении части пленки, что приводит к увеличению сопротивления.

Абразивный метод подгонки осуществляется на специальной установке (рис. 16.5). Удаление пленки производится порошком оксида алюминия, который продувается через сопло, установленное над резистором. В процессе подгонки сопротивле-

ние резистора сравнивается с эталонным сопротивлением, включенным в одно из плеч моста, к которому подключен дифференциальный усилитель с обратной связью. Последний осуществляет управление и контроль за процессом подгонки. Количество материала, удаляемого с резистора за единицу времени, определяется размерами абразивных частиц, скоростью продвижения резистора под форсункой, материалом резистора и др. Размеры частиц аб-

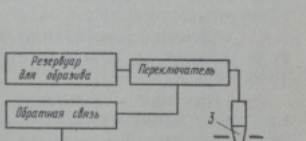


Рис. 16.5. Схема абразивной подгонки резисторов:
1 — подложка; *2* — резистор; *3* — сопло

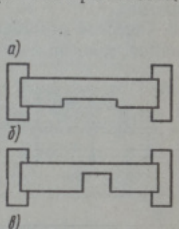


Рис. 16.6. Форма прорези при подгонке резисторов:
а, б — при абразивной подгонке; *в* — при лазерной подгонке

разива принимают 10 ... 50 мкм. После подгонки порошок удаляется с подложки при помощи вакуумного пылесоса. Абразивный метод подгонки (рис. 16.6, *а*) обеспечивает точность сопротивления ±5% и выше. Недостатками метода являются возможность загрязнения других элементов схемы и увеличение шума резистора из-за шероховатости краев прорези.

Наиболее совершенным методом является подгонка резисторов при помощи лазера.

Лазерная подгонка дает меньший шум, обеспечивает высокую производительность процесса (до 100 резисторов в час) и высокую точность подгонки (до ±0,1%). Для подгонки используются надрезы различных типов (рис. 16.6, *в*).

При лазерной подгонке изменения в величине сопротивления достигаются при прорезании выемки поперек резистора. Для получения значительного изменения сопротивления резистора надо прорезать его более чем на половину. Это может привести к разогреванию узких мест резистора. Чем меньше глубина надреза, тем больше длина выемки. Прорези, выполненные лазером, являются узкими (25 мкм), и если делать прорезь в виде канавки,

то пришлось бы большинство резисторов прорезать почти насквозь. Поэтому при лазерной подгонке применяют метод *L*-прорезей. Прорезь состоит из двух частей; одна — для грубой регулировки сопротивления, а другая — для тонкой. Глубина первой прорези более значительно изменяет сопротивление резистора, чем длина второй прорези. Это дает возможность осуществить точную подгонку. Для подгонки резисторов применяют автоматизированные установки.

В качестве примера рассмотрим технологический процесс изготовления толстопленочной интегральной схемы простого усилителя (рис. 16.7, *а*). Основные этапы технологического процесса:

— нанесение и вжигание нижнего электрода конденсатора *1* (рис. 16.8, *а*);

— нанесение и вжигание диэлектрика конденсатора *2*, верхнего электрода *3* и золотой контактной площадки *4* (рис. 16.8, *б*). Перед вжиганием между всеми операциями печати производится сушка;

— нанесение и вжигание проводников и пересечений *5* (рис. 16.8, *в*);

— печать и вжигание резистора *6* (рис. 16.8, *г*);

— подгонка резистора *7* и монтаж транзистора *8* (рис. 16.8, *д*).

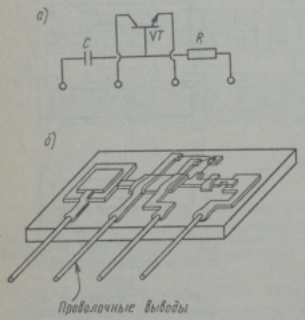


Рис. 16.7. Гибридная толстопленочная интегральная схема:
а — электрическая схема; *б* — подложка с элементами

После подгонки резисторы и конденсаторы защищают полимерным покрытием.

Для повышения прочности выводы вставляют в отверстия платы, обжимают, а затем припаивают (рис. 16.7, *б*).

Перспективным направлением в толстопленочной технологии является внедрение низкотемпературных полимерных и фотополимерных паст, обладающих свойствами фоторезистов. Большую роль в экономии благородных металлов должны сыграть пасты на основе никеля, меди и алюминия, вжигание которых благодаря внедрению специальных восстановителей становится возможным в окислительной атмосфере.

Значительный интерес представляют методы изготовления толстопленочных схем на металлических подложках из анодированного алюминия и стальных со стекловидным покрытием. Перспективно применение подложек из пластмассы и стекла, которые обеспечивают высокую точность резисторов и дают возможность исключить операцию их подгонки.

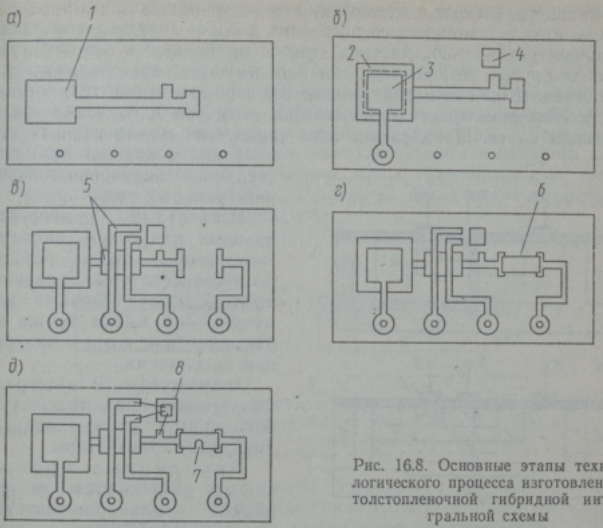


Рис. 16.8. Основные этапы технологического процесса изготовления толстопленочной гибридной интегральной схемы

ГЛАВА 17
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

17.1. Элементы полупроводниковых микросхем

Полупроводниковыми интегральными микросхемами называют такие, у которых все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и (или) на поверхности полупроводникового материала. Они могут быть построены на различных материалах. Однако наибольшее применение находит кремний вследствие широкого интервала рабочих температур и возможности получения на его поверхности стойкой пленки диоксида кремния SiO_2. Эта пленка служит защитным покрытием при проведении ряда технологических операций, предохраняет схему от внешних воздействий и применяется для изоляции отдельных элементов.

Перспективным материалом является арсенид галлия. Он обладает высокой подвижностью электронов, прозрачен в инфракрасной области, имеет высокую теплопроводность и электрооптические свойства. Схемы, построенные на арсениде галлия, обла-

дают по сравнению с кремниевым в 5 раз бо́льшим быстродействием, меньшей мощностью рассеяния и более значительной радиационной стойкостью. Арсенид галлия применяют в оптоэлектронных и других устройствах, где используются его специфические свойства. Широкое использование его ограничивается трудностями получения монокристаллов больших размеров и создания изолирующих слоев. Преодоление этих трудностей может сделать этот материал основным при изготовлении полупроводниковых интегральных схем.

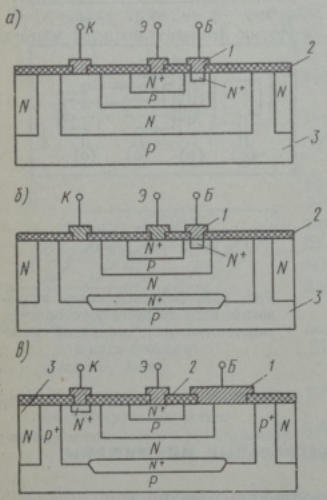


Рис. 17.1. Структуры биполярных транзисторов:

а — планарный; *б* — планарно-эпитаксиальный; *в* — планарно-эпитаксиальный с барьером Шотки; *1* — алюминиевый контакт; *2* — диоксид кремния; *3* — кристалл кремния

Транзисторы. В интегральных микросхемах используют биполярные и униполярные (полевые) транзисторы.

Биполярные транзисторы разделяются на планарные и планарно-эпитаксиальные (рис. 17.1).

Планарный транзистор (рис. 17.1, *а*) отличается тем, что все слои, соответствующие эмиттеру (Э), базе (Б) и коллектору (К), выходят на одну поверхность. Коллекторные токи при этом проходят протяженный горизонтальный участок под базой, прежде чем достигнут контакта. Повышенное сопротивление коллектора снижает быстродействие транзистора.

Планарно-эпитаксиальный транзистор имеет высоколегированный захороненный слой N^+-типа с малым омическим сопротивлением (рис. 17.1, *б*), который уменьшает сопротивление коллектора. Транзисторы имеют форму прямоугольника шириной 50 ... 200 мкм и длиной 75 ... 300 мкм. Глубина эмиттерной области составляет несколько микрометров. Большинство биполярных транзисторов изготовляют со структурой *N-P-N*, что обеспечивает более высокое быстродействие по сравнению со структурой

P-N-P, так как подвижность электронов в 2...3 раза превышает подвижность дырок.

На рис. 17.1, *в* показана структура планарно-эпитаксиального транзистора с барьером Шотки. Она представляет собой транзистор *N-P-N+*-типа, в котором металлический контакт базы расширен на коллекторную область. Такой контакт обладает выпрямляющими свойствами и работает как диод. Транзисторы с барьером Шотки характеризуются высоким быстродействием и большим коэффициентом усиления. Изготовление таких транзисторов не требует дополнительных операций, а площадь незначительно превышает площадь обычного транзистора.

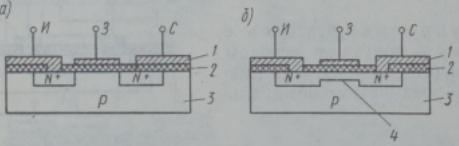


Рис. 17.2. Структура МОП-транзистора с индуцированным (*а*) и встроенным (*б*) каналами:
1 — алюминиевый контакт; *2* — диоксид кремния; *3* — кристалл кремния; *4* — канал *N*-типа

Униполярный (полевой) транзистор имеет структуру «металл — оксид — полупроводник» (МОП) и может быть выполнен с индуцированным или встроенным каналом (рис. 17.2), который создается технологическим путем.

МОП-транзистор с индуцированным каналом (рис. 17.2, *а*) представляет собой конденсатор, верхней обкладкой которого является металлический затвор (З), нижней — полупроводник (кремний *P*-типа), а диэлектриком — слой SiO_2. Когда к затвору приложено положительное напряжение, на поверхности кремния между диффузионными областями *N*-типа индуцируется (наводится) канал проводимости *N*-типа от истока (И) к стоку (С).

С помощью напряжения на затворе можно менять в широких пределах ток от истока к стоку (от 10^{-9} до 10^{-2} А).

Максимальное напряжение на затворе (10 В) ограничивается электрической прочностью изолятора. Малое расстояние между диффузионными областями (10 мкм) и тонкий оксидный слой (0,2 мкм) обеспечивают максимальное изменение проводимости от истока к стоку.

Важнейшим свойством МОП-транзисторов является высокое входное сопротивление, что объясняется хорошей изоляцией затвора слоем диоксида кремния. МОП-транзисторы имеют простую структуру и малую по сравнению с обычными транзисторами паразитную емкость. Площадь МОП-транзистора примерно в 10 раз меньше, чем планарного.

Диод. Диод образуется путем создания *P-N*-перехода между диффузионным слоем и монокристаллом полупроводника (рис. 17.3). Технология изготовления таких диодов идентична технологии изготовления транзисторов. На практике в качестве диодов используют транзисторные структуры, что значительно упрощает процесс их изготовления. Для получения диодов на основе транзисторных структур используют различные схемы диодного включения транзисторов.

Резисторы. По значимости они занимают следующее место после полупроводниковых приборов. Резисторы применяют двух типов: полупроводниковые и тонкопленочные.

Полупроводниковые резисторы получают методом диффузии (рис. 17.4, *а*). Они имеют малые размеры с номинальными значениями от 25 Ом до 25 кОм. Такие резисторы отделяют от остальной части методом изолирующей диффузии. Значение сопротивления зависит от размеров резистивного слоя. Сопротивление диффузионной области может быть выражено в единицах поверхностного сопротивления материала $\rho_к$:

$$R = \rho_к L/b, \qquad (17.1)$$

где L — длина резистора; b — ширина резистора.

Контактные площадки, расположенные на концах диффузионного резистора, вносят дополнительное сопротивление, которое учитывают поправочным коэффициентом. При $R=4$ кОм и $\rho_к = 200$ Ом/□

$$L/b = R/\rho_к = 4000/20 = 20/1.$$

Из технологических соображений ширина резистора b принимается равной 25 мкм; следовательно, $L=500$ мкм. Точность диффузионных резисторов составляет $\pm(10 \ldots 20)$ %. Она зависит от

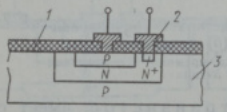


Рис. 17.3. Структура диода:
1 — диоксид кремния; *2* — алюминиевый контакт; *3* — кристалл кремния

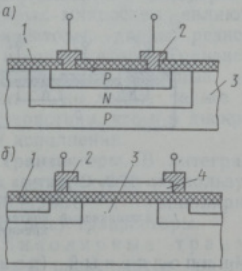


Рис. 17.4. Резисторы полупроводниковых микросхем:
а — диффузионный; *б* — тонкопленочный; *1* — диоксид кремния; *2* — алюминиевый контакт; *3* — кристалл кремния; *4* — пленка нихрома

равномерности распределения примесей и точности выполнения конфигурации резистивного слоя.

Максимальная допустимая мощность, рассеиваемая диффузионными резисторами, достаточно велика и определяется главным образом возможностями осуществления теплоотвода. Абсолютные значения сопротивлений имеют сравнительно большой разброс в разных образцах, но обеспечивают достаточно хорошее согласование сопротивлений в одной схеме.

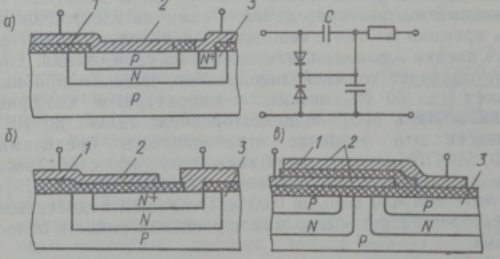


Рис. 17.5. Конденсаторы полупроводниковых микросхем:
а — диффузионный; *б* — МОП-типа; *в* — тонкопленочный; *1* — диоксид кремния; *2* — алюминиевый контакт; *3* — кристалл кремния

Тонкопленочные резисторы (рис. 17.4, *б*) представляют собой пленку материала с большим сопротивлением, расположенную на пленке диоксида кремния. Наибольшее применение имеют резисторы из нихрома. Наличие хрома в составе резистора обеспечивает хорошее сцепление пленки со слоем диоксида кремния.

Типичные тонкопленочные резисторы имеют сопротивление от 15 до 800 Ом/□, а температурный коэффициент $5 \cdot 10^{-4}$ 1/°С.

Преимущества тонкопленочных резисторов заключаются в возможности размещения их на меньшей площади и лучшей изоляции. Значение паразитных емкостей у них значительно меньше, чем у диффузионных. Такие резисторы можно выполнять с точностью до ±1%. Однако использование тонкопленочных резисторов требует введения дополнительных операций технологического процесса, которые приводят к удорожанию схемы. Тонкопленочные резисторы обычно применяют в тех случаях, когда требуются стабильные и точные сопротивления больших номиналов.

Конденсаторы полупроводниковых микросхем. Они имеют следующие разновидности (рис. 17.5): диффузионные, металл-оксидно-полупроводниковые (МОП-конденсаторы) и тонкопленочные.

Диффузионные конденсаторы (рис. 17.5, *а*) образуются смещенным в обратном направлении *p-N*-переходом. Для

данного материала емкость является функцией площади перехода, концентрации примесей и приложенного напряжения. Емкость P-N-перехода имеет линейную зависимость от напряжения. Точность диффузионных конденсаторов составляет $\pm 20\%$. При использовании кремния можно получить конденсаторы емкостью до 1000 пФ и пробивным напряжением в 7 ... 10 В.

МОП-конденсаторы (рис. 17.5, *б*) обладают лучшими характеристиками. Они создаются непосредственно на полупроводниковой пластине. Диэлектриком здесь является слой диоксида кремния, образованный на полупроводнике. Одним из электродов является область кремния N^+-типа, лежащая под оксидом, а другим — проводящая пленка алюминия, нанесенная на слой оксида. Такой конденсатор обладает хорошей линейностью, высоким пробивным напряжением (до 50 В), низким температурным коэффициентом. Удельная емкость МОП-конденсаторов составляет до 10^4 пФ/см^2. Практически это значение ограничивается пределами 300 ... 1000 пФ. МОП-конденсаторы обладают высокой стабильностью, их емкость не зависит от напряжения. Температурный коэффициент может быть получен меньше 0,03%. Основным недостатком МОП-конденсаторов является большая паразитная емкость относительно подложки.

Тонкопленочные конденсаторы (рис. 17.5, *в*) получаются путем осаждения пленки диэлектрика между двумя проводящими пленками из алюминия, образующими пластины конденсатора. Одна из них наносится на слой диоксида кремния. В качестве диэлектрика применяют диоксид кремния SiO_2 или оксид тантала Ta_2O_5. Благодаря хорошей изоляции от подложки слоем SiO_2 конденсатор имеет высокое напряжение пробоя, достигающее сотен вольт. Емкость тонкопленочного конденсатора может достигать 900 пФ/мм^2, когда в качестве диэлектрика применяется SiO_2, и до 3500 пФ/мм^2, если диэлектриком является Ta_2O_5. Точность конденсатора составляет $\pm (5 \ldots 10)\%$.

17.2. Получение монокристалла кремния и его первичная обработка

Кремний является основным материалом, применяемым для изготовления полупроводниковых интегральных микросхем. Он представляет собой сравнительно легкий материал (плотность 2,3 г/см^3) серого цвета с температурой плавления 1420°С. Максимальная температура обработки не должна превышать 1300°С, так как при более высокой температуре возможна деформация заготовки.

В качестве исходного материала для полупроводниковых микросхем используют монокристаллический кремний высокой чистоты с удельным сопротивлением $\sim$100 Ом/см. Такой кремний содержит один атом примеси на 10^9 атомов кремния. Его обычно

называют *беспримесным* или *кремнием с собственной проводимостью.*

Кремний получают восстановлением SiO_2 с помощью углерода в электрической печи. На этой стадии кремний имеет степень чистоты ~98% и не может быть использован для изготовления полупроводниковых интегральных микросхем.

Для получения чистого кремния используют методы зонной очистки и бестигельной плавки.

Метод зонной очистки (рис. 17.6) Слиток кремния *1* помещают в графитовую лодочку *4*. С помощью кольцевого электронагревателя *2* создается расплавленная зона *3*, равная 0,1 длины слитка. Она проходит через весь слиток со скоростью 0,1...2 мм/мин. При перемещении такой зоны вдоль материала примеси будут скапливаться в жидкой фазе и концентрироваться в конце слитка, который после окончания процесса очистки отрезается. Процесс производится в защитной атмосфере азота N_2.

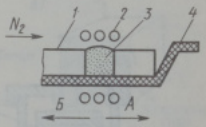


Рис. 17.6. Схема зонной очистки кремния:
А — направление движения слитка; *б* — направление движения расплавленной зоны

Для получения кремния необходимой чистоты надо повторить процесс зонной очистки или создать несколько расплавленных зон.

Метод бестигельной плавки (рис. 17.7). Слиток кремния *2* устанавливается между верхним *1* и нижним *5* штоками внутри герметизированной вакуумной камеры *6*, заполненной инертным газом. Расплавление узкой зоны *3* материала обеспечивается индуктором *4*. В результате движения индуктора расплавленная зона перемещается от одного конца слитка к другому. Кроме того, верхняя и нижняя части слитка вращаются в разные стороны, что обеспечивает хорошее перемешивание расплава. Это способствует перемещению примеси, скапливаемой в верхней части слитка, которая затем удаляется. При такой очистке расплавленный кремний не реагирует с материалом тигля, так как отделен от него потоком инертного газа. Недостатком метода является низкая производительность, так как может быть создана только одна расплавленная зона и процесс очистки приходится многократно повторять.

Очищенный материал надо получить в виде монокристалла *, так как границы раздела между отдельными кристаллами уменьшают подвижность носителей и ухудшают характеристики микросхем.

Метод Чохральского. Выращивание монокристалла кремния производится по методу Чохральского (рис. 17.8). Определенное

---

* Монокристалл — единичный кристалл с непрерывной кристаллической решеткой.

количество сверхчистого кремния, из которого должен быть получен монокристалл, вместе с соответствующей примесью помещают в тигель *7* из графита или кварца. Тигель и доза кремния *6* находятся внутри кварцевого цилиндра *1* с инертным газом (обычно аргоном). Для ввода и вывода аргона предусмотрены трубки *8* и *10*. Смесь кремния с примесным материалом, поступающим через трубку *9*, нагревается до плавления при помощи высокочастотного индуктора *5*. Затем температура стабилизируется на

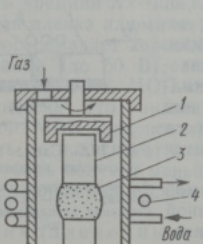


Рис. 17.7. Бестигельная зонная очистка кремния

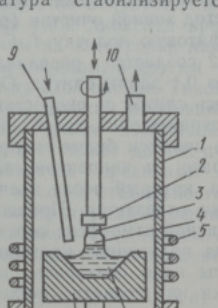


Рис. 17.8. Выращивание монокристалла кремния

уровне несколько выше температуры плавления кремния. После этого в расплав погружают затравку *3*, представляющую собой весьма совершенный и точно ориентированный кристаллик кремния. Затравку на некоторое время оставляют в расплаве, чтобы исчезли все поверхностные дефекты. Затем ее начинают вращать при помощи патрона *2* и медленно вытягивать из расплава. Регулируя скорость вытягивания и температуру расплава, можно поддерживать диаметр и удельное сопротивление растущего кристалла *4* практически постоянными. При вытягивании стержня происходит дополнительная очистка материала, так как примеси остаются в расплаве, а вращение затравки способствует улучшению кристаллической структуры, так как облегчается перемещение атомов к соответствующим узлам кристаллической решетки. Отсутствие контакта растущего кристалла со стенками тигля позволяет получать равномерно легированные монокристаллы кремния диаметром до 150 мм и длиной до 2 м.

Кристаллическое тело анизотропно. При измерении физических свойств надо указывать направления, к которым относятся полученные значения величины. Для этого используют *индексы Миллера* (1893 г.), определяющие положение кристаллографических плоскостей. Для кубических кристаллов они включают три цифры, относящиеся к прямоугольной системе координат (рис. 17.9, *а, б*). Кристаллографическая плоскость, проходящая через диагонали трех граней кубической ячейки и отсекающая на координатных осях равные отрезки, называется *кристаллографической плоскостью* (111). Кристаллографическая плоскость (110) проходит через точки $X=1$; $Y=0$; $Z=0$ и параллельна осям Y и Z. Направления, перпендикулярные плоскостям, выражаются теми же числами, но заключаются в квадратные скобки.

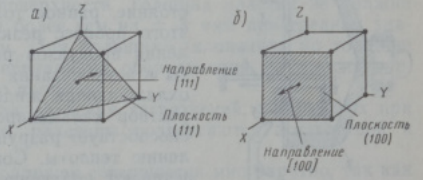


Рис. 17.9. Плоскости кубического кристалла и соответствующие индексы Миллера

При выращивании монокристаллов затравка ориентируется в направлении [111] с отклонениями не более $\pm 2°$. Ориентация монокристаллических слитков обычно производится рентгеновским методом. Если для лучей видимого света угол падения равен углу отражения, то для рентгеновского излучения существует только один угол, при котором происходит отражение (рассеяние) рентгеновских лучей. Этот угол зависит от частоты падающих лучей и строения кристаллографической решетки вещества, от которого происходит отражение.

Экспериментально полученные углы отражения для кремния (в рентгеноскопии их называют брэгговскими) для плоскости (111) составляют 17°56′.

Первичная обработка монокристалла заключается в шлифовании по диаметру и распиловке на пластины толщиной 200... 600 мкм, которые подвергаются механической и химической обработке для получения высокого качества рабочей поверхности ($Rz \leqslant 0{,}05$ мкм; неплоскостность <1 мкм на площади 1 см^2).

Методы обработки кремния. Кремний отличается высокой твердостью и хрупкостью, поэтому обычные методы для его обработки неприемлемы.

Резка стальными полотнами или проволокой с применением абразива долгое время оставалась основным методом распиловки слитка на пластины и только с внедрением дисков с алмазосодержащей внутренней режущей кромкой стала применяться реже.

Металлическая основа *2* диска (рис. 17.10) изготовляется из нержавеющей стали толщиной 0,1 ... 0,2 мм. Режущая часть *3* насыщена алмазными зернами (20 ... 40 мкм). Режущий диск закрепляют на барабане *1*, который может вращаться вокруг своей оси. Слиток *5* закреплен на оправке *4* клеящей мастикой *7* и ориентирован так, чтобы режущий диск был установлен строго перпендикулярно кристаллографической оси [111]. Пластина отрезается в результате прямолинейного перемещения слитка относительно вращающегося диска. Затем слиток отводят в исходное положение и перемещают на расстояние, равное толщине пластины. После этого процесс резки повторяют. Для удаления продуктов резания и отвода теплоты в зону резания через сопло *6* подается охлаждающая жидкость (обычно 5%-ный раствор кальцинированной соды), которая способствует разрушению материала и удалению теплоты. Современные станки обеспечивают получение пластин высокой точности по толщине (±20 мкм) и с малой шероховатостью поверхности (*Ra* 0,63 мкм).

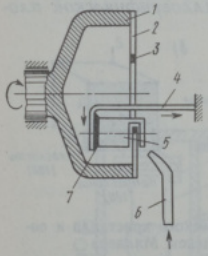


Рис. 17.10. Резка диском с внутренней режущей кромкой

После резки пластины подвергают шлифовке и полировке, а затем химической обработке.

Шлифование полупроводниковых пластин необходимо для получения требуемой толщины и параллельности плоскостей. При этом удаляется поверхностный слой монокристалла, нарушенный при резке слитка.

Пластину шлифуют сначала с одной, а затем с другой стороны на специальной оправке, к которой она приклеивается смесью воска с канифолью. Для более полного прилегания нагретую оправку с пластинами помещают под пресс с резиновой прокладкой и выдерживают до полного остывания. При шлифовании оправка имеет сложное вращательно-поступательное движение, что обеспечивает хорошее качество поверхности пластин. Во время шлифования осуществляется непрерывная подача суспензии. После обработки одной стороны пластины приклеиваются на оправку шлифованной стороной и обрабатывают другую сторону.

После шлифования на поверхности пластины остается нарушенный поверхностный слой, который удаляется полированием.

Предварительное полирование осуществляется суспензиями на основе алмазного порошка с размером зерен не более 3 мкм, на тканых материалах (батисте и др.). Толщина удаляемого слоя составляет 2,5 мкм.

Окончательное полирование производится алмазным микропорошком с размером гранул 1 мкм на замше. Более

высокое качество обработки обеспечивает химико-механическое полирование, при котором снятие материала с обрабатываемой поверхности происходит в основном за счет механического удаления образующихся в результате химических реакций мягких пленок. Для полирования применяют суспензии или гели из субмикронных порошков оксида кремния, алюминия, циркония, взвешенных в растворах на основе NaOH, KOH и др. Полировальник изготовляют из замши или кожи.

Контроль пластины после механической обработки производится по геометрической форме, толщине механически нарушенного слоя и шероховатости поверхности. Толщина пластин не должна отличаться от номинала более чем на ± 3 мкм при среднем значении толщины 200 мкм. При больших отклонениях по толщине может потребоваться переналадка оборудования на многих операциях технологического процесса.

Очистка пластин. Для удаления загрязнений, полученных при механической обработке, пластины подвергаются жидкостной и сухой очистке.

Очистка пластин и подложек совершается многократно, так как загрязнения возможны на всех последующих этапах технологического процесса изготовления микросхем.

Для жидкостной очистки используют обезжиривание, травление и промывку.

Обезжиривание осуществляется последовательно в ряде различных растворов, так как подобрать один растворитель, удаляющий все возможные загрязнения, нельзя. Удаление растительных и животных жиров производится в растворах перекиси водорода, мыльных растворителей и т. п. Для химической очистки применяют горячий перекисно-аммиачный раствор. Весьма эффективна очистка в органических растворителях (бензине, этиловом спирте), однако такие растворители токсичны и огнеопасны. Исключение составляет фреон, который негорюч, нетоксичен и обеспечивает высокое качество очистки.

Травлением в кислотных и щелочных составах удаляются загрязнения и приповерхностный слой подложки. Электрохимическое травление осуществляется в растворах, содержащих плавиковую кислоту. Такой процесс называют также электрополированием.

Промывка пластин и подложек производится после каждой операции обезжиривания и травления в особо чистой деионизованной воде.

Для сухой очистки используют отжиг, газовое, ионное и плазмохимическое травление. Эти методы очистки исключают применение токсичных реактивов и легко поддаются автоматизации.

17.3. Основные технологические процессы, применяемые при изготовлении полупроводниковых интегральных микросхем

Основными технологическими процессами, применяемыми при изготовлении полупроводниковых интегральных микросхем, являются оксидирование, фотолитография, диффузия, эпитаксия, ионное легирование.

Оксидирование кремния. Этот процесс имеет важное значение в технологии изготовления полупроводниковых интегральных микросхем.

Диоксид кремния SiO_2 представляет собой стеклообразный оксид, имеющий тот же химический состав, что и кварцевое стекло. Эти оксиды являются хорошей изоляцией для отдельных элементов схемы, служат маской, препятствующей проникновению примесей при диффузии, применяются для защиты поверхности и создания активных диэлектрических элементов (например, в МОП-транзисторах). Они образуют равномерное сплошное покрытие на поверхности кремния, которое легко стравливается и удаляется с локальных участков. Повторное оксидирование обеспечивает защиту *P-N*-перехода от воздействия окружающей среды. Коэффициент термического расширения кремния близок к диоксиду кремния. Последний обладает хорошей адгезией и сравнительно легко создается на поверхности пластины.

В зависимости от метода получения различают термические и анодные оксиды.

Термические оксиды получают при ускоряемых нагревом реакциях кремния с кислородом и другими веществами, содержащими кислород. Такие оксиды имеют толщину $\sim$1 мкм и обладают высокой плотностью.

Метод термического оксидирования имеет две разновидности:

1) высокотемпературное оксидирование в потоке сухого кислорода и увлажненных газов;

2) оксидирование в парах воды при высоком давлении (до 50 МПа), при сравнительно невысоких температурах (500 ... 900°С).

Оксидирование в потоке увлажненных газов (рис. 17.11). Пластины кремния помещают в кварцевую трубу, где установлена температура 1100°С. Один конец трубы соединен с увлажнителем (деионизованной водой), через которую пропускают газ (аргон, азот и др.). При отключенном увлажнителе осушенный кислород поступает непосредственно в кварцевую трубу.

Оксидирование проводится в такой последовательности: предварительная выдержка в сухом кислороде ($\sim$15 мин); длительное оксидирование во влажном кислороде (2 ч) и окончательное оксидирование в сухом кислороде. Первая операция дает прочную пленку малой толщины. Термическая обработка в среде влажного кислорода обеспечивает быстрый рост пленки (до 1 мкм), но

плотность ее получается недостаточной. Последующая обработка в сухом кислороде приводит к уплотнению пленки и улучшению ее структуры.

Экспериментально установлено, что толщина оксида x связана со временем t зависимостью

$$x^2 = kt, \qquad (17.2)$$

где k — коэффициент, зависящий от температуры и давления кислорода.

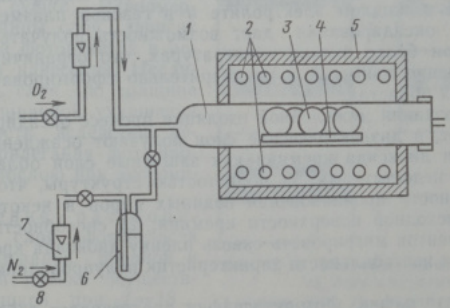


Рис. 17.11. Установка для термического оксидирования кремния в потоке увлажненных газов:

1 — кварцевая труба; *2* — нагреватель; *3* — пластины кремния; *4* — кассета; *5* — кожух печи; *6* — увлажнитель газов; *7* — ротаметр; *8* — кран

Наиболее часто используют толщину оксида, составляющую десятые доли микрометра, а верхний предел по толщине равен 1 мкм. Добавление в оксидированную среду хлорсодержащих компонентов повышает скорость оксидирования и увеличивает напряженность пробоя. Главная роль хлора заключается в превращении случайно попавших в диоксид кремния примесных атомов (калия, натрия и др.) в электрически неактивные.

Окисление кремния в парах воды при высоком давлении осуществляется в камере, внутренняя поверхность которой покрывается золотом или другим инертным металлом во избежание нежелательной реакции. В камеру помещают пластины кремния и определенное количество воды высокой чистоты, которая нагревается до температуры оксидирования (500 ... 800°С). Толщина пленки зависит от длительности оксидирования, давления и концентрации паров воды.

На качество оксидной пленки влияет чистота рабочего объема, в котором производится процесс. Попадание даже ничтожного ко-

личества примесных атомов может существенно изменить свойства материала исходной заготовки. Наиболее вредное воздействие оказывают примеси меди, коэффициент диффузии которых в кремнии очень велик.

Большое значение имеет предокислительная очистка кремния от загрязнений, приводящих к прерывистости в пленках. Преимущество оксидирования при высоком давлении состоит в возможности снижения температуры процесса без увеличения продолжительности.

Анодное оксидирование кремния имеет две модификации: оксидирование в жидком электролите и в газовой плазме. Процесс анодного оксидирования дает возможность получать оксидные пленки при более низких температурах, что ограничивает перераспределение примесей в предварительно сформированных диффузионных областях.

Для создания межслойной изоляции процесс оксидирования не применяют, а диэлектрические слои получают осаждением.

Пленки диоксида кремния как защитные слои обладают следующими недостатками: 1) пористостью структуры, что приводит к возможности проникновения водяных паров и некоторых примесей к исходной поверхности кремния; 2) способностью атомов ряда элементов мигрировать сквозь пленку диоксида кремния, что приводит к нестабильности характеристик полупроводниковых приборов.

Фотолитография. Фотолитография представляет собой процесс образования на поверхности диоксида подложки фоторезистивного изображения топологии схемы и последующего переноса его на подложку. По структуре он совпадает с методами, применяемыми при образовании проводников печатных плат. Однако этот процесс имеет свою специфику, обусловленную требованиями высокой разрешающей способности и повышенными требованиями к качеству применяемых материалов и чистоте окружающей среды.

Высокую разрешающую способность рисунка схемы обеспечивают позитивные фоторезисты. Однако их преимущества не исключают возможности использования негативных фоторезистов, обладающих большей кислотоустойчивостью и простотой проявления. Основные этапы процесса контактной печати приведены на рис. 17.12.

Подготовка поверхности подложки (рис. 17.12, *а*) существенно влияет на адгезию фоторезиста. Последний следует наносить сразу же после окисления пластины без каких-либо дополнительных обработок поверхности. Если подложки хранятся более часа, то производится термообработка в сухом кислороде или азоте при $t=1000°C$ в течение нескольких минут. Она позволяет устранить гидрофильность поверхности подложки.

Нанесение фоторезиста производят центрифугированием (рис. 17.12, *б*). Оптимальная толщина слоя фоторезиста на-

ходится в пределах 0,3 ... 0,8 мкм. При толщине слоя менее 0,2 мкм вероятность появления проколов резко увеличивается, а при толщинах более 1 мкм снижается разрешающая способность процесса, что не дает возможности получать элементы с малыми размерами.

При нанесении фоторезиста необходимо обеспечить однородность слоя (отсутствие пор, инородных частиц и др.) и равномерность его по толщине. Однородность слоя зависит от чистоты исходного фоторезиста, чистоты окружающей среды, режимов и способа сушки. Равномерность толщины слоя зависит от вязкости фоторезиста и режимов его нанесения. Неравномерность слоя по толщине является причиной ухудшения контрастности вследствие неполного прилегания фотошаблона к фотослою при экспонировании.

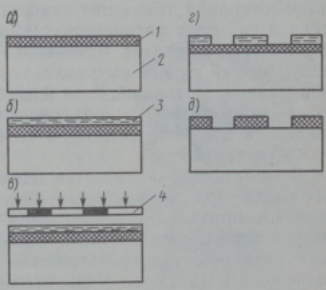


Рис. 17.12. Последовательность процесса фотолитографии:
1 — пленка SiO_2; *2* — пластина кремния; *3* — слой фоторезиста; *4* — фотошаблон

Удаление растворителя из слоя фоторезиста для образования прочной и однородной пленки осуществляется сушкой при $t=18 \ldots 20$ °С в течение 15 ... 30 мин, а затем при $t=90 \ldots 100$ °С в течение 30 мин.

Перенос изображения с фотошаблона на пластину, покрытую слоем фоторезиста, реализуется путем экспонирования (рис. 17.12, *в*). Если процесс фотолитографии повторяется, то необходимо ранее полученный рисунок совместить с рисунком на фотошаблоне. Точность совмещения составляет 0,25 ... 0,5 мкм. В качестве источника света используют ксеоновые и ртутно-кварцевые лампы.

На качество переноса существенно влияют дифракционные явления, возникающие при наличии зазоров между шаблоном и пластиной. Зазоры возникают вследствие неплоскостности подложки, достигающей 20 мкм. Качество переноса изображения с фотошаблона на слой фоторезиста может быть оценено только после проявления.

Проявление скрытого изображения (рис. 17.12, *г*) в негативном фоторезисте заключается в удалении участков, находившихся под темными местами фотошаблона. В случае позитивного фоторезиста удаляются облученные участки. Негативные фоторезисты проявляют в органических растворителях (трихлорэтилене и др.), а позитивные — в щелочных растворах.

Для улучшения защитных свойств полученный слой сушат при $t=100...120°C$, а затем задубливают при $t=200...250°C$ в течение 30...40 мин. Требуемый рисунок схемы получают травлением не защищенных фоторезистом участков подложки в смеси азотной и плавиковой кислоты (рис. 17.12, *д*).

Травление должно обеспечивать полное вытравливание оксидных пленок. При этом встречаются случаи, когда надо одновременно вытравливать оксидные пленки различной толщины. Точность операций травления зависит от точности изготовления негатива и качества фоторезиста. В случае плохой адгезии слоя с поверхностью заготовки плавиковая кислота может проникать под задубленный слой и вытравливать защищенные им участки оксидной пленки. Оставшийся на поверхности слой фоторезиста удаляют в растворителе, в качестве которых применяют органические жидкости и серную кислоту. После набухания пленки фоторезиста удаляют тампоном.

Фотолитография является одним из основных технологических процессов при производстве полупроводниковых микросхем. Ее широкое применение объясняется высокой воспроизводимостью и разрешающей способностью, позволяющей получить рисунок малых размеров, универсальностью и гибкостью метода, высокой производительностью. Недостатком контактной фотолитографии являются быстрый износ фотошаблона и возникновение дефектов на соприкасающихся поверхностях. При контактировании фотошаблон вдавливает в фоторезистивный слой любые частицы (например, пылинки), которые приводят к дефектам в защитном слое фоторезиста.

Пылинка на поверхности фоторезиста может воспрепятствовать его задублению и привести к образованию отверстия («прокола») в оксиде. Такой же эффект может дать пылинка или какие-нибудь темные точки на прозрачной части фотошаблона. Отверстие в затемненной части фотошаблона может привести к неполному удалению оксидной пленки. Размеры частичек пыли соизмеримы с размерами областей контактных элементов. Их наличие приводит к браку микросхемы.

Вероятность появления дефектов, возникающих вследствие попадания на поверхность кремния нерастворимых частиц пыли и других точечных загрязнений, пропорциональна площади пластины. Наличие таких дефектов ограничивает максимальную величину площади микросхем.

Бесконтактная (проекционная) фотолитография устраняет контакт между фотошаблоном и слоем фоторезиста, что позволяет избежать целого ряда недостатков, присущих контактной фотолитографии.

Метод проекционной печати (рис. 17.13) заключается в проецировании изображения с фотошаблона на покрытую слоем фоторезиста пластину, размещенных на значительном расстоя-

ний друг от друга. Размеры рисунка на фотошаблоне могут быть выполнены в увеличенном масштабе. При этом методе повышаются требования к плоскостности подложек и однородности толщины слоя фоторезиста. Высокие требования предъявляются к объективу, который должен обеспечить нужное разрешение на всем рабочем поле подложки. В настоящее время наилучшее разрешение (0,4 мкм) может быть получено на площади 2×2 мм. Трудности создания объективов, обеспечивающих высокое разрешение на большой площади, препятствуют широкому внедрению метода проекционной фотолитографии.

Фотолитография на микрозазоре сочетает достоинства контактного и проекционного методов фотолитографии. При этом методе между пластиной и фотошаблоном устанавливается зазор в 10... 20 мкм. Такой зазор является достаточно большим, чтобы свести к минимуму явление дифракции, и в то же время достаточно малым, чтобы пренебречь нелинейными искажениями в зазоре при передаче изображения. Промышленное оборудование для экспонирования на микрозазоре значительно сложнее, чем установки для контактного экспонирования.

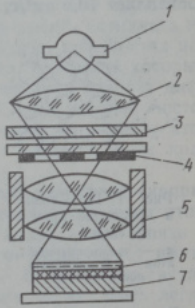


Рис. 17.13. Схема проекционного экспанирования:
1 — источник света; *2* — конденсор; *3* — светофильтр; *4* — фотошаблон; *5* — проекционный объектив; *6* — фоторезист; *7* — пластина полупроводника

Диффузия. Это процесс переноса легирующих примесей из областей с большей концентрацией в области с меньшей концентрацией. Если в твердом теле имеется *градиент концентрации атомов* какого-либо элемента, то создается направленное диффузионное движение, стремящееся выравнить концентрацию этих атомов во всем объеме. Процессы выравнивания концентрации происходят при достаточно высоких температурах, когда резко увеличиваются скорости движения частиц. Они характеризуются *коэффициентом диффузии D*, который определяется массой вещества, проникающего через единичную площадку за единицу времени при градиенте концентрации, равном единице. Коэффициент диффузии (см²/с)

$$D = D_0 e^{-\Delta H/(RT)}, \qquad (17.3)$$

где D_0 — постоянный коэффициент, зависящий от свойств материала, в котором происходит диффузия, и от диффундирующего вещества (численно равен коэффициенту диффузии при бесконечно большой температуре), см²/с; ΔH — энергия активации диффузии, кал/моль; R — универсальная газовая постоянная, равная 1,99 кал (град/моль); T — температура, К.

Коэффициент диффузии для определенного материала и диффундирующей примеси в первом приближении зависит только от температуры (экспоненциальная зависимость).

Коэффициент диффузии элементов III группы (B, Al, In) в кремний на 1 ... 1,5 порядка выше, чем элементов V группы (As; P; Sb). Например, коэффициент диффузии бора в кремний при $t=1473$ K составляет 10,5 см²/с, мышьяка — 0,3 см²/с.

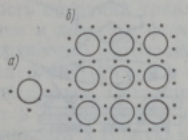


Рис. 17.14. Связи в кристалле кремния:
а — изолированный атом; *б* — совокупность атомов

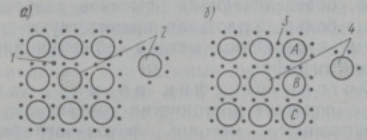


Рис. 17.15. Распределение электронов при введении примеси:
а — примеси V группы (доноры); *б* — примеси III группы (акцепторы); *1* — электрон проводимости; *2* — изолированный донор; *3* — вакансия (дырка); *4* — изолированный акцептор

Если концентрация вещества изменяется лишь в одном направлении, то поток в данном месте пропорционален градиенту распределения концентрации вещества в этом же месте, что выражается уравнением, называемым *первым законом Фика:*

$$F(x,\ t)=-D\,[\partial N(x,\ t)/\partial x], \qquad (17.4)$$

где $F(x,\ t)$ — поток диффундирующего вещества в точке с координатой x в момент времени t; $\partial N(x,\ t)/\partial x$ — градиент распределения концентрации вещества (примесей) в той же точке и в тот же момент времени.

Знак «—» в (17.4) показывает, что диффузия происходит в направлении убывания концентрации примесей.

Второй закон Фика выводится из уравнения (17.4) и показывает распределение концентрации растворимой примеси в диффузионном слое во времени:

$$\partial N(x,\ t)/dt=D\,[\partial^2 N(x,\ t)/\partial x^2]. \qquad (17.5)$$

Уравнение (17.5) получено при условии, что коэффициент диффузии не зависит от концентрации примесей. Это справедливо для большинства практических случаев диффузии примесей в полупроводники. При заданном (постоянном) коэффициенте диффузии уравнение (17.5) описывает характер распределения диффундирующих частиц в различных точках среды как функцию времени. Оно может быть использовано для расчета распределения концентрации примесей и называется уравнением диффузии.

Путем диффузии легирующих примесей в кремний можно в значительных пределах изменять его удельную проводимость и, что особенно важно, получать проводимость различного типа.

Изолированный атом кремния содержит четыре валентных электрона (рис. 17.14, *а*) и может образовывать связи с четырьмя соседними атомами (рис. 17.14, *б*).

В кристаллах с идеальными связями все валентные электроны находятся в устойчивых связях и электропроводность возникать не может. Правильная структура атомов в реальных кристаллах нарушается из-за появления различных дефектов, плотность которых может составлять 1% и более. Особый интерес представляет диффузия замещения (диффузия по вакансиям), при которой посторонний атом с другим числом валентных электронов, чем у атомов кристалла, замещает в кристаллической решетке атом кристалла.

Если атом V группы периодической системы элементов (например, P, As, Sb) с пятью валентными электронами замещает атом кремния, то четыре электрона вступают в ковалентную связь с основными элементами. Оставшийся пятый электрон будет иметь сравнительно малую энергию ионизации, т. е. будет слабо связан с атомом V группы (рис. 17.15, *а*). Такой атом может быть легко отщеплен и начинает свободно двигаться между узлами решетки, создавая проводимость *N*-типа. Примеси, отдающие свободный электрон проводнику, называют *донорными*.

Если атом III группы периодической системы элементов (B; Al; In) замещает атом кристалла IV группы (Si), то в этом случае требуется дополнительный электрон. Пусть у атома *A* отсутствует один электрон и приложено электрическое поле (рис. 17.15, *б*). Валентный электрон соседнего атома *B* может переместиться к атому *A* и компенсировать недостающий электрон. Аналогично, валентный электрон может переместиться от атома *C* к атому *B*. Конечным результатом этого процесса будет прохождение валентного электрона от атома *C* к атому *A* и движение дырки в противоположном направлении. В физике твердого тела отсутствие валентного электрона трактуется как дырка, которая рассматривается как положительно заряженная частица, создающая проводимость *P*-типа. Примеси, обусловливающие дырочную проводимость, называют *акцепторами*.

Процесс диффузии осуществляется в два этапа. На первом этапе из бесконечного источника (газовая фаза) на кристалле создается слой, насыщенный примесью. Этот этап называется загонкой примеси. Он проводится в присутствии кислорода, что способствует образованию на поверхности слоя боросиликатного стекла (для примеси B_2O_3) или фосфорно-силикатного стекла (для примеси P_2O_5). Параметрами процесса загонки являются концентрация диффузанта и кислорода в газе-носителе, скорость газовой смеси и время процесса. На втором этапе примесь под-

вергается перераспределению. Этот этап называется разгонкой примеси. Она выполняется при $t = 800...1000$ °С в отсутствие внешнего источника примеси. Рабочей атмосферой служит смесь инертного газа с кислородом. Разгонка примеси в глубь пластины сопровождается выращиванием защитной пленки оксида кремния.

Диффузию проводят в диапазоне температур 1100...1300 °С, а с учетом процесса загонки при двухстадийном процессе — 1000...1300°. Ниже 1000 °С значения коэффициентов диффузии очень малы и глубина диффузии незначительна. Выше 1300 °С происходят нарушения поверхности пластин под действием высокой температуры.

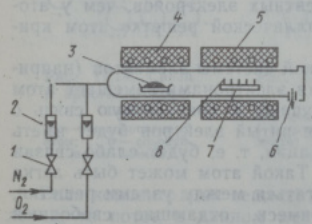


Рис. 17.16. Диффузия в потоке газа-носителя из твердого источника:
1 — кран; *2* — ротаметр; *3* — твердый источник; *4* — зона нагрева примеси; *5* — зона диффузии; *6* — вытяжка; *7* — подставка; *8* — пластины кремния

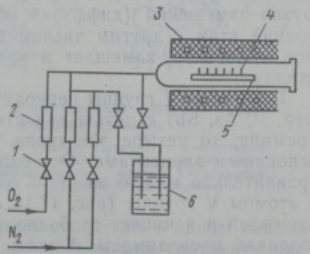


Рис. 17.17. Диффузия в потоке газа-носителя из жидкого носителя:
1 — кран; *2* — ротаметр; *3* — однозонная печь; *4* — пластина кремния; *5* — подставка; *6* — жидкий источник

В качестве источников примеси применяют твердые, жидкие и газообразные соединения. Наиболее часто используют бор и фосфор в виде химических соединений B_2O_5, P_2O_5 и др.

Диффузия в потоке газа-носителя из твердого источника выполняется в двухзонных установках (рис. 17.16). Источник примесей помещают в низкотемпературной зоне, а кремниевые пластины — в высокотемпературной зоне (1100... 1200 °С). Трубу продувают смесью инертного газа с кислородом и после установления температурного режима пластины помещают в рабочую зону. Испаряющиеся молекулы примеси переносятся газом-носителем к пластинам и через слой жидкого стекла попадают на их поверхности. Жидкое стекло защищает поверхности пластин от испарения и попадания посторонних частиц. Недостатки процесса диффузии из твердого источника — сложность установки и трудность регулирования давления паров.

Диффузия в потоке газа-носителя из жидкого источника проводится на более простой установке (рис. 17.17),

где возможно получить более широкий интервал значений поверхностных концентраций. Недостаток такого процесса — большая токсичность концентраций.

Диффузия в замкнутом объеме. Такая диффузия обеспечивает хорошую воспроизводимость параметров диффузионных слоев. В этом случае пластину кремния и источник примесей помещают в кварцевую ампулу, которую откачивают до давления 10^{-3} Па или заполняют инертным газом. Затем ампулу запаивают и помещают в нагревательную печь. Молекулы пара примеси адсорбируются поверхностями полупроводниковой пластины и диффундируют в глубь ее. Такой метод применяют для диффузии бора, сурьмы, мышьяка, фосфора. Эти примеси являются высокотоксичными, а диффузия в ампуле исключает возможность отравления.

Достоинством метода является возможность применения одной печи для диффузии нескольких примесей без взаимного их загрязнения, недостатком—низкая производительность и необходимость тщательного ведения процесса загрузки, так как любое вещество, попавшее в ампулу, диффундирует вместе с основной примесью.

При всех способах диффузии необходимо обеспечить равномерное распределение температуры вдоль оси горячей зоны. Если допуск на глубину диффузионного слоя равен 100%, то достаточно температуру выдерживать с точностью ± 5°С. При допуске 20% температуру необходимо выдерживать с точностью $\pm 0{,}5$°С.

Глубина диффузии изменяется от нескольких микрометров (для элементов схемы) до 10 ... 100 мкм для их изоляции. Большая глубина диффузии требует значительного времени (до 60 ч).

Примеси, диффундирующие в кремний через отверстие в оксиде, распространяются в боковых направлениях почти на такую же величину, как и в глубину.

Наиболее распространенными дефектами при диффузии являются отклонения в глубине диффузионного слоя. Причины таких отклонений — пыль и другие частицы, находящиеся на поверхности пластины, а также остатки фоторезиста. Дефекты поверхности и нарушения в кристаллической решетке способствуют более глубокому проникновению диффузанта в материал. Для уменьшения количества таких дефектов необходимо весьма тщательно соблюдать чистоту окружающей среды, материалов и оборудования на подготовительных операциях и в процессе проведения диффузии.

Получение *P-N*-переходов методами диффузии позволяет в точных пределах контролировать глубину залегания и расположение перехода, концентрацию примесей и др. Недостаток процесса диффузии — невозможность получения четких переходов между областями с различными типами проводимости.

Контроль процесса диффузии. Контроль осуществляется путем измерения поверхностного удельного сопротивления и глубины залегания перехода. Удельное сопротивление измеряют с помощью четырехточечного зонда. Через два внешних зонда пропускают ток от 1 до 0,5 мА, а между двумя внутренними зондами измеряют разность потенциалов. Глубину перехода можно определить методом косого среза ($\alpha = 1...5°$) или шарового шлифа (рис. 17.18). Шлифы окрашивают в специальных растворах, обеспечивающих избирательное осаждение из раствора на область P-

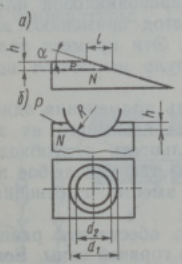


Рис. 17.18. Определение глубины P-N-перехода методами косого среза (*а*) и шарового шлифа (*б*)

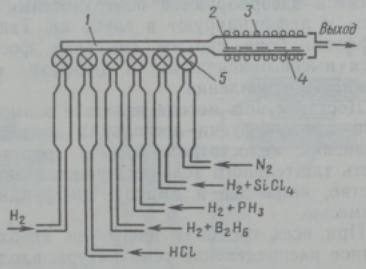


Рис. 17.19. Установка для выращивания кремния хлоридным способом:

1 — кварцевая трубка; *2* — пластина кремния; *3* — высокочастотный нагрев; *4* — графит; *5* — кран

или N-типа за счет различия электродных потенциалов. Окрашенные шлифы позволяют измерить под микроскопом величину l, существенно бо́льшую, чем глубина перехода h, которую рассчитывают по формулам $h = l \operatorname{tg} \alpha$ для косого среза и $h \approx d_1^2 - d_2^2/(8R)$ для шарового шлифа.

Распределение концентрации примеси определяют методом дифференциальной электропроводности, т. е. измерением электропроводности после удаления небольшой части слоя.

Эпитаксия. Это процесс наращивания слоев с упорядоченной кристаллической структурой путем реализации ориентирующего действия подложки. В производстве интегральных схем применяют два вида эпитаксии: гомоэпитаксию и гетероэпитаксию.

Гомоэпитаксия (автоэпитаксия) — процесс ориентированного наращивания кристаллического вещества, не отличающегося по химическому составу от вещества подложки. *Гетероэпитаксия* — процесс ориентированного наращивания вещества, отличающегося по химическому составу от материала подложки.

В процессе выращивания эпитаксиальной пленки в нее можно вводить легирующие примеси, создавая полупроводниковые плен-

ки с нужным распределением концентрации и заданным типом проводимости. Благодаря этому удается получить четкие границы между областями с различным типом проводимости.

Наибольшее распространение в настоящее время получил так называемый *хлоридный способ* получения эпитаксиальных слоев кремния, основанный на восстановлении тетрахлорида кремния. Процесс производится в реакторе, представляющем кварцевую трубу, помещенную в индуктор ВЧ-генератора. Реакторы могут быть горизонтального и вертикального типа.

В *горизонтальном реакторе* (рис. 17.19) кремниевые пластины размещают на графитовых подставках. Обогрев осуществляется высокочастотным генератором. Перед началом процесса систему заполняют азотом или гелием для удаления воздуха и продувают чистым водородом, который при температуре 1200 °С вступает в реакцию с остатками оксидных пленок на поверхности подложек и почти полностью удаляет их. Затем камеру заполняют смесью HCl и H_2 для стравливания с пластины кремния слоя толщиной в несколько микрометров. С помощью операции газового травления удаляются нарушенный слой и остатки SiO_2. Эпитаксиальные пленки получаются без структурных дефектов. После очистки систему в течение нескольких минут продувают водородом, затем подают $SiCl_4$ и легирующую примесь. В результате реакции

$$SiCl_{4(газ)} + 2H_{2(газ)} \rightleftarrows Si_{(твердое)}\downarrow + 4HCl_{газ}\uparrow$$

тетрахлорид кремния разлагается и на кремниевую подложку осаждается кремний, который принимает структуру лежащего под ним слоя. После окончания процесса подложку охлаждают потоком чистого водорода.

Определенные соотношения водорода, хлорида кремния и примесей достигаются путем регулирования скорости подачи и температуры. Обычный расход газа-носителя (водорода) составляет 10 л/мин, а соотношение между количеством H_2 и $SiCl_4$ составляет 1000 : 1. В эту смесь вводится газообразный диффузант в количестве примерно 300 ч. на 1 000 000 ч. газовой смеси.

В качестве донорной примеси применяют фосфин (PH_3), а для получения слоя *p*-типа — диборан (B_2H_6).

Скорость роста эпитаксиальной пленки зависит от расхода $SiCl_4$ и H_2, температуры подложки, количества вводимой примеси и др. Эти переменные, которые можно контролировать достаточно точно, определяют продолжительность процесса.

Наименьшая толщина эпитаксиальной пленки определяется наличием центров кристаллизации. Верхний предел толщины пленки, свободный от дефектов, равен 250 мкм. Наиболее часто толщина эпитаксиальной пленки составляет от 1 до 25 мкм.

Большое влияние на качество эпитаксиального слоя оказывает чистота поверхности подложки и используемых газов. В качестве подложки используют пластины кремния толщиной 150...200 мкм,

свободные от структурных дефектов и ориентированные в плоскости (111). Допускаемое содержание примесей в газах равно нескольким частям примеси на миллион частей газа.

Контроль полупроводниковых пластин осуществляют после финишного полирования, эпитаксии, оксидирования и диффузии. Он основан на визуальном наблюдении и анализе изображения контролируемой пластины, сформированного на экране отраженным от поверхности пластины гомоцентрическим пучком видимого света.

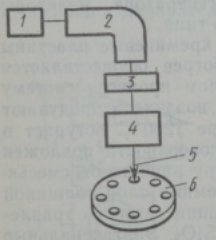


Рис. 17.20. Схема установки для ионного легирования:

1 — источник ионов; *2* — масс-анализатор; *3* — ускоритель; *4* — фокусирующее устройство; *5* — пучок ионов; *6* — легируемый материал

Участки пластины с нарушенной структурой вносят возмущения в пучок света, благодаря чему дефекты пластины видны на экране как изменения интенсивности света в изображении пластины, позволяющие оценить ее качество.

Установки с горизонтальным реактором просты по конструкции, но отличаются высоким расходом рабочих газов и большим разбросом по удельному сопротивлению и толщине осаждаемых пленок.

Более высокую производительность и меньший разброс пленок по толщине обеспечивают установки с вертикальным реактором.

В настоящее время ведутся работы по развитию не только рассмотренного хлоридного метода, но и разработке других методов. Последние имеют своей целью снижение температуры, при которой ведется процесс, и расширение возможностей управления концентрацией примесей, а также обеспечение структурного совершенства выращиваемых пленок.

К таким процессам относятся молекулярно-лучевая эпитаксия из молекулярных пучков в вакууме, жидкофазная эпитаксия путем кристаллизации из расплава и др.

Ионное легирование (имплантация). Это процесс введения атомов примеси в поверхностный слой подложки путем бомбардировки ее ионами (рис. 17.20).

Ионы легирующего элемента образуются в плазме дугового разряда, создаваемого в газоразрядной камере установки, куда поступают пары рабочего вещества, содержащего легирующий элемент. Рабочее вещество при этом находится в тигле, нагреваемом с помощью обычных элементов сопротивления.

С помощью оптической системы ионы вытягиваются из плазмы дугового разряда и попадают в анализатор масс для отбора нужных ионов от присутствующих в источнике многочисленных примесей. В области электромагнитного анализатора ионы движутся по круговым траекториям, радиусы которых для ионов разной

массы будут различными. С помощью щелевой диафрагмы выделяются ионы легирующего элемента. Полученный поток выделенных ионов попадает в ускоритель, фокусируется и с высокой скоростью бомбардирует поверхность легируемого материала. Глубина переходов в полупроводнике зависит от энергии бомбардирующих частиц.

Атомы примеси, внедрившиеся в кристаллическую решетку, могут находиться как в узлах, так и между узлами решетки. Переход атомов примеси из состояния внедрения в состояние замещения возможен при повышенных температурах, поэтому после процесса внедрения атомов проводится отжиг подложек при $t = 400...700$ °С. Внедренные и смещенные атомы при этих температурах приобретают подвижность, достаточную для перехода в вакантные узлы и упорядочения нарушенной структуры.

Концентрацию и глубину проникновения ионов легирующей примеси можно изменить управляя интенсивностью потока ионов, энергией ионов и временем облучения. При ионном легировании монокристаллических мишеней весьма существенную роль играет кристаллографическая ориентировка мишени относительно пучка ионов.

Ионное введение примесей в полупроводниковый кристалл имеет ряд преимуществ по сравнению с диффузией: быстрое протекание процесса, простота управления концентрацией примесей, низкая температура процесса (100 °С), малая боковая дисперсия примесей в кристалле и др. Ионному легированию можно подвергать любые материалы. Метод обладает высокой производительностью и легко поддается автоматизации. Глубина имплантированного слоя составляет 0,1...0,4 мкм. Для устранения дефектов, образованных при имплантации, используют лазерное облучение в импульсном или непрерывном режимах. При *импульсном режиме* узкая поверхность подложки расплавляется и рекристаллизуется, образуя высококачественный монокристаллический слой; при *непрерывном режиме* лазерный луч сканирует всю поверхность подложки.

Недостатками метода ионной имплантации являются малая глубина залегания *P-N*-переходов, высокие требования, предъявляемые к качеству исходной поверхности, сложность и высокая стоимость оборудования, необходимость соблюдения специальных мер по технике безопасности, связанных с применением высоких напряжений, химически активных веществ и возможности возникновения проникающих излучений.

Новыми перспективными направлениями в технологии ионной имплантации являются метод *легирования ионами высокой энергии*, что позволяет увеличить глубину залегания *P-N*-переходов, и *безмасочный метод введения примеси*. Последний осуществляют путем сканирования пластины сфокусированным ионным пучком диаметром 0,05...0,10 мкм, пе-

ремещением которого управляет ЭВМ по заданной программе, что дает возможность получить нужную конфигурацию рисунка схемы.

При всех методах ионного легирования важной операцией является контроль полученных структур. Профиль распределения внедренных ионов по глубине легированного слоя определяют методом масс-спектроскопии вторичных ионов. Состав и содержание примесей в приповерхностном слое проверяют методом спектроскопии Оже [1]-электронов и др.

17.4. Вспомогательные технологические процессы

Вспомогательные процессы связаны с дополнительной очисткой воды, газа, графита и кварца. Они выполняются непосредственно на заводах, выпускающих интегральные схемы, так как транспортировка газа, графита и других материалов и взаимодействие с окружающей средой приводят к дополнительным загрязнениям.

Вода. В исходной воде содержатся ионы различных металлов и кислотных остатков. Воду, освобожденную от ионов, называют *деионизованной,* а процесс удаления ионов и кислотных остатков — *деионизацией.* Для очистки воды применяют ионообменные смолы. Вода при этом проходит ряд колонок: в первой колонке очищается от углекислоты путем продувки воздухом, затем попадает в колонки, заполненные смолами, поглощающими положительные (K^+ — катионы) и отрицательные (A^- — анионы) ионы. Степень деионизации воды оценивают по ее удельному электрическому сопротивлению ρ при $t = 20\,^{\circ}C$.

Наиболее высокой степенью чистоты обладает вода марки А ($\rho \geqslant 18$ МОм/см). Ее получают путем дополнительной очистки воды марки Б ($\rho \geqslant 10$ МОм/см), а воду марки Б — путем финишной очисткой воды марки В ($\rho \geqslant 1$ МОм/см). Деионизацией нельзя очистить воду от кремниевых кислот и некоторых других загрязнений, для удаления которых воду фильтруют через мембранные фильтры, работающие по принципу осмоса. Явление осмоса заключается в медленном проникновении (диффузии) растворителя через тонкую мембрану толщиной ~100 мкм, состоящую из активной части (~0,2 мкм), где происходят осматические явления, и пористой основы. При пропускании через такие мембраны воды под давлением до 10^5 Па ее молекулы диффундируют через поры, а молекулы примесей задерживаются. Степень очистки составляет 98%, однако производительность этого метода мала и составляет всего 1 л/сут., с 1 м² поверхности мембраны. Прибор для

[1] Метод получил свое название по имени французского физика Пьера Оже, который в 1925 г. обнаружил эффект испускания вторичных электронов при возбуждении внутренних оболочек атомов пучком ускоренных электронов.

измерения сопротивления воды представляет собой стеклянную трубку с двумя платиновыми электродами. Измерения производят на переменном токе промышленной частоты. Удельное сопротивление

$$\rho = R/K, \qquad (17.6)$$

где R — измеренное сопротивление; K — постоянная датчика.

Постоянная датчика зависит от геометрических размеров электродов и стеклянной трубы. Для ее определения пользуются жидкостью, удельное сопротивление которой известно. Измеряя общее сопротивление R и зная ρ для данной жидкости, находят значение постоянной K.

Газы. Они предназначены для создания различных сред: защитных (аргон, гелий), восстановительных (водород), окислительных (кислород).

Основные примеси в газах — кислород и пары воды. Весьма эффективной является очистка водорода от кислорода в активированном угле. Высокое качество очистки дают палладиевые мембраны. Водород способен диффундировать через нагретую палладиевую мембрану, а другие газы задерживаются этой мембраной. Очистка инертных газов (аргона, гелия) осуществляется в парах магния. При пропускании через них газа примеси кислорода соединяются с магнием. Специальные мероприятия требуются для сохранения чистоты газа при передаче его по трубопроводу к месту потребления. Для контроля наличия кислорода в газе используют термохимический метод. При этом газ непрерывно течет через капсулу, помещенную в термостат ($t = 300...400\,^{\circ}C$). В случае наличия в газе кислорода происходит реакция с выделением теплоты, которая будет нагревать газ и температура его на выходе будет больше, чем на входе.

Графит. Его применяют для изготовления кассет, подложек, тиглей, различных подставок. Обычно графит подвергают механической обработке, при которой неизбежны его загрязнения. Обезгаживание графита проводится в два этапа. На первом этапе осуществляется обжиг графита при $t = 1000\,^{\circ}C$ в течение 1 ч. Эта операция облегчает удаление газов при последующей обработке. Вторым этапом является отжиг в вакууме при $t = 1700\,^{\circ}C$ и остаточном давлении 10^{-2} Па. При такой температуре полностью удаляются все газы, кроме азота. Последний для большинства операций не представляет опасности. Если требуется удалить азот, то температуру повышают до $2100\,^{\circ}C$.

Кварц. Его используют в эпитаксиальном процессе, при диффузии, а также для изготовления различных лодочек и тиглей. Особенно нежелательно присутствие в кварце меди, которая имеет довольно высокий коэффициент диффузии в кремний.

Очистка кварца заключается в химической обработке царской водкой в течение 1 ч. После промывки кварц нагревают до 1100...

1500 °С в потоке хлора. При этом примеси, находящиеся в кварце, образуют в данной среде газообразные хлориды, которые удаляются потоком протекающего газа.

17.5. Основные этапы технологического процесса изготовления полупроводниковых микросхем

Основной особенностью технологического процесса изготовления полупроводниковых интегральных микросхем является применение аналогичных операций, повторяющихся в определенной последовательности, и возможность одновременного изготовления большого количества микросхем на одной подложке. За один процесс диффузии можно обработать 50...200 пластин. Если на одной пластине размещается 250 микросхем, то за один цикл можно получить 50 000 микросхем.

Для изготовления полупроводниковой интегральной микросхемы необходим комплект из 5...8 фотошаблонов и более (до 25). На каждом фотошаблоне имеется система большого числа идентичных изображений, выполненных в натуральном масштабе. Изображения обычно имеют размеры от 0,5×0,5 до 2,5×2,5 мм.

В качестве материала для изготовления шаблона применяют стекло, на одну поверхность которого нанесен слой фотоэмульсии. Этот слой является непрочным и допускает 25...50 совмещений. Поэтому при серийном изготовлении полупроводниковых интегральных микросхем необходимо иметь достаточно производительную технологию производства шаблонов.

Изготовление фотошаблона начинают с вычерчивания оригинала, представляющего собой увеличенное в 200...1000 раз рабочее изображение схемы.

Простейший способ выполнения оригинала — вычерчивание тушью на специальной бумаге. Она в сыром виде приклеивается на толстое гладкое зеркальное стекло. После высыхания бумага сильно натягивается и прочно держится на стекле. Недостаток такого шаблона состоит в том, что тушь дает недостаточно резкие края, а бумага коробится при нагревании.

Более точные размеры получаются при изготовлении оригинала способом надрезания двухслойной композиции, состоящей из подложки и высококонтрастного слоя. Обычно красное или черное покрытие наносят на стекло. В качестве непрозрачных покрытий (верхний слой) применяют специальные пленки из пластика. Надрезание верхнего слоя можно выполнить с помощью обычного чертежного инструмента или координатографа.

Вырезание вручную обеспечивает точность ±250 мкм. При уменьшении оригинала в 400 раз точность фотошаблона составит ±0,6 мкм. Прецизионные координатографы обеспечивают выполнение оригинала с точностью ±25 мкм. Такая точность особенно необходима при небольшом масштабе увеличения.

На оригинале маркируют дополнительные знаки, позволяющие совместить ряд изображений. Например, для получения коллектора, базы эмиттера и соединений такое совмещение проводится четыре раза.

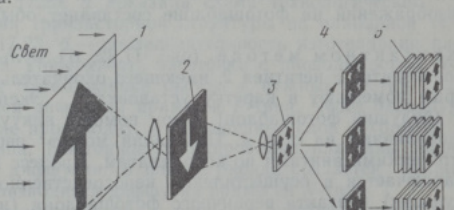


Рис. 17.21. Последовательность изготовления фотошаблона

Оригинал *1* снимают на фотопластинку (рис. 17.21) с высокой разрешающей способностью, а с нее получают промежуточный негатив *2* в масштабе 10 : 1. Оригинал фотошаблона *3* представляет собой позитивное изображение схемы в масштабе 1 : 1. Изображение схемы на оригинале фотошаблона повторяется многократно. Процесс получения на оригинале фотошаблона матрицы изображений называют *фотоумножением* или *мультипликацией*. Рабочий фотошаблон *5* является позитивным изображением схемы, поэтому его получают с промежуточного фотошаблона *4* методом контактной печати.



Рис. 17.22. Схемы проекционного мультиплицирования (*а*) и контактного (*б*)

Процесс мультиплицирования может осуществляться проекционным и контактным методами (рис. 17.22).

При проекционном мультиплицировании (рис. 17.22, *а*) на фотопластинку *7* будущего фотошаблона с помощью источника света *1*, конденсора *2*, светофильтра *3* и объектива *5* проецируют уменьшенное изображение элемента с промежуточного негатива *4*. Фотопластинка *7*, установленная на координатном столе *8*, передвигается автоматически с экспанированием изображения *6* после каждого совмещения. Перемещением координатно-

го столика и процессом экспонирования управляет система *10*, которая получает сигналы от измерительной системы *9*. В качестве источника света применяют ксеноновую лампу с продолжительностью вспышек в несколько микросекунд. Количество однородных изображений на фотошаблоне составляет обычно от 100 до 400.

При контактном методе (рис. 17.22, *б*) мультиплицирование производится с негатива *2*, имеющего окончательные размеры, который помещают в каретку установки *1*. Экспонируемую пластину (будущий фотошаблон) *3* при помощи вакуумного присоса устанавливают на стол *4*. Последний может перемещаться микрометрическими винтами по координатам. Процесс контактной печати заключается в осуществлении непосредственного (эмульсия к эмульсии) контакта первичного фотошаблона (негатива) и чистой пластинки с последующим экспонированием этой пары при помощи источника света *5*. Необходимо соблюдать особую предосторожность для обеспечения высокого уровня чистоты. Попадание пыли между пластинами нарушает контакт и часто приводит к появлению нежелательных отпечатков на фотошаблоне и повреждению эмульсии первичного фотошаблона. В связи с этим процесс контактной печати проводится по возможности в скафандре.

С *эталонного фотошаблона* снимаются рабочие копии, причем после нескольких циклов печати он очищается от загрязнений или заменяется новым. *Рабочие фотошаблоны* получают обычным методом контактной печати. Для получения высокой точности переноса изображений с эталонного на рабочий фотошаблон требуется плотное прилегание их друг к другу. Это осуществляют с помощью вакуумно-копировальной рамки, в которой предусмотрена для этой цели резиновая диафрагма.

При массовом производстве полупроводниковых микросхем целесообразно применять *хромированные фотошаблоны*. В этом случае слой фотоэмульсии наносят на поверхность стеклянной пластины, покрытой хромом. После проявления слой хрома под прозрачными участками вытравливают и удаляют весь слой эмульсии. Долговечность хромированных шаблонов в 10 раз выше эмульсионных. Рисунок на хроме отличается большой четкостью краев.

В настоящее время для изготовления фотошаблонов используют ЭВМ, в которую закладываются координаты элементов схемы, и машина управляет процессом гравировки оригинала на координатографе. Электронная вычислительная машина может использоваться для создания геометрического изображения непосредственно на фотопластинке.

Основными методами изготовления полупроводниковых интегральных микросхем являются планарный и планарно-эпитаксиальный. При планарном методе для создания *P-N*-перехо-

дов применяют диффузию, а при планарно-эпитаксиальном методе процессы диффузии сочетаются с эпитаксиальным наращиванием.

На рис. 17.23, *а* показана схема технологического процесса изготовления транзисторной структуры по планарной технологии, а на рис. 17.23, *б* — последовательность изготовления планарного транзистора. Поверхность заготовки с проводимостью *N*-типа оксидируется. Затем пленка оксида в нужных местах удаляется и производится диффузия примесей *P*-типа. Через оксидную пленку диффузия не происходит, и защищенные слои сохраняют проводимость *N*-типа. Повторное оксидирование пластины производится в процессе диффузии. В пленке оксида создается локальная область и производится диффузия примесей *N*-типа.

Полученная структура в процессе диффузии защищается пленкой оксидов, которая затем удаляется из области контактов.

Для формирования выводов и внутрисхемных соединений на поверхность пластины кремния, покрытую слоем оксида кремния, имеющим в нужных местах окна, напыляется пленка алюминия. Она образует нужные внутрисхемные соединения и контактные площадки для присоединения внешних выводов. После металлизации лишний металл удаляется и получается требуемая форма контактных площадок. Повторным напылением контактные площадки соединяются друг с другом.

Последовательность изготовления планарно-эпитаксиального транзистора со скрытым слоем показана на рис. 17.24.

Первой операцией является оксидирование кремниевой пластины *P*-типа. Пленка оксида в нужных местах удаляется и на поверхности пластины создается контактная маска, которая служит для получения путем диффузии скрытого слоя *N*+-типа (рис. 17.24, *а*). После удаления маски выращивается эпитаксиальный слой *N*-типа толщиной 12...15 мкм. На поверхности этого слоя создается контактная маска и проводится разделительная диффузия на всю глубину эпитаксиального слоя (рис. 17.24, *б*). Оксидные слои для проведения изолирующей диффузии и на последующих операциях получаются путем введения в систему на определенной стадии процесса диффузии кислорода или паров воды. При выполнении базовой диффузии (рис. 17.24, *в*) создаются и другие элементы схемы (например, резисторы). Диффузия для получения эмиттера (рис. 17.24, *г*) проводится при высоких температурах, обеспечивающих получение поверхностной концентрации *N*-типа. Для создания контактов к элементам схемы в слое оксида кремния вытравливаются окна и производится металлизация из низкоомного материала — золота, алюминия (рис. 17.24, *д*).

Технологический процесс изготовления МОП-транзистора (рис. 17.25) значительно проще биполярного. В последнем случае общее число операций составляет около 130 (из них 10 высокотемпературных). Для изготовления МОП-транзистора требуется 38 опе-

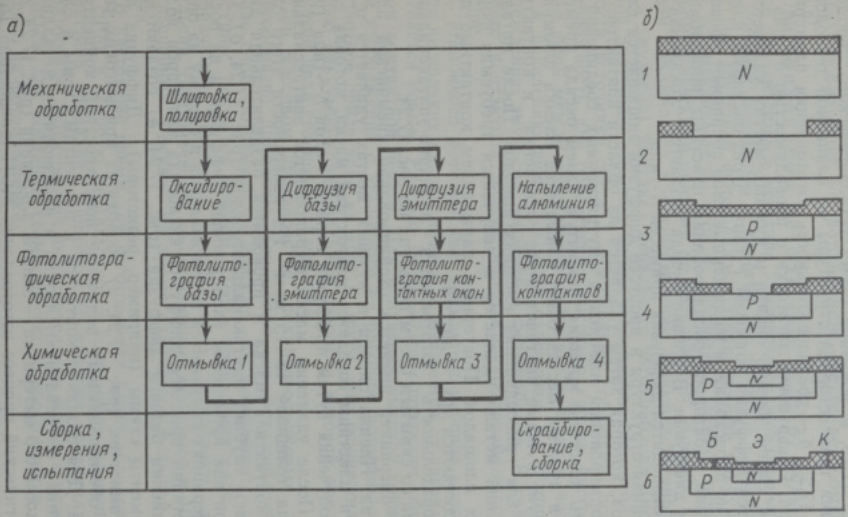


Рис. 17.23. Изготовление планарного транзистора:

а — структурная схема; *б* — основные этапы технологического процесса; *1* — оксидирование, *2*, *4* — фотолитография; *3*, *5* — диффузия и вторичное оксидирование; *6* — фотолитография контактов

раций, из которых только две производятся при высокой температуре. Процент выхода годных МОП-транзисторов значительно выше, так как он зависит от общего числа операций и главным образом от числа операций, выполняемых при высоких температурах.

Наиболее ответственными этапами изготовления МОП-транзистора являются создание диэлектрического слоя под затвором и совмещение затвора с областями истока *И* и стока *С*.

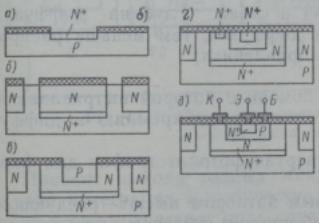


Рис. 17.24. Последовательность изготовления планарно-эпитаксиального транзистора

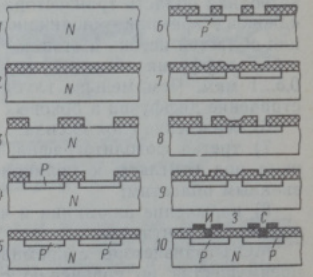


Рис. 17.25. Схема технологического процесса изготовления МОП-транзистора:

1 — полирование; *2, 5, 7* — оксидирование; *3, 6, 8, 10* — травление; *4* — диффузия бора; *9* — напыление алюминия

Наличие в оксиде под затвором *З* положительных и отрицательных зарядов приводит к нестабильности параметров транзисторов вследствие дрейфа зарядов. Для их стабилизации поверхность пластины перед оксидированием обрабатывают в плавиковой кислоте с последующим кипячением в воде. При этом удаляется фтор, который приводит к образованию дополнительного заряда.

Важной проблемой является совмещение затвора с областями истока и стока. Отсутствие перекрытия канала металлом затвора приводит к нарушению работоспособности транзистора, а слишком большое перекрытие (расположение металла затвора над диффузионными областями) — к снижению быстродействия вследствие образования больших емкостей *З—И* и *З—С*. Для точного совмещения используют технологию с самосовмещающимся затвором на основе поликристаллического кремния или молибдена. При этом материал затвора (поликристаллический кремний или молибден) служит маской и тем самым осуществляется процесс самосовмещения. В качестве подзатворного диэлектрика применяют оксид кремния, нитрид кремния и др.

Транзисторы с кремниевым затвором изготовляют в такой последовательности:

1) выращивание маскирующего слоя оксида и первая фотолитография для удаления оксида с участков, на которых будут находиться диффузионные и затворные области;

2) выращивание тонкого (0,1 мкм) оксида под затвор;

3) выращивание сильнолегированного поликристаллического кремния толщиной около 0,5 мкм;

4) вторая фотолитография, в процессе которой формируется затворная область транзистора и образуются окна в двойном слое «диоксид кремния — поликристаллический кремний» для получения областей истока и стока;

5) диффузия областей истоков и стока. Глубина диффузии 0,5...1 мкм. Чем меньше глубина диффузии, тем меньше распространение диффузии в боковых направлениях;

6) осаждение слоя оксида;

7) третья фотолитография, с помощью которой вытравливают окна под контакты к поликристаллическому кремнию и диффузионным областям;

8) напыление алюминия и четвертая фотолитография для формирования контактов.

МОП-транзисторы с кремниевым затвором имеют следующие преимущества по сравнению с обычными: высокое быстродействие, малые размеры, низкое пороговое напряжение.

Рассмотренные технологические процессы характеризуют изготовление не только отдельного транзистора, но и всей полупроводниковой интегральной микросхемы. При этом выполняются остальные элементы схемы и никаких дополнительных операций для их изготовления не требуется.

Разброс параметров элементов микросхемы зависит главным образом от процесса фотолитографии и диффузии. Кроме того, на характеристики транзистора влияют локальные дефекты, вызванные точечными загрязнениями. Весьма опасным является загрязнение поверхности нерастворимыми пылинками, попадающими на поверхность кремниевых пластин во время различных технологических операций, например из газовой среды или жидких веществ, использовавшихся для травления или промывки.

Пылинка, попавшая на поверхность пластины и оставшаяся на ней в период диффузии, может привести к тому, что под ней не образуется соответствующий слой или эмиттер замкнется с базой.

Нерастворимые частицы, оседающие на поверхность при оксидировании, могут вызвать прокол в оксиде.

Проколы — наиболее распространенный и трудноустранимый дефект фотолитографии. На стадии диффузионной обработки под отверстием в оксиде возникают «паразитные» базы. При малом расстоянии между эмиттерной областью и базовым контактом

проколы могут вызвать закорачивание перехода эмиттер — база. Особенно опасны проколы в оксиде на стадии металлизации, так как могут образовываться паразитные базы и закорачивание. Островки оксидов, оставшихся в окнах, также приводят к ухудшению характеристик транзистора.

В процессе производства полупроводниковых интегральных микросхем большое значение имеет качество очистки поверхности. Операции очистки предшествуют всем основным операциям.

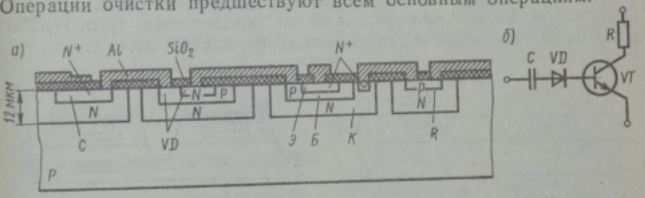


Рис. 17.26. Полупроводниковая интегральная микросхема:
а — структура; *б* — эквивалентная схема

Процент выхода годных микросхем зависит от ее площади, уровня интеграции и количества операций. При увеличении площади резко возрастает роль случайных дефектов и процент выхода годных микросхем y резко падает:

$$y=(1-\alpha A)^n, \qquad (17.7)$$

где A — площадь схемы; α — плотность дефектов на каждой операции; n — количество операций.

Законченные структуры полупроводниковых интегральных микросхем весьма разнообразны. На рис. 17.26 показаны структура простой полупроводниковой интегральной микросхемы, состоящей из транзистора *VT*, диода *VD*, резистора *R*, конденсатора *C*, и ее эквивалентная электрическая схема. Для получения законченных структур элементы схемы соединяют токопроводящими проводниками из алюминия. Все предшествующие операции те же, что и при изготовлении планарно-эпитаксиального транзистора.

Изоляция отдельных элементов, получаемых на общей полупроводниковой пластине, осуществляется *P-N*-переходом, смещенным в обратном направлении. Такой вид изоляции является основным. Он обеспечивает высокий процент выхода годных при низкой стоимости микросхем. Недостатком такого метода изоляции является наличие токов утечки и образования паразитных емкостей, которые являются причиной снижения быстродействия микросхем. Кроме того, изоляционные переходы занимают большой объем и уменьшают плотность компоновки. Эти недостатки устраняет диэлектрическая изоляция, осуществляемая диоксидом кремния, стеклом, керамикой и другими материалами.

Биполярная структура с изоляцией стеклом или керамикой изготовляется в такой последовательности (рис. 17.27).

В эпитаксиальной структуре *1* формируются элементы схемы (рис. 17.27, *а*) и после операций фотолитографии и травления образуются мезаобласти *2* (рис. 17.27, *б*). Для проведения дальнейших операций удаляют фоторезист, SiO_2 и приклеивают вспомогательную пластину *3* (рис. 17.27, *в*) со стороны мезаструктуры, а противоположную сторону удаляют шлифовкой (рис. 17.27, *г*). Полученную структуру опрессовывают диэлектриком (рис. 17.27, *д*) и удаляют вспомогательную пластину (рис. 17.27, *е*).

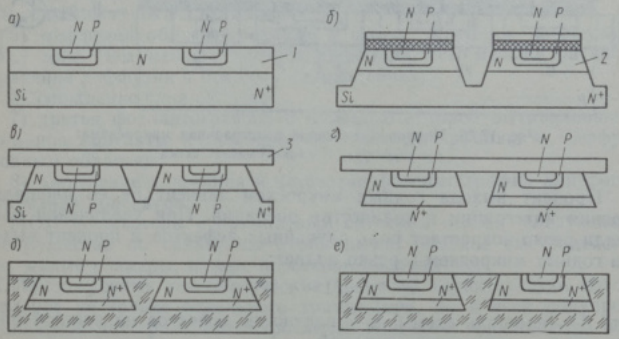


Рис. 17.27. Последовательность изготовления биполярной структуры с диэлектрической изоляцией

В изопланарной технологии используется комбинированная изоляция с применением диэлектрических пленок для боковой изоляции и обратно смещенного *P-N*-перехода для изоляции у основания элементов (рис. 17.28). Исходной является эпитаксиальная структура со скрытым слоем N^+-типа. Процесс начинается с выращивания пленки нитрида кремния Si_3N_4 (рис. 17.28, *а*), в которой вскрывают окна и производят травление эпитаксиального слоя (рис. 17.28, *б*). Затем канавки заращивают диоксидом кремния SiO_2 (рис. 17.28, *в*). При этом пленка нитрида кремния защищает поверхность пластины от оксидирования и образуется только боковой изолирующий слой. После удаления пленки нитрида кремния на поверхности создается пленка диоксида кремния (рис. 17.28, *в*) и в изолированных областях обычными методами формируются нужные элементы (рис. 17.28, *г*).

Основным способом получения пленок нитрида кремния является пиролиз, при котором газообразное соединение разлагается

на компоненты, образующие на горячей поверхности стабильный осадок. Осаждение маски из нитрида кремния происходит при $t=900$ °С на установках эпитаксиального наращивания или в однозонных диффузионных печах, снабженных специальным устройством газораспределения. Реакция пиролитического осаждения при взаимодействии силана и аммиака имеет вид

$$3SiH_4+4NH_3=Si_3N_4+12H_2$$

Изготовление биполярной структуры с изоляцией поликристаллическим кремнием (эпик-процесс) осуществляется в такой последовательности (рис. 17.29, *а—е*).

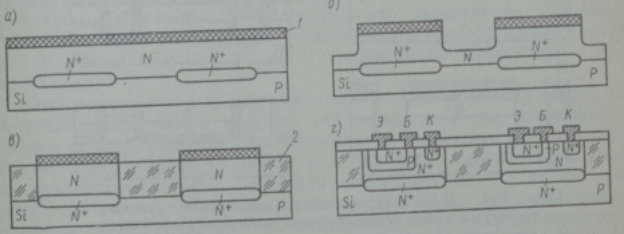


Рис. 17.28. Изготовление биполярной структуры по изопланарной технологии:

1 — пленка нитрида кремния; *2* — диоксид кремния

Исходная пластина кремния оксидируется. Слой диоксида кремния в местах, окружающих изолированные области, удаляется и вытравливаются канавки. Затем снимают слой фоторезиста и оксидируют поверхности канавок. Над слоем диоксида кремния выращивают монокристаллический кремний толщиной ~100 мкм, который заполняет и канавки. Этот процесс выполняют в печах для эпитаксиального выращивания.

Поликристаллический кремний обладает необходимой механической прочностью, стабильностью размеров и таким же коэффициентом теплового расширения, как и монокристаллический кремний. Затем часть монокристаллического кремния удаляют; при этом образуются изолированные области, в которых создаются элементы микросхем. Рассмотренный метод достаточно сложен, но обеспечивает надежную изоляцию. Токи утечки уменьшаются до пренебрежимо малых величин (на 3...4 порядка), а паразитные емкости — в 10 раз. Пробивное напряжение и быстродействие повышаются в 2 раза.

Совмещенная структура полупроводниковой интегральной микросхемы представляет сочетание полупроводниковых элементов с пассивными тонкопленочными. При этом обеспечивается независимость действия тонкопленочных элементов от кремния.

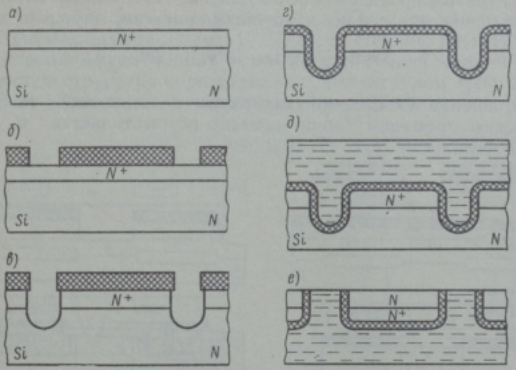


Рис. 17.29. Последовательность изготовления биполярной структуры с изоляцией поликристаллическим кремнием:
а — эпитаксия; *б* — оксидирование и фотолитография; *в* — травление; *г* — удаление лака и осаждение SiO_2; *д* — выравнивание кремния; *е* — шлифование

Такие схемы позволяют свести к минимуму большое число ограничений, накладываемых диффузионными структурами, при сохранении хороших электрических параметров. Однако выход годных схем уменьшается из-за большого количества операций.

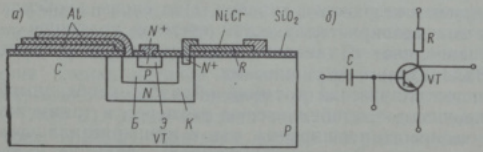


Рис. 17.30. Совмещенная микросхема:
а — структура; *б* — эквивалентная электрическая схема

На рис. 17.30, *а* представлена структура совмещенной схемы с МОП-конденсатором и тонкопленочным резистором, а на рис. 17.30, *б* — ее эквивалентная электрическая схема.

Диффузионные структуры создаются так же, как и в рассмотренном ранее случае (см. рис. 17.23). При осаждении диэлектрика конденсатора толщину слоя SiO_2 надо контролировать с большой точностью, так как тонкий слой уменьшает напряжение пробоя, а его избыточная толщина — величину емкости.

После этого осуществляют процесс травления, который определяет расположение контакта к нижнему электроду конденсатора. Затем на всю поверхность пластины напыляют алюминий и последующим травлением удаляют его с мест расположения резистора. Пленка нихрома напыляется на всю поверхность оксида и алюминия, который вытравливается из нихрома. Такая операция называется *обратным травлением*, так как при стравливании нижнего слоя удаляется и верхний слой. Сохраняется только нихромовый резистор. Для создания контактов на всю поверхность напыляется алюминий и проводится его селективное травление. Алюминий служит верхним электродом конденсаторов, контактом к нихромовым резисторам и соединениями между всеми компонентами.

Полупроводниковые интегральные микросхемы на сапфировой подложке отличаются тем, что все элементы схемы создаются в тонком эпитаксиальном слое кремния, выращенном на подложке. Такие схемы имеют большую радиационную стойкость, высокие быстродействие (время задержки составляет до 0,7 нс на один вентиль), занимают малую площадь (до 30% по сравнению с обычной схемой). Однако технологические трудности, связанные с эпитаксией кремния на сапфир, и высокая стоимость ограничивают область применения таких схем.

Развитие электронной техники во многом определяется применением новых полупроводниковых материалов, среди которых особое место занимает аморфный гидрогенизированный кремний. Использование аморфного кремния для изделий электронной техники определяется простотой их получения, низкой стоимостью и наличием определенных электрофизических свойств.

Аморфные полупроводники изготовляют в виде тонких пленок путем разложения силана в плазме тлеющего разряда с легированием их в процессе роста атомами фосфора или бора. Пленки, получаемые разложением силана, обладают фотоэлектрическими свойствами.

Распространенным методом получения пленок аморфного кремния является высокочастотное ионно-плазменное распыление в атмосфере аргонно-водородной плазмы. Этот метод распыления имеет несколько модификаций, отличающихся способом распыления (магнетронное, на постоянном токе и т. д.).

Менее распространенным является метод химического осаждения из паровой фазы, так как вследствие высокой температуры подложки (870 К) повышается количество дефектов в пленке.

ГЛАВА 18
СБОРКА И ГЕРМЕТИЗАЦИЯ МИКРОСХЕМ

18.1. Разделение полупроводниковой пластины на отдельные кристаллы

Основные операции сборки микросхем — разделение общей подложки на отдельные чипы (кристаллы), монтаж чипа в корпусе, герметизация и контрольные испытания.

Для обеспечения низкой стоимости важно, чтобы на возможно большем числе операций производилась одновременная обработка максимального количества микросхем на единой подложке.

Первой операцией, для которой требуется разделение общей пластины, является монтаж в корпусе.

Для устранения вредного влияния влаги и пыли сборочные операции выполняют в условиях микроклимата с очень низкой влажностью. Такую среду можно получить в специальной камере или скафандре, воздух в котором обеспыливается и осушивается хлористым кальцием. В скафандре можно поддерживать относительную влажность порядка 1%. В него вводят под небольшим давлением очищенный и осушенный газ, что препятствует проникновению наружного воздуха через щели и рабочие отверстия скафандра. Резиновые диафрагмы на передней панели скафандра позволяют оператору работать без значительного нарушения герметичности. Во избежание испарения влаги с рук применяют резиновые перчатки. Для облегчения сборочных операций скафандр снабжают микроскопом. Размеры, форма и конструктивные особенности скафандров зависят от характера выполняемых операций.

Скрайбирование с последующим раскалыванием. Скрайбирование является основным методом разделения полупроводниковых пластин на отдельные чипы. Перед разделением пластины каждую схему проверяют на функционирование при помощи измерительной зондовой головки, которая контактирует с выводными площадками. Неисправные схемы помечают краской и после разделения пластины отбраковывают.

Контроль осуществляют в два этапа. На *первом этапе* измеряют сопротивление проводников, наличие коротких замыканий и обрывов. На *втором этапе* контролируют функционирование микросхемы по специальным тестам с использованием автоматизированных систем контроля (АСК). Пластину при этом устанавливают на вакуумный столик, а контактные площадки кристалла соединяют с блоками АСК с помощью зондовой головки.

Скрайбирование заключается в нанесении на поверхность пластины в двух взаимно перпендикулярных направлениях рисок (царапин). Под ними образуются напряженные области, и при сла-

бом механическом воздействии пластина разламывается на отдельные части вдоль линий скрайбирования. Процесс осуществляется на прецизионной установке алмазным резцом (рис. 18.1, *а*). Пластина *1* вакуумным присосом прижимается к столику *3*. Алмазный резец *2* посредством кривошипно-шатунного механизма *4* совершает возвратно-поступательное движение и наносит на поверхность пластины риски. Столик с закрепленной пластиной автоматически передвигается на требуемую величину. Пластина после нанесения рисок по всей ее площади поворачивается на 90°, и процесс повторяется. Для облегчения скрайбирования в нужных местах удаляют слой диоксида кремния.

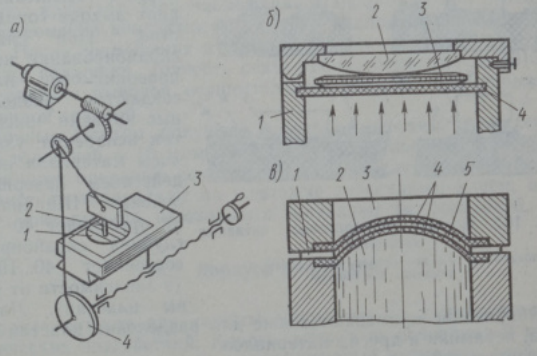


Рис. 18.1. Разделение полупроводниковой пластины на чипы:
а — скрайбирование; *б* — ломка на сферической опоре; *в* — ломка с помощью эластичных мембран

Раскалывание пластин после скрайбирования. Раскалывание пластин осуществляют путем консольного изгиба на сферической опоре, прокаткой пластины между валиками или ломкой с помощью ролика, который перемещают по подложке, расположенной на гибкой опоре.

Основными причинами брака при ломке являются сколы материала подложки на пересечении линий скрайбирования и ветвление трещин.

При изгибе на сферической опоре *2* (рис. 18.1, *б*) пластину *3* укладывают рисками вниз на тонкую резиновую мембрану *4*, края которой закреплены в цилиндрическом корпусе *1*. В корпус подают сжатый воздух, который растягивает мембрану и прижимает пластины к сферической опоре. Полный цикл разламывания плас-

тин составляет 30...40 с. Такой способ обеспечивает качественную ломку пластин диаметром до 60 мм.

На рис. 18.1, *в* показано устройство для ломки пластины с помощью эластичных мембран. Пластину *5* помещают между двумя мембранами *4* и центрируют с помощью гибкого кольца *1*. При подаче в нижнюю полость *2* сжатого воздуха мембраны с зажатой между ними пластиной изгибаются в полость *3*, ломая ее на кристаллы.

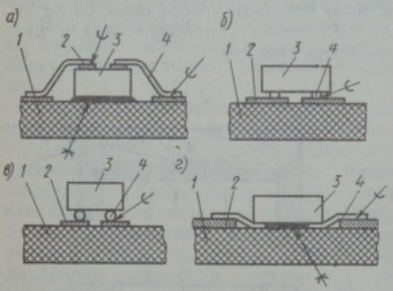


Рис. 18.2. Монтаж бескорпусных активных элементов:
1 — подложка; *2* — контактная площадка; *3* — микросхема; *4* — выводы

Лазерное скрайбирование. Оно обеспечивает высокую производительность и повышенный процент выхода годных пластин. При лазерном скрайбировании на полупроводниковой пластине создаются разделительные канавки (риски) путем испарения узкой полосы материала под воздействием лазерного излучения. Ширина рисок не превышает 40 мкм, а глубина скрайбирования составляет 40...100 мкм (в зависимости от толщины пластин). Лазерное скрайбирование применяют также для разделения пластин из ситалла, керамики и других материалов.

Недостатками лазерного скрайбирования являются сложность и высокая стоимость оборудования, а также загрязнение поверхности обрабатываемой пластины продуктами испарения. Во избежание попадания испарившихся частиц на поверхность пластины применяют пленки фоторезиста или других покрытий, однако при этом необходима дополнительная операция по их удалению.

Наиболее перспективным является метод сквозного разделения пластин на кристаллы одиночным алмазным диском. Этот метод позволяет улучшить качество кристаллов за счет исключения операции ломки пластин.

18.2. Монтаж навесных элементов на подложке

Навесные элементы изготовляют в миниатюрных корпусах или бескорпусном исполнении. Последние имеют малые размеры и широко применяются в микросборках и гибридных интегральных схемах. По форме выводов бескорпусные активные элементы делят на две группы: с проволочными мягкими выводами (рис. 18.2, *а*)

и объемными (жесткими) выводами. К последней группе относятся столбиковые (рис. 18.2, *б*), шариковые (рис. 18.2, *в*) и балочные (рис. 18.2, *г*) выводы.

Элементы с проволочными мягкими выводами. Их крепят на плате эпоксидным клеем с последующей пайкой к контактным площадкам. Наиболее часто используют клеи ВК-9, К-400, компаунды КГ-102 и др.

Элементы с жесткими выводами. Применение бескорпусных элементов с жесткими выводами дает возможность автоматизировать процесс их установки. Совмещение выводов с контактными площадками выполняют методом перевернутого кристалла. Для совмещения применяют полупрозрачную призму, на которую помещают кристалл. При наблюдении в микроскоп при этом видны одновременно контактные площадки подложки и выводы кристалла. После совмещения их призма убирается и кристалл опускается на подложку. Точность совмещения составляет $\pm 0{,}015$ мм. Присоединение выводов осуществляется пайкой или термокомпрессионной сваркой.

Балочные выводы получают электролитическим осаждением золота толщиной ~10 мкм. Они выходят за пределы кристалла, что упрощает операцию совмещения их с контактными площадками. Кристалл закрепляют на подложке эпоксидным клеем, а выводы с контактными площадками соединяют микросваркой.

18.3. Корпуса микросхем

Корпуса служат для защиты микросхем от климатических и механических воздействий. Корпус состоит из основания и крышки. В основании монтируют конструктивные элементы, необходимые для установки микросхемы и проводника, посредством которых интегральная микросхема соединяется с коммутационной платой.

По форме и расположению выводов корпуса делят на шесть типов (табл. 18.1). Каждый тип характеризуется габаритными размерами, числом выводов и расположением их относительно плоскости основания. Подтипы корпуса отличаются порядком расположения выводов, способом их отгибки и др.

Примеры конструктивного выполнения корпусов приведены на рис. 18.3, *а—е*. На крышке корпуса выполняется ключ, указывающий начало отсчета выводов. Позиции выводов обозначаются в возрастающем порядке от первого вывода, который обозначается точкой.

Более высокую плотность компоновки микросхем на печатной плате обеспечивают корпуса прямоугольной формы, которые выполняют со штыревыми (типы 1 и 2) или планарными (тип 4) выводами.

Таблица 18.1

Тип	Подтип	Форма проекции тела корпуса на плоскость основания	Расположение проекции выводов (выводных площадок) на плоскость основания	Расположение выводов (выводных площадок) относительно плоскости основания
1	11	Прямоугольная (рис. 18.3, *а*)	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное в один ряд
	12			Перпендикулярное в два ряда
	13			Перпендикулярное в три ряда и более
	14			Перпендикулярное по контуру прямоугольника
	15		В пределах проекции тела корпуса до формовки	Перпендикулярное в один ряд, в отформованном виде в два ряда
2	21	Прямоугольная (рис. 18.3, *б*)	За пределами проекции тела корпуса	Перпендикулярное в два ряда
	22			Перпендикулярное в четыре ряда в шахматном порядке
3	31	Круглая (рис. 18.3, *в*)	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное по одной окружности
	32	Овальная		
4	41	Прямоугольная (рис. 18.3, *г*)	За пределами проекции тела корпуса	Параллельное по двум противоположным сторонам
	42			Параллельное по четырем сторонам
	43			Параллельное, отформованное по двум противоположным сторонам
	44			Параллельное, отформованное по четырем сторонам
	45			Параллельное, отформованное под корпус по четырем сторонам

Продолжение табл. 18.1

Тип	Подтип	Форма проекции тела корпуса на плоскость основания	Расположение проекции выводов (выводных площадок) на плоскость основания	Расположение выводов (выводных площадок) относительно плоскости основания
5	51	Прямоугольная (рис. 18.3, *д*)	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное для боковых выводных площадок по четырем сторонам; в плоскости основания для нижних выводных площадок
	52			Перпендикулярное для боковых площадок по двум сторонам
6	61	Квадратная (рис. 18.3, *е*)	В пределах проекции тела корпуса	Перпендикулярное в четыре ряда и более
	62			Перпендикулярное в два ряда и более со стороны крышки корпуса

Корпуса с планарными выводами допускают монтаж с двух сторон печатной платы, имеют большее число выводов и занимают малую площадь. Недостатками таких корпусов являются необходимость их фиксации при монтаже на печатной плате и трудность применения групповых методов пайки. Этих недостатков нет у корпусов со штыревыми выводами, которые имеют широкое применение.

В ЕС ЭВМ второй очереди (ряд 2) используются интегральные схемы (ИС) в корпусе второго типа — ДИП, обеспечивающие возможность автоматической установки ИС на печатную плату и групповых методов пайки. С увеличением степени интеграции и функциональной сложности ИС увеличивается число выводов корпусов и возрастает их сложность. Стоимость корпуса может превышать стоимость изготовления полупроводниковой микросхемы или микросборки.

Керамические корпуса типа 5 называют *микрокорпусами* или *кристаллодержателями*. Они представляют собой керамическую пластину, внутри которой встроены металлические дорожки, а по периметру расположены металлизированные контактные площадки. Последние осуществляют электрическое соединение микросхемы, размещенной в таком корпусе.

Микрокорпуса обеспечивают высокую плотность размещения на плате, возможность автоматизированной сборки и контроля

микросхем до сборки. Такие корпуса имеют меньшую стоимость за счет сокращения расхода дорогостоящих и повышения процента выхода годных материалов. Важным преимуществом микрокор-

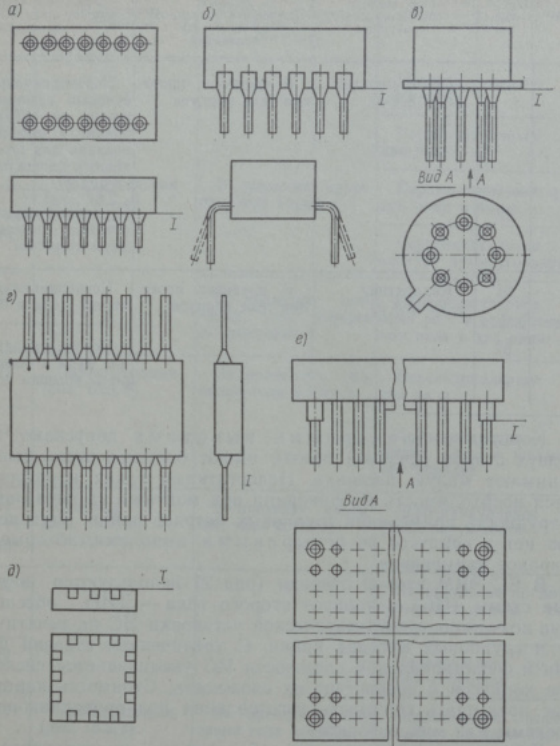


Рис. 18.3. Примеры корпусов для микросхем первого (*а*), второго (*б*), третьего (*в*), четвертого (*г*), пятого (*д*) и шестого типов:
I — плоскость основания

пусов является также высокая плотность расположения выводов. При расположении контактных площадок по периметру корпуса с шагом 1,25 мм можно получить до 124 выводов, с шагом

0,625 мм — до 244 выводов, а с шагом 0,5 — до 388 выводов. Перспективными являются корпуса с матрицей выводов, расположенных по всей площади основания с шагом 2,54 и 1,27 мм (по обеим осям координат). Такой керамический корпус с матрицей из 100 выводов имеет размеры 28×28 мм, а аналогичный кристаллоноситель — 34,3×34,3. Обеспечение эффективного отвода теплоты в кристаллодержателях обеспечивается применением бериллиевой керамики, имеющей высокую теплопроводность.

Внешние выводы корпуса изготовляют из материалов с высокой проводимостью. Для улучшения антикоррозионных свойств и качества контакта выводы покрывают оловом, золотом, серебром и др. Шаг выводов устанавливается 2,5 мм для корпусов типов 1 и 2 и 1,25 мм для корпусов типов 4 и 5. Выводы корпусов типа 3 располагаются под углом 30 или 45°.

В технически обоснованных случаях для корпусов типа 4 допускается применять шаг 0,625 мм. При этом свободные концы выводов должны обеспечивать возможность за счет формовки выводов присоединения к печатной плате в местах, расположенных с шагом не менее 1,25 мм.

Выводы в поперечном сечении должны быть круглой или прямоугольной формы. Допускается переход по длине вывода от одной формы поперечного сечения к другой. Диаметр вывода устанавливается в пределах 0,3...0,4 мм; плоские выводы имеют толщину 0,1...0,2 мм, а ширину 0,3...0,5 мм.

Корпуса изготовляют из стекла, металла, керамики или их сочетания. Металлокерамический корпус имеет керамическое основание и металлическую крышку. К керамическому основанию припаивают металлическую рамку, которая обеспечивает возможность сварки или пайки металлической крышки при герметизации корпуса. Крышку можно соединять с основанием заливкой влагостойким компаундом.

Керамический корпус имеет керамическое основание и крышку со встроенными проводящими дорожками. Монтаж внешних выводов и герметизация корпуса осуществляются пайкой стеклом. Керамические корпуса обладают меньшей мощностью рассеяния, большой хрупкостью и менее надежны с точки зрения обеспечения герметичности. Однако вследствие отсутствия дефицитных материалов они имеют малую стоимость.

Металлостеклянный корпус имеет металлическую крышку и стеклянное (или металлическое) основание (дно) с изоляцией и креплением выводов стеклом. Основным материалом для таких корпусов является ковар, представляющий собой сплав никеля (29%), кобальта (18%) и железа (53%). Этот сплав достаточно хорошо согласуется по термическому коэффициенту линейного расширения с кремнием и стеклом, обладает хорошей теплопроводностью, высоким удельным сопротивлением и антикоррозионными свойствами. В качестве изолятора применяют бо-

росиликатное стекло. Металлостеклянные корпуса являются наиболее технологичными, что обусловливается применением высокопроизводительных методов при их изготовлении (холодной штамповкой и др.).

Полимерный корпус является наиболее дешевым, но не обеспечивает надежной герметизации выводов. Кроме того, он характеризуется низкой механической прочностью, плохой теплопроводностью и малой влагостойкостью. Более высокую надежность имеют металлополимерные корпуса, в которых часть поверхности защищена металлическим кожухом, герметизация выводов осуществляется путем заливки полимерным компаундом.

Пригодность корпуса для конкретного использования определяется герметичностью, теплопроводностью, электрической и механической прочностью, размерами.

Герметичность является одной из наиболее важных характеристик корпуса, так как проникновение влаги и других веществ приводит к отказу микросхемы или изменению ее параметров. Количественной оценкой качества герметизации является скорость натекания, которая в вакуумплотных корпусах составляет $10^{-7}...10^{-8}$ см^3/с.

Герметизация внешних выводов выполняется с помощью стекол. Спай осуществляется за счет диффузии оксида металла в стекло, путем нагрева и выдержки соединяемых деталей при высокой температуре.

В металлополимерных корпусах герметизация осуществляется металлическим колпачком, а свободное пространство заполняется компаундом. Качество герметизации в таких корпусах зависит от влагопроницаемости компаунда, толщины его слоя, величины адгезии. Скорость натекания в металлополимерных корпусах значительно выше и составляет $10^{-4}...10^{-5}$ см^3/с.

Пластмассовый корпус имеет низкую герметичность, так как при нагревании и резком перепаде температур образуются трещины.

Важное значение при выборе корпуса имеет его коммутационная возможность, определяемая количеством внешних выводов.

18.4. Монтаж кристаллов и подложек в корпусе

Монтаж кристаллов и подложек, предназначенных для работы в герметизированном корпусе, включает в себя следующие этапы: подачу на рабочую позицию, установку и присоединение кристалла или подложки к основанию корпуса, соединение контактных площадок кристалла или подложки с выводами корпуса.

Подача кристаллов на рабочую позицию. На этом этапе существенным моментом является ориентирование кристаллов. Обычно для загрузки кристалла пользуются вакуумным захва-

том — присоской. Совмещение кристалла и присоски контролируется с помощью отражения в зеркальном дне лотка.

Метод раздельного ориентирования предполагает наличие отдельных хаотически расположенных кристаллов, полученных после разделения пластин.

Метод группового ориентирования предусматривает сохранение положения кристаллов после скрайбирования и разлома и исключает одну из самых трудоемких операций — ориентирование хаотически расположенных кристаллов. При групповом методе пластина до разделения закрепляется при помощи воска на специальном диске. Разделительные линии получают травлением.

После травления и сушки пластина с диском переносится на сетчатый экран и крепится на нем нитратом целлюлозы. Диск удаляется при расплавлении воска в горячем трихлорэтилене. Разделенные кристаллы остаются на сетчатом экране и переносятся на диск фиксатора. Сетчатый экран удаляется при растворении нитрата целлюлозы ацетоном, а фиксатор используется в качестве кассеты для передачи ориентированных структур на позицию монтажа.

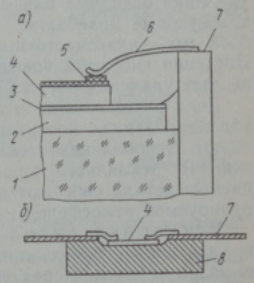


Рис. 18.4. Монтаж в цилиндрическом (*а*) и плоском (*б*) корпусах:
1 — ножка корпуса (стекло); *2* — ковар; *3* — золотая пленка; *4* — чип; *5* — контактная площадка; *6* — алюминиевый вывод; *7* — вывод корпуса; *8* — основание корпуса

Метод приораживания кристаллов к диску применяют для сохранения ориентации. На позиции монтажа нагретый вакуумный захват снимает кристалл и подает его на рабочую позицию.

Более высокая производительность получается при приклеивании пластины к тонкой эластичной пленке. Затем пластину скрайбируют и разламывают. После этого пленку закрепляют на торце цилиндрической оправки, в центре которой имеется перемещающийся плунжер, который выдавливает кристалл, находящийся напротив плунжера, вверх, где его может захватить вакуумная присоска. Подача на рабочую позицию подложек обычно осуществляется вручную.

Установка и присоединение кристалла или подложки к основанию корпуса. В металлостеклянных корпусах монтаж кристалла (рис. 18.4) осуществляется припоем, представляющим собой эвтектический сплав золота с германием или кремнием. Точка плавления эвтектического сплава значительно ниже точки плавления составляющих металлов. При пайке такими припоями поверхность корпуса должна быть металлической или металлизи-

рованной (лучше всего — позолоченной). Процесс пайки осуществляется в защитной атмосфере аргона, гелия или осушенного азота.

Оптимальным является соединение «золото — кремний» с толщиной спая 5...7 мкм. Температура такой пайки составляет 410... 450 °С. Для улучшения смачиваемости кристалла наносят золотое покрытие с подслоем никеля, которое вжигают при $t=420$ °С. Эвтектическая пайка производится без флюса. Для разрушения и удаления оксидных пленок с поверхности припоя используют ультразвуковые колебания, а для кристаллов размером больше 3×3 мм — низкочастотные колебания с большой амплитудой. Введение вибрации повышает прочность соединения на 30...40% за счет удаления оксидов и получения мелкозернистой структуры.

Если в стеклянных и керамических корпусах отсутствует металлизированная поверхность, то соединение кристалла осуществляют легкоплавким стеклом, которое наносят в виде пасты (суспензии) стеклянного порошка на очищенную поверхность. Соединяемые детали сжимают и подвергают оплавлению в печи с контролируемой атмосферой.

Установка ситалловых и керамических подложек в корпус производится с ориентированием ее относительно выводов корпуса. Перед этим на плату и дно корпуса наносят клеящий состав на основе эпоксидной смолы (клей ВК-9) или кремнийорганический клей (К-400).

Для создания теплоотвода в состав клея вводят порошки диэлектриков с высокой теплопроводностью (Al_2O_3, BeO и др.), а для электрического контакта — порошки благородных металлов с низким удельным сопротивлением (серебро, золото).

Большое влияние на прочность клеевого соединения оказывает качество поверхности соединяемых элементов. Она должна быть тщательно очищена, а следы органических соединений — удалены сушкой. Клей наносят капельным методом с помощью шприца. Для крепления ситалловых и керамических подложек применяют пайку стеклом.

Соединение контактных площадок кристалла или подложки с выводами корпуса. Соединение осуществляется с помощью термокомпрессионной сварки. Последовательность выполнения термокомпрессионной сварки при помощи капилляра показана на рис. 18.5.

Этот метод сварки имеет высокую производительность, так как привариваемая проволока *3* и подающий ее капилляр *2* совмещены в одном электроде. В качестве материала для проволоки используют только золото, так как другие материалы не образуют шарика, пригодного для создания контакта. Шарик получается путем нагревания проволочки в пламени водородной горелки. Стенки капилляра давят на шарик, вызывая его деформацию. При этом происходит присоединение шарика *4* к металлизирован-

ной поверхности подложки *1*. После этого проволоку отводят и присоединяют к выводу корпуса *5*. Проволоку отрезают водородной горелкой *6*.

Для монтажа используется проволока диаметром 10...40 мкм из золота или алюминия и значительно реже из сплава палладия с никелем. Золотая проволока хорошо подвергается пайке и совместима с любым материалом контактных площадок. Алюминиевая проволока имеет меньшую стоимость и обладает лучшей совместимостью с алюминиевыми контактными площадками кристалла.

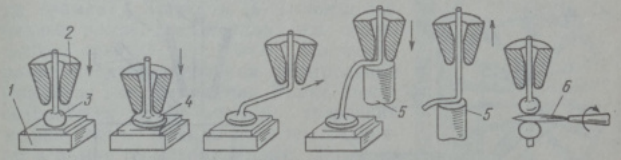


Рис. 18.5. Последовательность выполнения термокомпрессионного соединения

Разнородные металлические пары, например «золото — алюминий», «припой — золото» и некоторые другие, могут быть причиной катастрофических отказов микросхем. Система «золото — алюминий» при $t = 200\,^{\circ}C$ в присутствии кремния и кислорода образует соединение $AsAl_2$ (пурпурную чуму), которое приводит к нарушению контакта из-за повышенной хрупкости и большого сопротивления.

Обычно ограничиваются соединениями на основе одного металла, например контактами «алюминий — алюминий» для транзисторов или «золото — золото» в тонкопленочных микросхемах. Эти металлы имеют высокую адгезию и широко применяются в интегральных схемах. Монтаж кристаллов в корпусе является весьма трудоемкой и зрительно напряженной операцией. Это объясняется малыми размерами и легкой повреждаемостью кристалла. Снижение трудоемкости монтажа достигается применением репрограммируемых и адаптивных роботов. Эти роботы предназначены для присоединения с помощью пайки кристаллов к золоченому основанию корпуса, присоединения выводов из алюминиевой проволоки к элементам интегральных микросхем методом ультразвуковой сварки и контроля качества монтажа.

18.5. Герметизация и испытание микросхем

Герметизации должна предшествовать операция очистки и обезгаживания всех внутренних поверхностей и создания в корпусе определенной атмосферы. Герметизация осуществляется контактной сваркой, холодной сваркой или пайкой.

Контактная электросварка обеспечивает вакуумплотный шов, но в процессе сварки возможны выплески металла, который может попадать на микросхему. Для герметизации круглых корпусов применяют конденсаторную сварку.

Холодная сварка также обеспечивает получение вакуумплотного шва, но она применима при толщине материала более 0,3 мм. Один из свариваемых материалов должен обладать высокой пластичностью. При сварке возможна значительная деформация корпуса, что является недостатком метода.

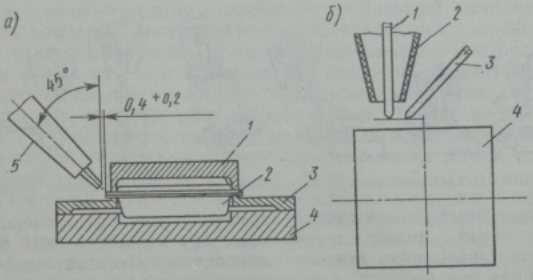


Рис. 18.6. Электродуговая сварка:

а — прямого действия (*1* — тепловод крышки; *2* — микросхема в корпусе; *3* — теплоотвод основания; *4* — теплоотвод выводов; *5* — электрод); *б* — комбинированного действия (*1* — электрод основной; *2* — сопло горелки; *3* — электрод вспомогательный; *4* — теплоотвод)

Электродуговая сварка применяется для герметизации микросхем и других элементов в металлических и металлостеклянных корпусах квадратной, прямоугольной и другой формы. Сварка может выполняться электрической дугой прямого и комбинированного действия. При сварке дугой прямого действия (рис. 18.6, *а*) соединяемые детали помещаются в кассеты. Качество сварки зависит от конструкции кассет и особенно от медных теплоотводов. Кассета с корпусом помещается в камеру, из которой откачивается воздух, и заполняется гелием. Затем зажигается дуга и включается перемещение горелки. Последние могут быть прямого и комбинированного действия.

При сварке дугой комбинированного действия электрическая дуга возбуждается между основным *1* и вспомогательным *3* электродами (рис. 18.6, *б*). Она упрощает конструкцию теплоотвода и обеспечивает легкую возбудимость дуги, снижение температуры нагрева корпуса и резко снижает возможность возникновения трещин в стеклянных изоляторах в процессе сварки.

Пайка осуществляется разными припоями при $t = 180 \ldots 220$ °С

с предварительным облуживанием деталей. Она выполняется без флюса в защитной атмосфере.

Герметизация бескорпусной конструкции осуществляется заливкой эпоксидными компаундами, обеспечивающими достаточно высокую прочность и влагостойкость.

Весьма перспективным методом является сборка и герметизация на металлической ленте. Наиболее часто применяют ленту толщиной 50 мкм из ковара, покрытую никелем.

На рис. 18.7, *а* показана секция ленты (рамка). Точность штамповки выводных рамок, достигаемая при современной технике, ±1,3 мкм. По краям рамки предусматриваются контрольные отверстия для совмещения. Рамка может создаваться также методом травления медной ленты. Выводы чипа присоединяют к рамке термокомпрессией. При этом можно осуществить групповой монтаж одновременно всех выводов, что увеличит производительность монтажных работ.

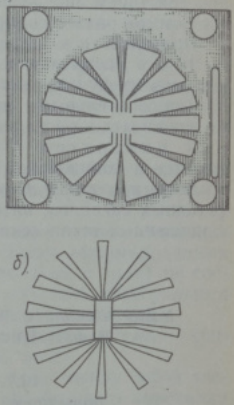


Рис. 18.7. Герметизация на металлической ленте

Герметизацию собранных на выводной рамке или ленте чипов осуществляют заливкой или опрессовкой. Метод опрессовки обладает большой производительностью. После герметизации внешняя часть рамки удаляется штамповкой (рис. 18.7, *б*). Готовую микросхему проверяют на герметичность, тепловой удар, усталостную прочность выводов, пригодность к пайке и др.

Самый простой способ проверки на герметичность заключается в наблюдении за образованием пузырьков в жидкости. Микросхему помещают в сосуд с силиконовым маслом и нагревают. Газ, находящийся внутри корпуса, расширяется и при наличии мельчайших отверстий выходит наружу, образуя пузырьки.

Наиболее совершенным методом является проверка герметичности при помощи гелиевого течеискателя. Испытуемую микросхему помещают на 1 ч в атмосферу гелия при давлении 400 кПа, а затем в камеру масс-спектрометра и создают вакуум. Если гелий проник в корпус, то часть его попадает в камеру масс-спектрометра, где он будет обнаружен и измерен количественно.

Гелий, остающийся в корпусе, не влияет на работу схемы. При этом методе не могут быть обнаружены большие щели, через которые удаляется при откачке весь гелий, попавший в корпус.

Испытание на тепловой удар производят путем нагревания корпуса микросхемы до 125 °С и выдержки при этой температуре в течение 15 мин. Затем корпус охлаждают до комнатной температуры и после выдержки в течение 5 мин до —55 °С возвращают к комнатной температуре. Испытание состоит из 15 таких циклов с последующей проверкой на герметичность.

Проверка на усталостную прочность внешних выводов корпуса выполняется путем изгибания их на 45° под действием определенной силы (обычно 2,5 Н). Изгибание повторяют три раза и корпус проверяют на герметичность.

Пригодность к пайке определяется путем погружения выводов на 10 с в расплавленный припой с последующей проверкой микросхемы на функционирование.

Заключительными видами испытаний являются проверка основных электрических параметров интегральных микросхем в нормальных условиях, а также при повышенных и пониженных значениях температуры. Проверку осуществляют при наихудшем сочетании электрических параметров (входных сигналов, питающих напряжений и др.) в пределах, установленных техническими условиями.

ГЛАВА 19

МИКРОСХЕМЫ С ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ ИНТЕГРАЦИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

19.1. Основные направления повышения уровня интеграции микросхем

Интегральные микросхемы, содержащие более 100 элементов в одном кристалле, называют *микросхемами с повышенным уровнем интеграции*. Имеется два направления в разработке таких микросхем. Одно из них базируется на полупроводниковой, а другое — на гибридной технологии.

Полупроводниковые большие интегральные схемы (БИС) и *сверхбольшие интегральные схемы* (СБИС) представляют собой сотни и тысячи схем, образованных в одном кристалле и объединенных внутренними связями в устройство, выполняющее сложную электрическую функцию. Такие схемы имеют более высокие надежность и быстродействие по сравнению с обычными интегральными микросхемами. Повышение надежности достигается за счет сокращения общего числа операций, каждая из которых влияет на надежность схемы. Исключаются операции разделения общей пластины на отдельные схемы, установки отдельного кристалла в корпус и др. Элементарные схемы остаются на исходной пластине, где и объединяются в требуемую схему. При этом резко сокращается число внешних выводов, являющихся основной причиной отказов.

Повысить надежность можно также за счет введения избыточных схем, не вызывающих заметного увеличения БИС.

Быстродействие БИС увеличивается вследствие уменьшения размеров элементов и длины соединений между ними. При уменьшении размеров элементов с 5 до 1 мкм на кристалле тех же размеров можно разместить в 25 раз больше логических элементов. Современная однокристальная микроЭВМ «Электроника», построенная на СБИС, содержит на кристалле размером 6×6 мм, около 300 тыс. элементов.

Интегральная микросхема, выполняющая функции процессора, называется *микропроцессорной интегральной схемой*. Совокупность микропроцессорных и других интегральных микросхем, совместимых по архитектуре, конструктивному исполнению и электрическим параметрам и обеспечивающих возможность совместного применения, называют *микропроцессорным комплектом интегральных микросхем* (МПК).

Новым направлением в развитии БИС являются матричные БИС (МаБИС), которые создаются на основе базового кристалла (БМК) или базового матричного кристалла.

Базовый кристалл интегральной микросхемы — часть полупроводниковой пластины с определенным набором сформированных элементов, в том числе электрически соединенных и (или) не соединенных между собой, используемой для создания интегральных микросхем путем изготовления межэлементных соединений.

Базовый матричный кристалл интегральной микросхемы — кристалл с регулярным расположением базовых ячеек.

Совокупность не соединенных и соединенных между собой элементов, являющихся основой для построения базового кристалла интегральной схемы, называют *базовой ячейкой кристалла*.

Функциональная ячейка базового кристалла интегральной микросхемы предназначена для реализации одной или нескольких самостоятельных функций. В одной ячейке можно создать путем объединения компонентов несколько логических или запоминающих элементов. Топологические ячейки размещаются на БМК, образуя матрицу одинаково повторяющихся ячеек. Особенность МаБИС заключается в возможности создания широкого набора функциональных схем, отличающихся межсоединениями, которые формируются на последних этапах технологического процесса.

Матричные БИС применяют в ЭВМ четвертого поколения. Промышленностью освоены БМК, на основе которых разработаны серии МаБИС.

Большие гибридные интегральные схемы (БГИС) и *сверхбольшие гибридные интегральные схемы* (СБГИС) в качестве навесных элементов используют бескорпусные интегральные схемы и пленочную технологию для их соединения на диэлектрической подложке. По функциональному назначению и степени интеграции БГИС превосходят полупроводниковые, а технологический процесс и проек-

тирование их значительно проще. Они являются ремонтопригодными и наиболее полно используют преимущества пленочной и полупроводниковой технологии.

Новым направлением по созданию устройств для обработки, передачи и хранения информации является функциональная микроэлектроника. Она обладает большими возможностями для сокращения размеров и повышения надежности микросхем.

Функциональная микроэлектроника позволяет реализовать требуемую функцию элемента, основываясь непосредственно на физических явлениях в твердом теле. В этом случае объему твердого тела придаются такие свойства, которые необходимы для выполнения заданной функции.

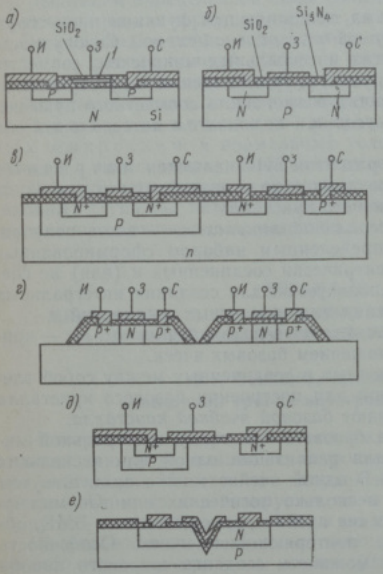


Рис. 19.1. Униполярные структуры полупроводниковых интегральных микросхем:
а — *P*-МОП; *б* — *N*-МОП; *в* — *K*-МОП; *г* — КНС; *д* — ДМОП; *е* — VМОП; *1* — кремниевый затвор

19.2. Большие интегральные схемы

Большие интегральные схемы изготовляют на основе наиболее перспективных методов, за которыми традиционно установились названия реализуемых логических структур (например, технология *N*-МОП, технология *K*-МОП и др.). Все известные структуры и технологические процессы изготовления БИС можно разделить на две группы: униполярные и биполярные.

Униполярные структуры. Они имеют высокую плотность компоновки и меньшее быстродействие, а биполярные — меньшую плотность компоновки, но бо́льшее быстродействие. В рамках каждой группы имеется ряд различных структур и технологических процессов их изготовления.

Основными видами униполярных структур являются (рис. 19.1, *а* — *е*):

структуры с кремниевым затвором *1* (*Р*-МОП) и нитридом кремния под затвором (*N*-МОП) позволяют уменьшить пороговое напряжение;

комплементарная (*К*-МОП), с кремнием на сапфире (КНС), с двойной диффузией (ДМОП), с V-образной канавкой (VMOП) имеют высокое быстродействие.

● Примечание. Высокое быстродействие структур ДМОП и VMOП достигается уменьшением длины канала под затвором.

Биполярные структуры. Эти структуры имеют следующие разновидности (рис. 19.2): транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ); интегральная инжекционная логика ($И^2Л$); структура с эмиттерными связями (ЭСЛ). Сравнительная характеристика полупроводниковых структур приведена в табл. 19.1.

При построении БИС наиболее широко применяют структуры (технологии) *N*-МОП и $И^2Л$.

Для выполнения внутрисхемных соединений используют методы избирательного монтажа, фиксированных соединений и микроматричный метод.

Метод избирательного монтажа (рис. 19.3). При этом методе на общей пластине создается большое число элементарных схем. Внутрисхемные соединения выполняют металлизацией одновременно с созданием контактных площадок. Последние необходимы для проверки каждой схемы. В дальнейшем используют только годные схемы. Информацию о расположении годных и дефектных ячеек вводят в ЭВМ. В машину вводят также характеристики заданной БИС и основные требования к рисунку межсхемных соединений. Машина строит рисунок соединений, воспроизводимый затем на экране электронно-лучевой трубки и проецируемый на светочувствительный материал, из которого изготовляют фотошаблон. Таким же способом изготовляют комплект фотошаблонов для второго и третьего уровней металлизации.

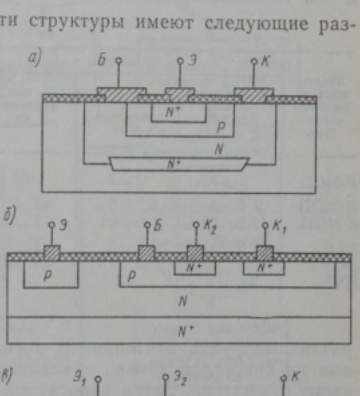


Рис. 19.2. Биполярные структуры полупроводниковых интегральных микросхем:
а — ТТЛ; *б* — $И^2Л$; *в* — ЭСЛ

После выполнения первого уровня металлизации на пластину наносят изоляционный слой, в котором вытравливают окна, обнажающие контактные площадки. Поверх изоляционного слоя напыляется рисунок межсхемных соединений (второй слой металлизации) и образуются контакты с участками металлизации первого уровня. При этом получается заданная конфигурация схемы, позволяющая выполнять требуемую функцию. Используя различный рисунок межсоединений второго уровня, можно на основе одной и той же базовой пластины получать устройства, выполняющие

Таблица 19.1

Полупроводниковые структуры	Параметры			Число процессов		Удобство сопряжения с внешними схемами
	площадь вентиля, 10^{-3} мм^2	мощность рассеяния, мВт	задержка, нс	фотолитографии	диффузии	
P-МОП	5 ... 7,5	2 ... 3	100	5	2	Плохое
N-МОП	3, 7 ... 5	0,2 ... 0,5	40 ... 100	6	3	Удовлетворительное
K-МОП	6,2 ... 18,7	<0,001	15 ... 50	7	4	
ТТЛ	12,5 ... 37	1 ... 3	3 ... 10	7	4	Отличное
ЭСЛ	12,5 ... 31	5 ... 15	0,5 ... 0,2	8 ... 9	4 ... 5	
И^{2}Л	2,5 ... 3,7	0,2	5	5 ... 7	3 ... 4	Хорошее

различные функции. Например, логические элементы, расположенные на кристалле, можно объединить в сдвиговый регистр или в схему сумматора. Затем наносят еще один слой изоляции, в котором вытравливают окна, открывающие в нужных местах металлизацию второго уровня. Поверх нового слоя изоляции напыляется рисунок вертикальных межсоединений (металлизация третьего уровня) и образуются контакты с металлизацией второго уровня.

Большинство БИС изготовляют на основе алюминиевой металлизации. В качестве изолирующего слоя используют диоксид кремния SiO_2 или алюминия Al_2O_3. Изоляция на основе диоксида кремния отличается простотой выполнения. Однако процент выхода годных схем невысок, так как в процессе распыления кварца образуется большое число микроотверстий, что приводит к замыканию между слоями. Лучшими изолирующими свойствами обладают пленки на основе оксидов алюминия. Изолирующий слой Al_2O_3 не имеет проколов и позволяет получить гладкую поверхность. Схема трехслойной изоляции приведена на рис. 19.4.

Метод избирательного монтажа основан на использовании только годных ячеек в пластине, поэтому каждая БИС будет иметь свой рисунок межсоединений. Это объясняется тем, что практически не будет пластин с одинаковым числом дефектных ячеек, расположенных на одних и тех же местах.

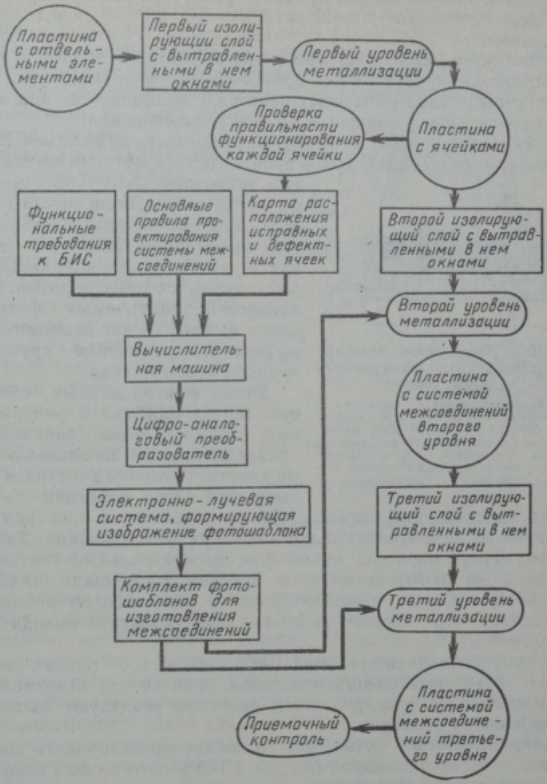


Рис. 19.3. Последовательность выполнения основных операций изготовления БИС по методу избирательного монтажа

Проверка отдельных схем представляет собой трудоемкую и дорогостоящую операцию, но эти затраты оправдываются, так как предварительная проверка каждой схемы облегчает контроль всего устройства. При этом получается высокий процент выхода БИС, поскольку при изготовлении соединений используются только год-

ные ячейки. Окончательный процент брака определяется процессами второго и третьего уровней металлизации и двух последних слоев изоляции.

Недостатком метода избирательного монтажа является наличие контактных площадок для проверки каждой элементарной схемы, что существенно уменьшает полезную площадь пластины и вызывает значительное снижение плотности компоновки.

Другим недостатком является необходимость добиваться 100%-ного выхода годных схем при второй и третьей металлизациях. Так как технологический процесс еще не может этого обеспечить, то средства, израсходованные на некоторые предыдущие операции (включая и дорогостоящее машинное время), окажутся потерянными. Уникальность применяемых фотошаблонов сводит на нет экономический эффект от применения групповых методов производства.

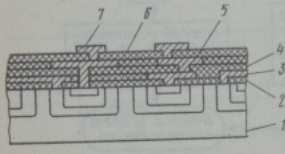


Рис. 19.4. Трехслойная изоляция полупроводниковых интегральных микросхем:

1 — полупроводниковая пластина с элементами; *2* — первый слой диэлектрика (SiO_2); *3* — первый слой металлизации; *4* — второй слой диэлектрика (стекло); *5* — второй слой металлизации; *6* — третий слой диэлектрика; *7* — третий слой металлизация

Метод фиксированных соединений. Метод монтажа с фиксированным рисунком межсоединений позволяет полностью использовать возможности групповых методов производства. Они основаны на том, что все элементарные схемы считаются годными, а проверка производится после заключительной операции металлизации. Так как промежуточная проверка исключена, то контрольные контактные площадки не изготовляются и требуемая площадь пластины уменьшается. Схемы изготовляются на относительно небольших кристаллах, что обеспечивает высокий процент выхода годных схем.

Однако выполнение условия 100%-ного выхода годных элементов для БИС на больших пластинах практически невозможно и метод монтажа с фиксированным рисунком реализуют на пластинах небольших размеров.

Микроматричный метод. Он позволяет проектировать систему с фиксированной разводкой без учета 100%-ного выхода элементов на пластине. При этом методе используют однотипные микроматрицы с элементарными ячейками. Каждая ячейка состоит из набора элементов, объединенных первым слоем металлизации. Вторым и последующими слоями металлизации ячейки объединяются в микроматрицу. Путем введения избыточности ячеек всегда можно получить требуемую структуру БИС.

Основной причиной брака при производстве БИС является несовершенство материалов и основных технологических процессов. Особое место занимает проблема надежного травления большого

числа окон, обеспечивающих соединения между слоями (поскольку отказ одного контакта делает негодной всю схему). Наиболее важными и быстро развивающимися технологическими направлениями изготовления БИС являются методы электронно-лучевой литографии и сухого анизотропного травления. Новые методы литографии с высокой разрешающей способностью позволяют получать рисунки с субмикронными размерами.

Методы электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ). Для формирования топологического рисунка схемы применяют различные резисты, чувствительные к электронному, рентгеновскому и ультрафиолетовому излучениям. Получение топологического рисунка на пластине, покрытой резистом, может производиться путем последовательного экспонирования каждого элемента схемы сканирующим лучом или методом репродуцирования.

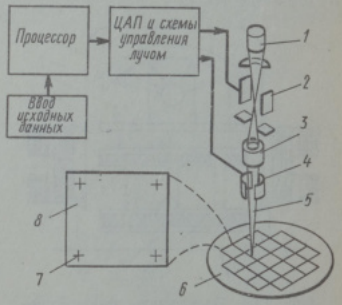


Рис. 19.5. Схема электронно-лучевой литографии:

1 — электронная пушка; *2* — электрод запирания луча; *3* — фокусирующая катушка; *4* — отклоняющая система; *5* — электронный луч; *6* — полупроводниковая пластина; *7* — метки совмещения; *8* — кристалл (элементарная схема)

Получение топологического рисунка путем экспонирования каждого элемента схемы сканирующим лучом. В основе ЭЛЛ сканирующим лучом (рис. 19.5) лежит перемещение луча по поверхности пластины, покрытой резистом. Под действием электронного луча происходит экспонирование резиста. Проявлением удаляется экспонированная часть (позитивный резист) или неэкспонированная часть (негативный резист). Для формирования топологического рисунка схемы с субмикронными размерами элементов необходимо иметь электронное пятно диаметром 0,02 ... 0,05 мкм, что достигается системой фокусирования и конструкцией электронной пушки. Перемещение луча в области сканирования должно подчиняться линейному закону без гистерезиса и нарушения размеров и формы пятна, которое должно точно перемещаться в заданную точку в соответствии с сигналом отклонения. Для обеспечения фиксированного положения электронного луча относительно столика используются *метки совмещения*, которые представляют собой участки поверхности, отличающиеся по своим характеристикам рассеяния электронов от остальной поверхности. Метки совмещения выполняются в виде углубления в кремнии, выступа в SiO_2; V-образной канавки. Изменение потока отраженных электронов (вторичная элек-

тронная эмиссия) при попадании электронного луча на метку совмещения используют для формирования сигнала рассогласования, который пропорционален числу отраженных электронов. Электронно-лучевую литографию сканирующим лучом наиболее целесообразно применять для изготовления фотошаблонов. Предельно допустимое разрешение ЭЛЛ составляет 0,5 мкм, а реально достигнутое — 0,8 мкм.

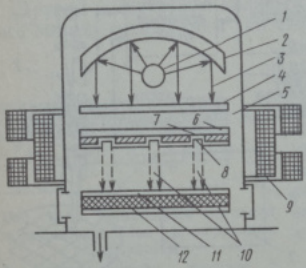


Рис. 19.6. Электронно-лучевая проекционная система литографии

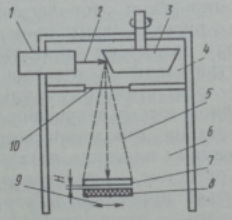


Рис. 19.7. Базовая система рентгенолитографии:

1 — электронная пушка; *2* — электронный луч; *3* — вращающийся анод; *4* — вакуумная камера; *5* — рентгеновские лучи; *6* — камера; *7* — шаблон; *8* — пластина, покрытая слоем резиста; *9* — перемещение пластины; *10* — окно, закрытое бериллиевой мембраной

Метод репродуцирования. Проекционные системы экспонирования основаны на бесконтактном репродуцировании рисунка с шаблона. К ним относятся электронно-лучевые проекционные системы, рентгеновские и оптические системы репродуцирования.

Электронно-лучевая проекционная система литографии. Такая система показана на рис. 19.6. Ультрафиолетовое излучение источника света *1* сферическим дефлектором *2* формируется в равномерный параллельный световой поток *3*, который через светофильтр *4* вводится в вакуумную камеру *5*. Световой поток освещает фотокатод, представляющий собой кварцевую пластину *6*, на поверхность которой нанесены пленка диоксида титана *7* по требуемому рисунку схемы и сплошной слой палладия *8* толщиной $4 \cdot 10^{-3}$ мкм. Участки палладия, не защищенные диоксидом титана, под действием ультрафиолетового излучения испускают электроны, которые в пространстве между шаблоном и

пластиной ускоряются в электрическом поле. С помощью магнитного поля, ориентированного параллельно электрическому, электронные лучи *10* фокусируются катушкой *9* и осуществляют перенос рисунка фотошаблона на оксидированную подложку *12*, покрытую резистом *11*. Разрешающая способность процесса составляет 1 мкм.

Рентгеновская литография. *Рентгеновские системы экспонирования* (рис. 19.7). Эти системы дают возможность повысить разрешение до 0,3 мкм за счет уменьшения дифракционного

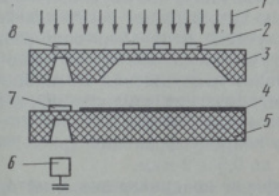


Рис. 19.8. Шаблон для рентгенолитографии:

1 — рентгеновские лучи; *2* — рисунок на основе пленки золота; *3* — кремниевый шаблон; *4* — рентгенорезист; *5* — оксидированная кремниевая пластина; *6* — детектор; *7*, *8* — знаки для совмещения пластины с шаблоном

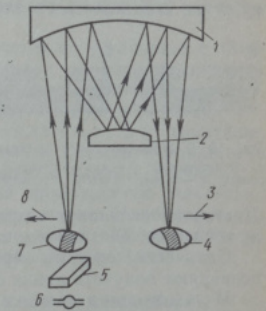


Рис. 19.9. Оптическая система зеркального репродуцирования:

1 — основное зеркало; *2* — вспомогательное зеркало; *3* — направление перемещения пластины; *4* — пластинка, покрытая фоторезистором; *5* — конденсор; *6* — источник УФ-излучения; *7* — шаблон с рисунком в масштабе 1 : 1; *8* — направление перемещения шаблона

рассеяния. Оно возникает при торможении электронного луча, падающего на анод, который находится в глубоком вакууме. Вращение мишени обеспечивает ее эффективное охлаждение и позволяет направлять более плотный электронный пучок, что повышает интенсивность излучения. Рентгеновские лучи выводятся наружу и проходят через шаблон, находящийся в сфере гелия. Между шаблоном и пластиной, покрытой слоем фоторезиста толщиной 0,25 ... 1 мкм, сохраняется малый зазор (до 25 мкм).

Рисунок на шаблоне (рис. 19.8) создается гравировкой по тонкому слою золота, хорошо поглощающему рентгеновские лучи. При изготовлении шаблона в пластину кремния толщиной 200 мкм производят диффузию бора на глубину 3 ... 6 мкм, что соответствует толщине маски, прозрачной для рентгеновских лучей. С обратной стороны кремний травят в анизотропном травителе, который растворяет только нелегированный кремний. Процесс травления прекращается на границе с диффузионным слоем.

Совмещение шаблона и пластины производится по меткам совмещения. В подложке под меткой совмещения находится детектор, с помощью которого формируется сигнал рассогласования. Величина сигнала зависит от точности совмещения (~0,1 мкм) пластины и шаблона. Основными преимуществами процесса рентгенолитографии являются высокая разрешающая способность и нечувствительность к загрязнениям, так как пылинки и другие частицы на поверхности подложки не поглощают рентгеновских лучей. Отсутствие механического контакта между пластиной и шаблоном (зазор 50 мкм) устраняет возможность повреждения шаблона. Недостатками метода являются большое время экспонирования (до 30 мин), что обусловлено малым поглощением рентгеновского излучения в применяемых резистах, и явление дисторсии (искривления) изображения на шаблоне. Дисторсия возникает вследствие механических напряжений в золотой маске. Ее значение составляет около 100 нм.

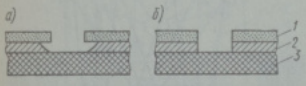


Рис. 19.10. Элемент после травления: *а* — изотропного; *б* — анизотропного; *1* — резист; *2* — элемент схемы; *3* — подложка

Оптические системы зеркального репродуцирования (рис. 19.9) позволяют получить линии шириной до 0,5 ... 2 мкм.

Ионно-лучевая литография по сравнению с методами электронно-лучевой, рентгеновской и оптической литографии может обеспечить более высокое разрешение, поскольку ионы обладают большей массой и, следовательно, меньше подвержены явлениям рассеяния. Ионные пучки могут использоваться для создания топологических рисунков как по способу проекционной печати, так и путем непосредственного экспонирования структур сфокусированным пучком.

Методы сухого анизотропного травления. Травление, осуществляемое в различных растворах, является изотропным. При этом скорость травления одинакова во всех направлениях, что приводит к подтравливанию на величину, равную толщине пленки. Для получения субмикронных размеров необходимо применять анизотропное травление, при котором значение подтравливания равно нулю (рис. 19.10). Высокую разрешающую способность (~0,3 ... 0,5 мкм), анизотропность травления и меньшую плотность точечных дефектов обеспечивают методы сухого травления. Основными разновидностями сухого травления являются ионное и плазменно-химическое травление.

Ионное травление. Оно основано на распылении поверхностных слоев материала путем бомбардировки ионами инертных газов в вакууме (10^{-2} Па). Ионное травление может быть ионно-плазменным и ионно-лучевым.

Ионно-плазменное травление осуществляется на установках ионной бомбардировки триодного типа (см. рис. 15.9). В качестве

мишени (катода) используют подложку с пленочной структурой, подлежащей травлению. На мишень подается высокочастотное напряжение для нейтрализации зарядов, накапливаемых на диэлектрической подложке. Под действием ионной бомбардировки участки пленки, не защищенные фоторезистом, распыляются ионами аргона. При этом обеспечивается избирательность (селективность) травления, так как скорость распыления резиста в 10 ... 15 раз меньше скорости распыления металла и к моменту окончания процесса травления на пленке сохраняется защитная маска из резиста.

Ионно-лучевое травление осуществляется на установках с автономным источником ионов, изолированным от обрабатываемого изделия. Это позволяет устранять возможность теплового и радиационного воздействия плазмы на обрабатываемую подложку.

Плазменно-химическое травление. Это травление основано на удалении поверхностных слоев мишени в результате химических реакций. Активные компоненты плазмы вступают в химические реакции с обрабатываемой поверхностью пластины, в результате которых осуществляется травление. Наиболее часто плазменно-химическое травление в кислородной плазме используется для удаления фоторезиста после ионного травления.

19.3. Большие гибридные интегральные схемы и микросборки

Конструктивной основой БГИС является коммутационная плата с многоуровневой разводкой и пленочными пассивными элементами. В качестве активных элементов применяют интегральные микросхемы. Наиболее целесообразно использование бескорпусных интегральных микросхем, которые меньше по занимаемой площади в 30 раз, а по массе — в 70 раз (по сравнению с их аналогами в корпусах). Особенно актуальным становится применение бескорпусных интегральных микросхем в связи с ростом интеграции и увеличением числа выводов. Обычными становятся интегральные микросхемы с числом выводов 60 ... 100, а в ближайшие годы оно достигнет 300.

Коммутационные платы могут быть выполнены на основе пленочной технологии, многослойной керамики, полиамидной пленки (рис. 19.11). В тонкопленочных коммутационных платах (рис. 19.11, *а*) основанием является пластина *3* из ситалла размером 48×60 мм. Проводники *1* и резисторы получают термическим испарением или ионно-плазменным распылением алюминия, который обеспечивает хорошую адгезию с диэлектрическим слоем *2*. Основаниями плат, изготовленных по толстопленочной технологии, является керамика 22ХС. Металлические и диэлектрические слои создаются методом трафаретной печати.

По тонко- и толстопленочной технологии изготовляют коммутационные платы, имеющие 2 ... 3 уровня металлической разводки.

Технология на основе многослойной керамики (рис. 19.11, *б*) заключается в изготовлении керамических пластин *1* с отверстиями для межслойных переходов, создании толстопленочных проводников *3* и металлизации отверстий *2*. Затем пластины собирают в пакет и спекают. Такие платы вследствие большой толщины изоляционного слоя (100 мкм и больше) обладают низкими паразитными емкостями и изготовляются с числом слоев до 6.

Коммутационные платы с двух- и трехслойной разводкой получают на основе полиамидной пленки. Полиамидная изоляция обладает хорошими физико-химическими и электрическими свойствами, которые сохраняются при температуре до 420°С. Она более стойка к воздействию влаги и имеет высокую адгезию к алюминию и другим металлам. Двухслойная структура на полиамидной пленке *3* показана на рис. 19.11, *в*. Ее получают путем напыления проводящего слоя *2* (Cr—Cu—Cr) после пробивки отверстия *1*. Защита полученного слоя производится сплавом типа «олово — висмут».

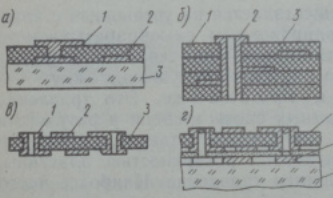


Рис. 19.11. Коммутационные платы на основе:
а — тонкопленочной технологии; *б* — многослойной керамики; *в* — двухслойная плата на полиамидной пленке; *г* — трехслойная плата

В трехслойной структуре (рис. 19.11, *г*) первый слой металлизации получают на ситалловой подложке *3* по тонкопленочной технологии. Затем создается двухслойная структура на полиамидной пленке *1*, которая монтируется на ситалловую подложку при помощи столбиковых выводов *2* с использованием разделительного изоляционного слоя.

Монтаж бескорпусных микросхем на коммутационной плате. Такой монтаж осуществляется при помощи проволочных и жестких выводов (см. рис. 18.2).

Для монтажа микросхем в корпусах применяют два способа: установку непосредственно на поверхности платы или в перфорированные окна (рис. 19.12). В последнем случае достигается большая плотность компоновки, однако исключается возможность использования большого числа слоев на плате. Корпус соединяют с контактными площадками при помощи пайки. Наиболее перспективным методом является монтаж кристаллов на гибких полиамидных носителях (рис. 19.13). Выводную рамку получают штамповкой. Контактные площадки кристалла совмещают с выводами на ленточном носителе и соединяют их пайкой или ультразвуковой сваркой. После испытаний и проверки производится вырубка «кадра» и установка его на коммутационную плату. При этом внешние

балочные выводы кадра присоединяются к контактным площадкам на коммутационной плате. Важным преимуществом монтажа микросборок на ленточных носителях является возможность контроля схем, смонтированных на носителе, до их окончательного присоединения к коммутационной плате.

Одним из перспективных направлений в технологии и конструировании микросборок является применение оксидированных подложек на основе алюминия и его сплавов. Теплопроводность таких подложек близка к теплопроводности бериллиевой керамики, а себестоимость в 5 раз меньше ситалловых подложек.

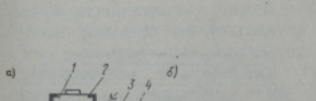


Рис. 9.12. Установка схемы в микрокорпусе:

а — на плату; *б* — в отверстие; *1* — микрокорпус; *2* — припой; *3* — металлизация; *4* — плата

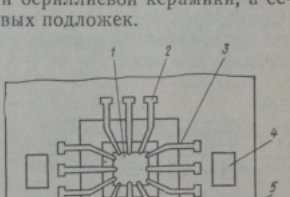


Рис. 19.13. Монтаж на полиамидном носителе:

1 — кристалл; *2* — контактные площадки; *3* — выводы; *4* — перфорация; *5* — лента полиамидная

19.4. Функциональная микроэлектроника

Основными направлениями функциональной микроэлектроники являются оптоэлектроника, криогенная электроника, магнитоэлектроника, приборы с зарядовой связью, акустоэлектроника, молекулярная электроника.

Оптоэлектроника. Она основана на преобразовании электрических сигналов в световые и передаче этих сигналов по оптическому каналу связи с последующим преобразованием оптического сигнала в электрический. Оптическая (фотонная) связь позволяет успешно решать одну из наиболее трудных задач микроэлектроники — передачу сигналов между отдельными конструктивными платами. Устранение паяных соединений и замена их оптическими значительно повышают надежность устройства.

Основные элементы оптоэлектронных устройств — излучатель световой энергии (источник света), световод, фотоприемник.

Рабочим элементом в полупроводниковых генераторах (светоизлучающих диодах) обычно является монокристалл из арсенида галлия. Такой кристалл прозрачен, и его можно рассматривать как оптический резонатор. Генератор возбуждается импульсами

электрического поля (ударной ионизацией). При этом наблюдается высвечивание его в инфракрасной области спектра.

В качестве приемника лучистой энергии применяют фотодиоды, фоторезисторы и фототранзисторы.

Простейшим оптоэлектронным прибором является оптрон плоской конструкции (рис. 19.14, *а*). Такой прибор состоит из арсенид-галлиевого источника света *1* и оптически связанного с ним кремниевого фотодиода *3*. Связующей средой служит стекло *2* на основе селена с показателем преломления 2,4 ... 2,6. Применение такой связи увеличивает входное излучение благодаря уменьшению отражения на поверхности раздела и увеличению предельного угла.

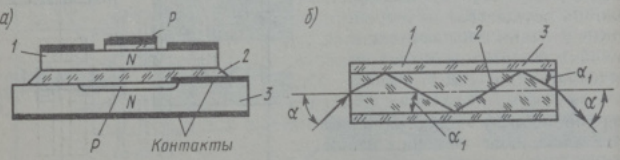


Рис. 19.14. Оптрон плоской конструкции:
а — общий вид; *б* — ход луча

Соединения в пределах микросборок могут быть выполнены на основе плоского световода, а межблочные соединения — на основе волоконно-оптических линий связи. Плоский световод представляет полоску материала с высоким показателем преломления, которая окружена с двух сторон диэлектриком с меньшими показателями преломления. Толщина волновода может быть от долей до нескольких микрометров, а ширина — от единиц до сотен микрометров.

Волоконный световод представляет собой отдельное волокно или ряд определенным образом уложенных волокон, торцы которых хорошо отполированы. Отдельное волокно состоит из внутренней жилы *3* (рис. 19.14, *б*), выполненной из оптически прозрачного стекла с показателем преломления $n_ж$, и оболочки из стекла *1* с показателем преломления $n_{об}$. Обязательно должно выполняться соотношение $n_{об} < n_ж$, так как при этом будет обеспечено полное отражение света. Угол падения светового луча *2* на входной торец волокна составляет α, а угол между образующей цилиндра волокна и направлением светового луча — α_1. Оптическое волокно изготовляют методом двойного тигля (рис. 19.15, *а*). Стекло *1* с показателем преломления $n_ж$ плавят во внутреннем тигле *2* из платины, а во внешнем платиновом тигле *3* плавят стекло *4* с показателем преломления $n_{об}$. Стекла вытягивают из тиглей через отверстия в нижней части и наматывают на барабан. Волокно состоит из внутренней жилы ∅ 50 мкм и оболочки ∅ 150 мкм.

Схема процесса вытягивания волокна с полимерным покрытием показана на рис. 19.15, *б*. Заготовка *1* с помощью механизма подачи медленно перемещается вниз и поступает в нагревательное устройство *2*, где нижняя часть заготовки размягчается и перетягивается в волокно. При выходе из высокотемпературной зоны волокно быстро охлаждается и затвердевает. Затем оно поступает в фильеру *3*, где происходит наложение полимерного покрытия, которое является одновременно защитным и светоотражающим. Нанесенное на волокно покрытие полимеризуется при нагревании ультрафиолетовым излучением в печи *4*. Вытягивание волокна осуществляет устройство *5*. Готовое волокно наматывается на катушку в приемном устройстве *6*.

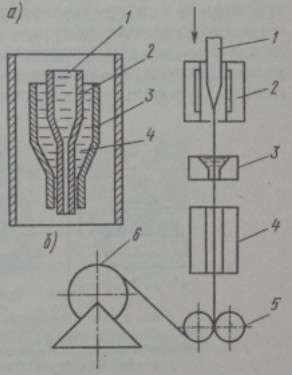


Рис. 19.15. Получение волокна: *а* — методом двойного тигля; *б* — с полимерным покрытием

Криогенная электроника. Эта электроника использует явление сверхпроводимости, состоящее в том, что электрическое сопротивление ряда материалов скачкообразно падает до нуля при охлаждении ниже некоторой температуры $T_к$, называемой *критической*.

Свойствами сверхпроводимости обладают многие чистые металлы — ниобий, свинец, тантал, олово, ванадий и др. Для построения криогенных интегральных схем вычислительной техники используется *эффект Джозефсона*. Он заключается в протекании сверхпроводящего тока через слой диэлектрика, разделяющего два сверхпроводника. Электроны проводимости проходят через диэлектрик (обычно пленку оксида металла толщиной ~10 Å) благодаря туннельному эффекту. Аналогичный эффект наблюдается, когда сверхпроводники соединены тонкой перемычкой (мостиком или точечным контактом), а также если между ними находится тонкий слой металла или полупроводника в нормальном состоянии. Такие системы вместе с контактами Джозефсона называют *слабо связанными проводниками* (рис. 19.16).

Состояние сверхпроводимости может быть разрушено внешним магнитным полем, если его напряженность достигнет некоторой величины, называемой *критическим* или *пороговым магнитным полем*. Это явление и положено в основу прибора — *криотрона*.

Основными элементами пленочного криотрона являются вентильная и управляющая пленки, выполненные из сверхпроводящих материалов и разделенные диэлектрической пленкой. Такой криотрон, выполненный из ниобия и тантала, может функционировать

при температуре жидкого гелия. Вентиль криотрона можно перевести из сверхпроводящего в нормальное состояние с помощью слабого магнитного поля, создаваемого небольшим по значению током управляющей пленки. На основе криотрона можно создавать элементы памяти. При этом используется свойство вентиля криотрона находиться в двух состояниях: сверхпроводящем и нормальном. Сверхпроводящее состояние соответствует коду 1, при этом в контуре циркулирует ток, нормальное состояние соответствует коду 0 — ток отсутствует, так как сверхпроводящее состояние нарушено. Элементы, созданные на основе переходов Джозефсона, обладают наивысшим быстродействием. Современный уровень технологии позволяет создавать криогенные

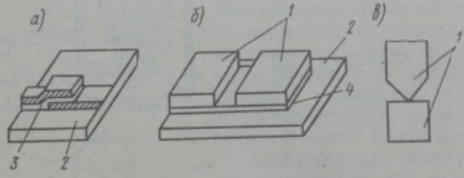


Рис. 19.16. Слабосвязанные проводящие структуры:
а — туннельный переход; *б* — мостик переменной толщины; *в* — точечный контакт; *1* — сверхпроводящие электроды; *2* — подложка; *3* — изолирующий слой; *4* — пленка мостика

микросхемы с числом элементов 10^3. Наиболее сложными вопросами производства таких схем являются создание сверхтонкого барьерного слоя (4 ... 8 нм) и сборка систем из отдельных узлов. Выполнение таких операций возможно только на специальном оборудовании с развитой системой датчиков, обеспечивающих контроль всех технологических параметров. Наиболее сложными являются процессы окончательной сборки, где высока вероятность повреждения отдельных деталей. Все приспособления для сборки конструируют так, чтобы никакие дополнительные силы, кроме вакуумного присоса, не действовали на детали.

Сверхпроводниковая микроэлектроника позволит создавать СБИС для нового класса ЭВМ с производительностью до 70 млн. опер/с, сверхбольшой памятью и меньшими габаритами. Стоимость таких машин будет в 5 ... 10 раз меньше существующих.

Большие перспективы для создания будущих ЭВМ открывает создание новых сверхпроводящих материалов. В настоящее время найдена комбинация из редких металлов, меди и кислорода, которая переходит в сверхпроводящие состояния при —180°С. Переход из технически сложной и дорогой «гелиевой» температурной области в «азотную» расширит область применения криогенных интегральных микросхем.

Магнитоэлектроника. Она использует эффекты взаимодействия доменов в магнитной среде. *Магнитные домены* представляют собой области, направления намагниченности которых противоположны направлению намагниченности остального материала. В тонком анизотропном кристаллическом слое диполи магнитных доменов стремятся занять параллельное или антипараллельное положение относительно приложенного магнитного поля.

Носителем цилиндрических доменов являются тонкие (1 ... 100 мкм) монокристаллические слои магнитоодноосных магнетиков из ортоферритов и феррит-гранатов. Ортоферриты имеют одну ось легкого намагничивания. Общая формула ортоферритов $MeFe_2O_3$

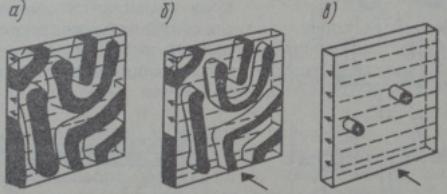


Рис. 19.17. Пластина ортоферрита при отсутствии внешнего магнитного поля (*а*), небольшом магнитном поле (*б*) и сильном внешнем магнитном поле (*в*)

или $Me_2O_3Fe_2O_3$, где М — ион редкоземельного элемента (туллия, тербия и др.). При отсутствии внешнего магнитного поля в пластине ортоферрита имеются домены змеевидной формы (рис. 19.17, *а*), одна половина которых намагничена в одном направлении, а другая половина — в обратном направлении и пластина размагничена. При воздействии на пластину постоянного магнитного поля вдоль оси легкого намагничивания (т. е. перпендикулярно поверхности) и постепенном повышении напряженности поля увеличивается площадь доменов одного направления намагниченности и уменьшается площадь доменов обратного направления намагниченности (рис. 19.17, *б*). Когда значение напряженности магнитного поля достигнет некоторого критического значения, площадь доменов одного направления вырастает до пределов пластины, а другого направления сжимается, превращаясь в цилиндрические магнитные домены (ЦМД) размером 50 ... 200 мкм (рис. 19.17, *в*). Управление движением ЦМД осуществляется при помощи тонких магнитных пленок, которым придают вид аппликаций, наносимых напылением через маску (рис. 19.18).

На ортоферритовой пластине или пленке образуются Т-образные и вертикальные полоски из пермаллоя. Размеры полосок по ширине не превышают диаметра домена, а зазоров между структу-

рами — долей диаметра. При размерах домена до 1 мкм зазоры между полосками уменьшаются до субмикронных размеров, что требует для получения полосок применения методов ЭЛЛ. Под действием вращающегося магнитного поля и постоянного поля (поля смещения) на концах пермаллоевых аппликаций образуются магнитные полюсы, с помощью которых осуществляется последовательное перемещение ЦМД. Изменение полюсов при вертикальном направлении внешнего поля происходит у Т-образных и вертикальных полосок. При горизонтальном направлении внешнего поля изменяются полюсы только на соответствующих частях Т-образных полосок. Если принять, что наличие домена в каждой точ-

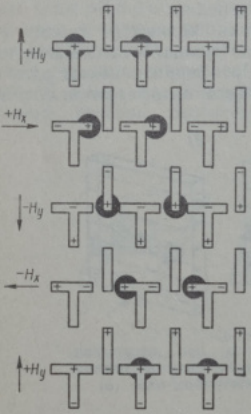


Рис. 19.18. Схема перемещения магнитных доменов

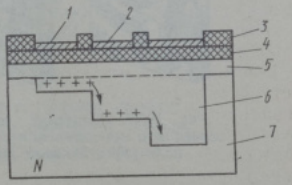


Рис. 19.19. Прибор с зарядовой связью:

1, 2 — электроды; *3* — диоксид кремния; *4* — слой диэлектрика; *5* — обедненный слой; *6* — потенциальная яма; *7* — подложка

ке соответствует логической единице, а его отсутствие — логическому нулю, то образуется память с последовательным доступом. Время обращения к памяти составляет несколько миллисекунд. Цилиндрические магнитные домены являются наиболее перспективными элементами для построения запоминающих устройств большой емкости.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС). Эти приборы применяют в сдвигающих регистрах ЭВМ. Основой прибора служит подложка N-типа, на которую нанесена пленка диоксида кремния толщиной ~0,1 мкм (рис. 19.19). На отдельных участках этого слоя достаточно близко друг к другу размещены металлизированные площадки, которые аналогичны затвору в МОП-транзисторе. Если к металлизированной площадке приложить отрицательный потенциал, то глубокий обедненный слой под электродом образует потенциальную яму, которая может получать и хранить заряд. Наличие

или отсутствие заряда в потенциальной яме можно рассматривать как два логических состояния в ПЗС.

Если приложить более высокий потенциал того же знака к соседнему электроду, то он вызовет образование в расположенной под ней области более глубокой потенциальной ямы и носители зарядов (дырки) перейдут в сторону второго электрода. Таким образом, для последовательного перемещения зазоров вдоль затворов достаточно двух значений напряжения и наличия на входе источника зарядов и детектора на выходе.

Для изготовления ПЗС используют кремний *N*-типа, ориентированный в плоскости (100). В таких приборах отсутствуют *P-N*-переходы, вследствие чего технология изготовления оказывается более простой.

Акустоэлектроника. Она связана с использованием механических резонансных эффектов, пьезоэлектрического эффекта, а также эффекта, основанного на взаимодействии электрических полей с волнами акустических напряжений в пьезоэлектрическом материале.

Пьезоэлектрические устройства используют для возбуждения с помощью электрических сигналов акустических (упругих) волн и обратного преобразования их в электрический сигнал. Такие устройства применяют в качестве линий задержки с большим временем задержки, используемых в вычислительной технике. Возбуждение и прием упругих волн обеспечиваются пьезоэлементами. Материалами пьезоэлементов служат природные пьезоэлектрические материалы (монокристаллы кварца, сегнетовой соли и др.) и искусственная пьезокерамика на основе титанита бария и др. Наибольшей добротностью обладают пьезоэлементы из кварца. В качестве электродов в пьезоэлектрических элементах используют металлические покрытия из серебра, золота, алюминия толщиной $\sim 0{,}5$ мкм.

Молекулярная электроника. Молекулярная электроника создана на основе последних достижений биохимии и микроэлектроники. Она основана на использовании органических соединений, подобных тем, которые имеются в живых организмах, для создания логических элементов.

В настоящее время разработаны базовые логические элементы (вентили), из которых можно построить все другие логические элементы — триггеры, счетчики — и в конечном счете всю вычислительную машину. Основой таких элементов являются п о р ф и р и н ы — важнейший класс органических молекул, содержащих в своей структуре ион металла. Такие молекулы играют важнейшую роль во многих биологических процессах переноса энергии. Порфирин является одним из существенных химических компонентов хлорофилла, вещества, которое обеспечивает преобразование растениями солнечного света, воздуха и воды в комплексные органические соединения, из которых состоят растения. Молекулы порфи-

рина определенной конфигурации могут вести себя как молекулярная электрическая цепь, включаемая светом. Сложные логические вычислительные устройства, созданные на основе молекулярной электроники, будут иметь очень малые размеры (~ 1 см^3), а их быстродействие будет в 800 раз и более выше быстродействия любого полупроводникового устройства.

В будущем молекулярная электроника станет естественным преемником кремниевой технологии.

19.5. Особенности производства микросхем

Современное производство полупроводниковых микросхем представляет собой комплекс большого числа сложнейших технологических и контрольных операций, для выполнения которых требуется около сотни единиц специального оборудования. Очень высокие требования предъявляются к качеству основных и вспомогательных материалов, точности оборудования и условиям производства.

Необходимыми условиями производства микросхем являются обеспечение в производственных помещениях стабильного микроклимата и высокой чистоты окружающей среды.

Микроклимат характеризуется температурой и относительной влажностью воздуха. Для помещений первой категории относительная влажность воздуха составляет (45±5) %, температура зимой 21 °С, а летом (23±1) °С.

Чистота воздушной окружающей среды определяется наличием пыли. В 1 л городского воздуха содержится $\sim 10^5$ взвешенных частиц, а в производственных помещениях допускается не более четырех частиц пыли со средним размером 1 мкм на 1 л воздуха.

Обеспечение требуемых условий в производственных помещениях достигается созданием специальных герметизированных зон, где обеспечивается многократная фильтрация поступающего воздуха, его подогрев или охлаждение. Отделка внутренних помещений производится материалами с высокой влаго- и эрозионной стойкостью. Доступ в герметизированную зону разрешается только узкому кругу непосредственных исполнителей в специальной одежде и обуви, не выделяющей пыли. Все исполнители должны строго соблюдать правила личной гигиены, не применять косметические средства и не вносить личные вещи.

При производстве БИС внутри герметизированных зон создают чистые комнаты, в которых предельные размеры пылинок не должны превышать 0,3 мкм. По мере перехода к СБИС потребовалось создание сверхчистых комнат, где допускается перепад температур в пределах ±0,1 °С, влажности в пределах ±1% и не более одной пылинки размером 0,1 мкм на 30 л воздуха.

Основным источником пыли в чистых помещениях является человек. Снижение загрязненности помещения потребует обеспече-

ния работающих специальной одеждой, не выделяющей пыли и снабженной устройствами, улавливающими продукты выдыхания.

Важным фактором снижения загрязненности является сокращение продолжительности технологического процесса на основе комплексной автоматизации с переходом к безлюдному производству.

Обеспечение необходимых требований к микроклимату и чистоте окружающей среды связано с большими затратами. Для снижения расходов на фильтрацию воздуха полупроводниковые предприятия располагают в зеленых зонах вне города. Операции технологического процесса, к которым предъявляются общие требования, целесообразно группировать в одном помещении. Отдельные сборочные операции выполняют в скафандрах, куда под небольшим давлением вводят очищенный и осушенный газ, что препятствует проникновению наружного воздуха в скафандр. Для обеспечения сборочных операций скафандр снабжают микроскопом.

Одной из важнейших проблем является контроль чистоты в технологических помещениях. Наиболее важными объектами контроля являются параметры микроклимата и характеристики аэрозольных частиц. В чистых технологических помещениях контролируются также степень освещенности, газовый состав воздуха, уровень вибрации и т. д.

Благоприятные условия для выполнения технологических операций имеются в космосе. Такие условия (невесомость, глубокий вакуум и др.) создать на Земле трудно или вообще невозможно.

При получении полупроводниковых материалов в состоянии невесомости существенно изменяются силы, действующие на материалы, и уменьшается роль тепловой конвенкции.

Первые технологические эксперименты по получению полупроводниковых материалов были проведены на космическом корабле «Союз» (1969 г.) и повторялись в последующие годы. На станции «Салют-7» была создана установка «Корунд», на которой были получены монокристаллические слитки арсенида галлия с более совершенной структурой.

Космическая технология имеет огромный потенциал. Она не только дополняет земную технологию, но и в перспективе имеет возможность разгрузить планету от целого ряда нежелательных производств.

Важной задачей является обеспечение безопасных условий работы на всех этапах производства микросхем.

В современных технологических процессах, связанных с производством полупроводниковых интегральных микросхем, применяются разнообразные ядовитые и взрывоопасные вещества (цианистый калий, плавиковая кислота, горячая серная кислота, водород и др.). При работе с ними надо соблюдать ряд мер предосторожности.

Плавиковая кислота может вызвать сильные ожоги, которые появляются не сразу. Она гораздо опаснее обычных кислот, кото-

рые оказывают немедленное действие. Плавиковая кислота представляет угрозу для оборудования, так как энергично вступает в реакцию со многими веществами. Ее следует хранить в специальной таре и работать с ней только при надежной защите рук, глаз и др.

Немедленным обжигающим действием отличаются азотная, соляная и серная кислоты. Добавление воды к концентрированным кислотам приводит к взрывным реакциям, в результате которых кислота разбрызгивается на большие расстояния. Действие подобных реакций возрастает при повышенных температурах.

Некоторые кислоты реагируют с цианистым калием с образованием ядовитого цианистого газа. Сам цианистый калий очень ядовит.

Жидкий азот и другие сжиженные газы при длительном воздействии могут вызвать обморожение. Кроме того, необходимо предусматривать ограждения от направленного взрыва больших сосудов, используемых для работы с жидким азотом.

Большую угрозу представляют используемые в диффузионных и эпитаксиальных процессах мышьяк, сурьма и фосфор. Они могут воздействовать на организм человека в виде паров, жидких или твердых соединений.

Соблюдение всех правил техники безопасности позволяет сделать производство полупроводниковых интегральных микросхем безопасным.

ГЛАВА 20
ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ЭВМ

20.1. Виды запоминающих устройств

Запоминающие устройства (ЗУ) цифровых вычислительных машин предназначены для записи, хранения и выдачи кодов чисел. Наиболее важными показателями ЗУ являются емкость и время обращения к ЗУ. Наряду с этим ЗУ характеризуются длительностью хранения информации, экономичностью, надежностью работы и габаритными показателями.

Наибольшее применение в настоящее время находят ЗУ с магнитной записью на носитель из материалов с прямоугольной петлей гистерезиса. Такие устройства отличаются большой емкостью и высокой скоростью записи информации.

Универсальные машины имеют два типа запоминающих устройств: внешние и внутренние (оперативные).

Внешние ЗУ по принципу действия и конструкции делят на устройства с последовательным поиском информации (магнитные ленты) и с произвольным обращением (магнитные барабаны, диски и карты). Устройство на магнитной ленте имеет боль-

шую емкость и малую стоимость хранения информации (в 10 ... 15 раз меньшую, чем при записи на магнитные барабаны), однако время поиска информации очень велико.

Надежность памяти на магнитных барабанах и дисках за счет бесконтактной записи выше уровня надежности устройств, осуществляющих запись при непосредственном контакте головки и носителя.

Магнитные барабаны широко использовались на первом этапе внедрения ЕС ЭВМ. В настоящее время они применяются ограниченно вследствие малого объема хранимой информации. Особенностью накопителя на магнитном барабане является малое время обращения к ЗУ и высокая надежность, что позволяет эффективно его использовать в вычислительных системах (например, в системе «Эльбрус»).

Наиболее перспективными являются устройства на магнитных дисках. По емкости хранимой информации они не уступают магнитным лентам, а стоимость хранения информации в них ниже, чем в магнитных барабанах. Запоминающие устройства на магнитных дисках позволяют осуществлять обмен записанной информации без перезаписи и создавать библиотеки информации.

Устройства на магнитных картах ввиду быстрого износа носителя и головок широкого применения не получили.

В качестве материала магнитного покрытия применяют ферролак, который состоит из магнитного порошка (75 ... 80 %), связующего вещества (12 ... 14 %) и пластификатора. Магнитным порошком служат оксиды железа Fe_2O_3 или Fe_3O_4, а иногда их композиция. Для получения более однородного покрытия зерна порошка должны иметь размер 0,3 ... 0,8 мкм. Лучшие результаты обеспечивает феррито-кобальтовый порошок, состоящий из смеси оксидов железа и кобальта (95 ... 80 % Fe_2O_3; 5 ... 20 % CoO_3).

Связующее вещество, удерживающее магнитное покрытие на основе, состоит из нитроколлодия, растворенного в спиртоацетоновой смеси, составленной в отношении 2 : 3. Пластификатор (обычно касторовое масло) придает ферролаку требуемую пластичность.

Ферромагнитные порошки характеризуются коэрцитивной силой (200 ... 650 А/м) и остаточной индукцией (4 ... 9 сТл). Повышение коэрцитивной силы уменьшает эффект саморазмагничивания, но затрудняет стирание записанной информации.

Основные недостатки ферролакового покрытия — низкая остаточная индукция и малая механическая прочность. Большую механическую прочность имеют гальванические покрытия из сплавов вольфрама, кобальта и никеля.

Физической основой магнитной записи является свойство ферромагнитных материалов сохранить состояние остаточной намагниченности после воздействия внешнего магнитного поля. Последнее создается посредством магнитной головки (рис. 20.1, *а*). Магнитопровод головки состоит из двух половин. На каждой половине

уложена обмотка. Одна обмотка служит для записи нуля, вторая — для записи единицы и считывания. Обмотки уложены так, что они создают противоположно направленные магнитодвижущие силы (МДС). Поэтому как ноль, так и единица записываются однополярными импульсами, направляемыми в ту или другую обмотку. Ток, проходя по обмотке записывающей головки, создает напряженность магнитного поля. Наиболее сильное магнитное поле образуется в месте разрыва (рабочем зазоре). Это поле воздействует на слой ферромагнитного покрытия, изменяя его состояние. После выхода намагниченного слоя из-под головки в силу остаточного магнетизма состояние слоя остается намагниченным, образуя магнитный диполь (магнит малых размеров). Располагаясь последовательно, диполи образуют магнитную дорожку. Плотность размещения магнитных диполей на дорожке зависит от скорости движения носителя и частоты импульсов тока. Задний зазор служит для уменьшения остаточного намагничивания сердечника.

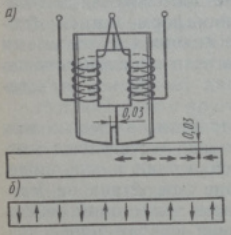


Рис. 20.1. Схема магнитной записи:
а — продольной; *б* — вертикальной (перпендикулярной)

При считывании информации в обмотке головки наводятся разнополярные импульсы. В промежутках между импульсами носитель остается размагниченным. Этот способ записи информации характеризуется малым уровнем шумов (помех), но требует специальных устройств для распознавания считываемого сигнала.

Часто применяется запись информации, при которой импульс тока, соответствующий единице, производит перемагничивание участка носителя; импульс тока, соответствующий нулю, не производит перемагничивания. Импульсы ЭДС при считывании соответствуют только единицам, а отсутствие ЭДС соответствует нулю.

Значительное увеличение информационной емкости ЗУ на магнитных носителях и снижение стоимости хранения информации обеспечивают новый метод вертикальной (перпендикулярной) магнитной записи. Сущность метода состоит в том, что намагниченные участки на носителе (магнитные домены) располагаются перпендикулярно поверхности носителя (рис. 20.1, *б*). Максимальная продольная плотность записи при этом ограничивается только толщиной магнитной стенки (несколько сотен ангстрем), разделяющей два отдельных магнитных домена. Теоретические пределы записи при вертикальном способе на порядок выше ($4{,}8 \cdot 10^5$ бит/мм^2), чем при горизонтальном способе записи ($4{,}0 \cdot 10^4$ бит/мм^2).

Перпендикулярную запись можно осуществить с помощью различных головок, но предпочтение отдается головкам с разнесенны-

ми полюсами, которые располагают по разные стороны носителя перпендикулярно его поверхности. Основной магнитный полюс контактирует с поверхностью носителя, а другой не соприкасается с носителем. Между полюсами головки создается магнитное поле, силовые линии которого располагаются перпендикулярно поверхности носителя. Воспроизводимость записи осуществляется с помощью обычных головок.

Внутренние (оперативные) ЗУ. Они выполняются на магнитных или полупроводниковых элементах. Долгое время оперативная память выполнялась на ферритовых сердечниках. За последнее десятилетие ферритовые оперативные ЗУ заменены полупроводниковыми, которые построены на биполярных и МОП-транзисторах.

Важными достоинствами полупроводниковых ЗУ являются высокое быстродействие, малая мощность сигналов записи и достаточно большая амплитуда считываемых сигналов. Это позволяет отказаться от наличия в составе ЗУ мощных формирователей токов записи и усилителей сигналов считывания.

В настоящее время ведутся работы в области создания полупроводниковых ЗУ с гистерезисными свойствами, которые способны сохранять заряды, накопленные на поверхности диэлектрических слоев, в течение нескольких месяцев и даже лет.

Наряду с широким внедрением полупроводниковых ЗУ проводятся экспериментальные работы по созданию оптоэлектронных, криогенных и других ЗУ.

20.2. Магнитные головки

Конструктивное выполнение магнитных головок весьма разнообразно и зависит от типа магнитного носителя и способа записи.

Для головок, работающих в ЗУ на магнитной ленте, весьма важное значение имеют состояние и длина рабочей поверхности, т. е. поверхности соприкосновения с лентой. Магнитная запись на барабанах и дисках бесконтактная, так что в процессе эксплуатации не происходит износа головки. При бесконтактной записи применяют плавающие головки, которые сохраняют стабильный зазор при определенной относительной скорости головки носителя. Подъемная сила, поддерживающая головку над поверхностью движущегося носителя, возникает в результате попадания воздуха, увлекаемого движущимся носителем под головку. Плавание головки обеспечивается за счет уравновешивания сил давления воздушной пленки, возникающей при вращении диска или барабана, и массы подвижных элементов.

Для одновременной записи на нескольких дорожках головки объединяют в блоки (рис. 20.2, *а*, *б*). Блок состоит из двух полублоков *1* и *2*, скрепленных винтами. В них установлено десять магнитных головок. Они состоят из двух сердечников *3* с обмотками *4*,

которые распаиваются на контакты *5*. Головки разделены экранирующими пластинами *6*. Рабочий зазор у стирающей головки составляет 0,1 ... 0,3 мм, а у записывающей и воспроизводящей — несколько микрометров. Значение зазора определяется прокладкой

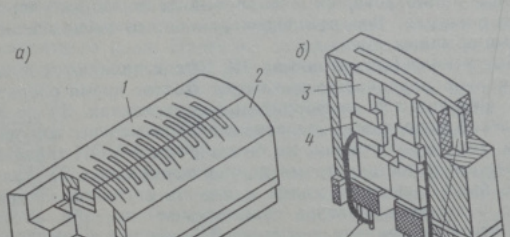


Рис. 20.2. Блок магнитных головок

из немагнитного материала (меди, бериллиевой бронзы и др.), которая устанавливается в месте соприкосновения двух половин сердечника магнитной головки и способствует вытеснению рабочего магнитного потока в процессе записи в зону носителя.



Рис. 20.3. Сердечник магнитных головок: *а* — из пермаллоя; *б* — из феррита; *1*, *4* — обмотки; *2*, *3* — магнитопровод

Сердечники магнитных головок изготовляют из железоникелевых сплавов (пермаллоев) и ферритов, а сердечники стирающих головок — из электротехнической стали (рис. 20.3).

Перспективным материалом для изготовления сердечников магнитных головок является группа материалов, называемых *аморфными металлическими* сплавами (АМС). Такие материалы имеют высокие магнитные свойства и низкие потери на вихревые токи. Аморфные металлические сплавы содержат так называемые *переходные металлы* Fe; Co; Ni и *аморфизаторы* (стеклообразователи) B; C; P и др.

Пермаллои марок 50НХС, 79НМ применяют в виде холоднокатаной ленты толщиной 0,05 ... 0,2 мм.

Изготовление пластинчатых сердечников магнитных головок состоит из следующих этапов: вырубки пластин, снятия заусенцев, термической обработки (отжига), сборки пластин в пакеты, притирки сердечников и намотки провода. Сборка пластин в пакеты осуществляется при помощи клея, который также изолирует пластины. В процессе сборки пластины не должны подвергаться ударам и изгибам.

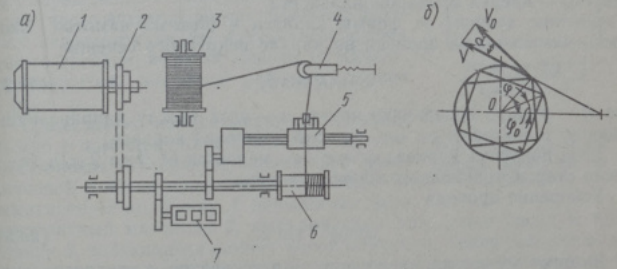


Рис. 20.4. Станок для открытых обмоток (*а*) и схема наматывания (*б*): *1* — двигатель; *2* — шкив; *3* — бобина с проводом; *4* — механизм натяжения; *5* — механизм раскладки провода; *6* — каркас; *7* — счетчик

Для получения требуемой толщины пакета пластины комплектуют, а затем склеивают клеем БФ-4 или эпоксидным (ЭКС-1; ЭКС-2 и др.). Склеивание осуществляется опусканием пакета на 5 ... 10 мин в клеящий состав. Толщина слоя клея составляет 0,1 ... 0,15 мм. Отверждение клеевых соединений производится при $t = 130 \ldots 150$ °С в течение 4 ч с охлаждением на воздухе.

Полусердечники после склеивания представляют собой монолитный пакет. Усилие отрыва каждой пластины составляет не менее 1,5 Н. Пакеты шлифуют по плоскостям разъема и боковым поверхностям, а затем притирают на вращающемся чугунном диске с абразивом.

Укладка провода ∅ 0,05 ... 0,08 мм на каждый полусердечник осуществляется на станках для рядовой намотки.

Конструкция станка должна обеспечивать вращение каркаса или оправки с необходимой скоростью; постоянное натяжение провода, которое должно быть в пределах упругих деформаций; автоматическую раскладку провода; регистрацию количества уложенных витков (рис. 20.4). Наиболее важным технологическим фактором при наматывании является натяжение провода. Высокое натяжение приводит к обрывам или значительному остаточному удлинению провода, что влечет за собой изменение его сечения и повреждение изоляции. Малое натяжение провода не обеспечива-

ет нужной плотности обмотки, вследствие чего возможно сползание ее с каркаса.

Оптимальное натяжение P_0 провода не должно превышать усилия, при котором появляются остаточные удлинения, и должно обеспечивать требуемую плотность обмотки. Обычно

$$P_0 = 0{,}69 P_{\text{пр}}, \tag{20.1}$$

где $P_{\text{пр}}$ — предел пропорциональности.

Натяжение зависит от формы каркаса и режима намотки. Скорость наматывания провода на каркас некруглого сечения

$$v = \omega R \cos \alpha, \tag{20.2}$$

где R — радиус описанного круга; α — угол между направлением провода и вектором v_0; ω — частота вращения каркаса.

Угол поворота каркаса $\varphi' = \varphi - \varphi_0$ меняется от 0 до $2\pi/n$ (n — число сторон правильного многоугольника).

Ускорение провода

$$a = \omega^2 R \sin \alpha. \tag{20.3}$$

За один оборот каркаса скорость и ускорение, а следовательно, и натяжение меняются 4 раза (рис. 20.4, *б*), так как угол изменяется в зависимости от угла поворота φ' каркаса.

Для выравнивания натяжения провода при наматывании применяют демпфирующие устройства.

Сборка блоков начинается с вклейки пакетов эпоксидным клеем. Затем плоскости разъема полублоков шлифуют до полного совпадения с плоскостью пакета. Обработка плоскости разъема является весьма ответственной операцией, которая определяет качество магнитной записи. Шероховатость обработки по плоскости разъема должна быть не ниже Ra 0,16 мкм, отклонение от плоскости — не более 0,002 мм.

Два собранных полублока соединяются винтами и штифтами. В процессе сборки устанавливается немагнитная прокладка заданной толщины, которая образует рабочий зазор.

Заключительная обработка блока магнитных головок включает в себя шлифование и доводку поверхностей, обращенных к носителю магнитной записи. При обработке этих поверхностей требуется обеспечить точность формы в пределах 0,3 ... 0,5 мкм, малую шероховатость поверхности, высокое качество рабочего зазора, отсутствие сколов и трещин. Формообразование сферических рабочих поверхностей производится алмазными пастами.

Вследствие различия физико-механических свойств материалов сердечника и корпуса при доводке происходит неравномерный съем материала. В результате этого корпус выступает из сердечника на величину 1,5 ... 2 мкм, что увеличивает зазор между сердечником и носителем магнитной записи.

Правильный выбор зернистости алмазной пасты и режимов доводки позволяет уменьшить «утопление» сердечника до 0,1 мкм.

Магнитные головки проверяют в условиях, близких к эксплуатационным в режимах записи и считывания. Проверка в режимах считывания производится путем определения значения сигнала при помощи осциллографа. Запись сигналов на носитель осуществляется импульсным током определенного значения и частоты. Наиболее часто встречающимся дефектом является недостаточная амплитуда воспроизводимого сигнала, которая зависит от качества покрытия, значения рабочего зазора и др.

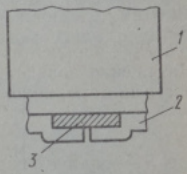


Рис. 20.5. Тонкопленочная магнитная головка

Существенно повысить плотность записи можно с помощью тонкопленочных магнитных головок. Устройство простейшей одновитковой головки показано на рис. 20.5. На немагнитную подложку *1* напыляется ферромагнитный материал *2*, выполняющий роль сердечника, и проводник *3*, являющийся одновитковой обмоткой. Такие головки обеспечивают лучшие частотные характеристики и имеют меньшую стоимость при массовом изготовлении.

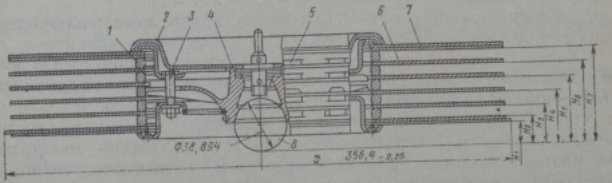


Рис. 20.6. Пакет магнитных дисков:

1 — вкладыш; *2* — тарельчатое кольцо; *3* — стягивающий болт; *4* — ступица; *5* — воздушное окно; *6* — рабочий диск; *7* — диск; *8* — базовый шарик

20.3. Накопители на магнитных дисках

Накопители на магнитных дисках являются основным типом внешнего ЗУ ЭВМ. Они представляют собой сложные конструкции, основными частями которых являются магнитные диски, привод, блок магнитных головок, механизм позиционирования и управления, электронные блоки и др. Функциональным элементом накопителей являются носители информации, которые реализуются в следующих вариантах: сменного пакета магнитных дисков, кассетного типа и гибких магнитных дисков.

Сменный пакет магнитного диска. Он является основным типом накопителя. Сменность магнитного диска расширяет емкостные

возможности накопителя, который может быть оснащен пакетами, содержащими 2, 4, 6, 12 и 20 дисков.

В накопителях, применяемых в ЕС ЭВМ, используют шестидисковые пакеты магнитных дисков. Такие пакеты имеют десять торцевых поверхностей для магнитной записи (рис. 20.6). Диски, вкладыши между ними и ступица, на которой собран пакет, должны иметь одинаковый коэффициент температурного расширения. Во вкладышах и ступицах предусмотрены воздушные окна, равномерно расположенные по окружности и имеющие общую площадь не менее 710 мм². Масса шестидискового пакета не превышает 4,7 кг. Пакет должен быть сбалансирован в плоскости, параллельной поверхности дисков.

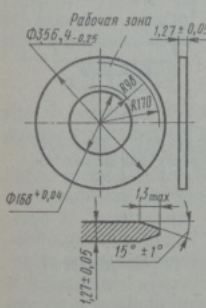


Рис. 20.7. Магнитный диск

Ступица, на которой крепятся диски, имеет внутренний конус, с помощью которого пакет устанавливается на вал механизма привода, обеспечивающего вращение дисков. Внутренние и наружные кромки рабочих дисков должны иметь фаски и галтели любого профиля в пределах размеров фасок, указанных на рис. 20.7.

Запись и считывание информации производится с помощью магнитных головок плавающего типа. Они крепятся на рычагах, которые перемещаются по радиусу дисков с помощью специального следящего привода.

В качестве материала для изготовления магнитных дисков обычно применяют алюминиевый сплав Д16МП (МП — магнитная память). Этот сплав немагнитный, мягкий, достаточно прочный, хорошо обрабатывается. Для уменьшения количества металлургических дефектов на поверхности диска сплав подвергают специальной очистке, например электрофлюсовому рафинированию с продувкой инертным газом.

Торцевые поверхности магнитных дисков покрываются магнитным слоем. Гальваническое магнитное покрытие имеет толщину до 1 мкм, а ферролаковое — до 5 мкм. Торцевые поверхности крайних дисков не используются для хранения информации. На каждой рабочей поверхности диска размещается 203 раздельных дорожек.

Плотность записи определяется значением зазора между диском и магнитной головкой; от стабильности зазора зависит качество записи (считывания). Для повышения плотности записи необходимо уменьшить зазор, однако при этом значительно повышаются требования к рабочей поверхности дисков. При малом зазоре и больших погрешностях в макрогеометрии поверхности имеют место значительные колебания амплитуды сигнала воспроизведения.

Для надежной работы накопителя на магнитных дисках необходимо обеспечить шероховатость поверхности $Ra<0{,}04$ мкм и минимальные микрогеометрические отклонения. Торцевое биение диска на диаметре 343 мм при частоте вращения пакета 40 1/с не должно превышать 0,3 мм, а удельная неплоскость — 1,5 мкм на длине 20 мм. Выполнение этих требований представляет значительные трудности.

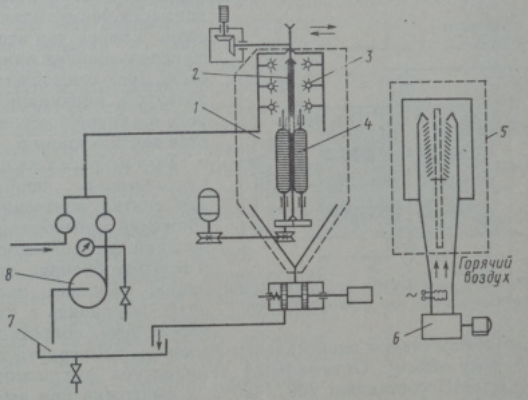


Рис. 20.8. Схема установки для подготовки торцевых поверхностей диска

Основными этапами технологического процесса изготовления магнитного диска являются получение заготовки, подготовка поверхности, терморихтование, токарная обработка, нанесение магнитного покрытия, уравновешивание, контроль.

Заготовку дисков получают из листового материала. Листы режут на карточки размером 400×400 мм на ножницах с наклонными ножами и прижимом материала. Из карточек вырубкой на штампе или токарном станке получают диски.

При вырубке зона металла, прилегающая к поверхности среза, упрочняется. Деформированный слой составляет примерно 0,3 толщины материала. Припуск на последующую токарную обработку должен превышать величину деформированного слоя. Для толщины материала 1,6 мм припуск составляет 1 мм, а при 2 мм — не менее 1,5 мм.

Размеры заготовки для магнитного диска, приведенного на рис. 20.7, составляют: наружный диаметр 358—0,2 мм, а внутренний диаметр 166 + 0,1 мм.

Подготовка поверхности заключается в обезжиривании, промывке в горячей проточной воде (t=60 °С в течение 1 ... 2 мин) и сушке. Она осуществляется на специальных установках (рис. 20.8). Диск *2*, находящийся в камере *1*, получает вращение и подвергается действию обезжиривающего раствора, а также протирается вращающимися щетками *4*. Раствор подается из бачка *7* насосом *8* и распыляется форсунками *3*. Чистая вода для промывки поступает из крана. Обезжиривающий раствор из камеры попадает через клапан обратно в бачок для вторичного использования или сливается. Диск сушится горячим воздухом, циркуляция которого в камере *5* осуществляется вентилятором *6*.

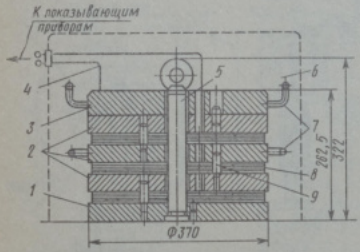


Рис. 20.9. Приспособление для закрепления магнитных дисков при терморихтовании

Терморихтование заготовок необходимо для снятия внутренних напряжений и обеспечения требований по неплоскостности и осевому биению. Эту операцию наиболее целесообразно выполнять в электрических печах сопротивления, которые обеспечивают минимальные перепады температур по всему рабочему объему. Оптимальная температура рихтования для сплава Д16МП составляет 400 ... 420°С, а выдержка при этой температуре — 3 ч. Скорость подъема температуры 40° С/ч, а скорость охлаждения не более 20°С/ч. Приспособление для закрепления дисков при терморихтовании показано на рис. 20.9. Заготовки дисков *8* помещают между алюминиевыми плитами *2*, имеющими ручки *7*. В каждом слое находится по пять заготовок. Положение заготовки на плите определяется тремя штифтами *9*, которые фиксируют заготовку по внутреннему диаметру. Штифты служат также для фиксации положения следующей плиты. Основание *1* и грузовая плита *3* выполняются из чугуна. Плита обеспечивает требуемое давление, которое на верхнюю заготовку составляет 0,02 ... 0,04 МПа. Стойка *5* имеет ушко, при помощи которого приспособление загружается в электрическую шахтную печь. Температура рабочего пространства *6* и приспособления контролируется термопарами *4*, установленными снаружи и внутри приспособления.

Контроль торцевых поверхностей дисков после терморихтования осуществляется с двух сторон бесконтактным (емкостным) методом.

Осевое биение измеряют при равномерном вращении со скоростью 0,2 м/с и с фиксированным положением датчика на одной из концентрических окружностей.

Непараллельность перемещения датчика по плоскости не должна превышать 0,001 мм.

Токарная обработка производится на станках повышенной точности в вакуумном патроне (рис. 20.10).

Основными частями патрона являются планшайба *1* и корпус *2* со сменным кольцом *3*. Через отверстия *4* полость *6* соединена с канавками *5*, находящимися на торцевой поверхности планшайбы. За счет разности атмосферного давления воздуха и давления внутри планшайбы заготовка диска прижимается к выступам, удерживая диск на планшайбе за счет сил трения. Для съема диска полость планшайбы соединяют с окружающей атмосферой. Значение разрежения составляет от 0,05 ... 0,08 Па. Обточка наружного и внутреннего диаметров, а также фасок производится при числе оборотов шпинделя от 700 до 900 об/мин и подаче до 0,1 мм/об.

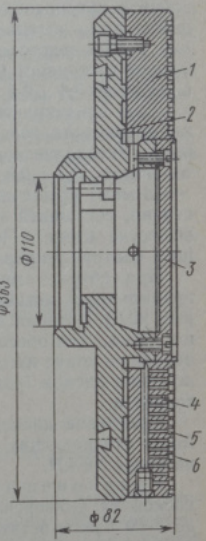


Рис. 20.10. Вакуумный патрон

Обработка торцевых поверхностей осуществляется алмазным резцом. Окончательная обработка выполняется при следующих режимах: число оборотов шпинделя — 900 ... 1400 об/мин, подача — 0,08 ... 0,18 мм/об, глубина резания — 0,01 ... 0,03 мм.

Нанесение магнитных покрытий на алюминиевые сплавы достаточно сложно, так как на поверхности их образуется прочная и легко восстанавливаемая пленка, препятствующая хорошему сцеплению магнитного покрытия с основой диска. Кроме того, нанесение электролитических покрытий на алюминий затрудняется вследствие высокого отрицательного электрохимического потенциала алюминия.

Подготовка поверхности диска перед нанесением покрытия заключается в очистке ее моющим раствором при $t = 55 \ldots 65$ °С и обработке в ортофосфорной кислоте для получения оксидной пленки. Последняя защищает поверхность алюминиевого сплава от растравливания электролитом и обеспечивает высокую адгезию с металлом подслоя. В качестве подслоя применяют медь, которую наносят гальваническим способом.

Магнитное покрытие, нанесенное по медному подслою, обеспечивает малый ток записи, высокую амплитуду считываемого сигнала и практически бездефектное покрытие.

Толщина медного подслоя составляет ~15 мкм. Чистота поверхности после нанесения медного подслоя ухудшается и для ее восстановления применяется полирование алмазной пастой. При полировании толщина подслоя уменьшается на 1 ... 3 мкм.

Подслой и магнитное покрытие наносят электролитическим способом в приспособлении, которое обеспечивает подвод тока и вращение диска в гальванической ванне. Вращение диска необходимо для равномерного осаждения покрытия. Толщина магнитного покрытия составляет 1,3 ... 1,7 мкм. Последующее полирование уменьшает ее до 0,4 ... 0,6 мкм.

Для предохранения магнитного носителя от механических и климатических воздействий на торцевые поверхности дисков наносят металлическое защитное покрытие (хром, палладий и др.) толщиной 0,4 ... 0,8 мкм. При малых зазорах плавания (до ~0,8 мкм) применяют защитные покрытия на основе лаковой суспензии, состоящей из наполнителя (оксида цинка) и связующего вещества (лака). Покрытие наносят методом полива с последующим центрифугированием.

При сборке сменного пакета дисков необходимо обеспечить правильность установки дисков по высоте (размеры H_1, H_2 на рис. 20.6), которая зависит от точности выполнения конуса ступицы диска. Для обеспечения взаимозаменяемости пакета дисков необходимо конус изготовлять с точностью $\pm 20''$. Для измерения положения дисков (размеры H_1, H_2) надо применять шарик высокой точности.

Крепление дисков в пакете осуществляется кольцами при помощи стягивающих болтов. Усилие затяжки болта должно быть не менее 0,6 кН.

Уравновешивание осуществляют после сборки пакета дисков на универсальных балансировочных станках с точностью до $1 \cdot 10^{-4}$ кг·м остаточной неуравновешенности.

Контроль параметров воспроизводимых сигналов осуществляется осциллографом.

Пакеты дисков подвергаются испытаниям на сохраняемость записанной информации при длительной работе в режиме считывания. Климатические испытания производятся при пониженной (—50 °С) и повышенной (+50 °С) температурах, а механические — при вибрационных и ударных нагрузках. После каждого вида испытаний производится визуальный осмотр пакета с проверкой параметров считываемой информации.

Проверка на взаимозаменяемость осуществляется на нескольких накопителях, на которые последовательно устанавливается пакет дисков. При этом информация, записанная на дисках, должна без сбоев воспроизводиться на всех накопителях.

Накопители кассетного типа. Такие накопители содержат два диска: постоянный и сменный. Постоянный диск закреплен на оси

приводного двигателя, а сменный — на шпинделе. Пластмассовый кожух кассеты, в которой постоянно находится сменный диск, имеет прорези для ввода магнитных головок.

Накопители на гибких магнитных дисках (рис. 20.11). Их применяют в микроЭВМ. Гибкий диск *6* изготовляют на лавсановой основе. На торцевых поверхностях диска создают магнитное покрытие из ферролака. Диск постоянно находится в кассете *5*. Диск при установке на ступице *7* прижимается втулкой *4* и пружиной *3*. Для ввода магнитной головки *1* в кассете имеется прорезь. Контактирование диска с магнитной головкой обеспечивается прижимом *2*, который установлен на подвижной каретке *8*. Привод каретки обеспечивается шаговым двигателем *10*, который вращает ходовой винт *9*. Вращение ступицы обеспечивается электродвигателем через ременную передачу. Гибкий диск имеет диаметр 203,2 мм, на одной стороне которого записана информация.

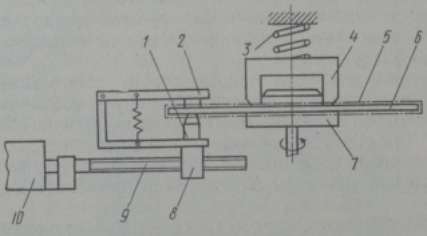


Рис. 20.11. Накопитель на гибких магнитных дисках

Накопитель винчестерского типа. Он построен на жестких дисках. Его особенность состоит в том, что основные функциональные узлы (магнитный диск, блок магнитных головок и др.) имеют нерасчленяемое конструктивное исполнение и вместе с электродвигателем размещаются в герметичном корпусе. Винчестерские накопители с дисками диаметром 356 и 203 мм используются в мини-ЭВМ, а с диаметром 123 мм — в микроЭВМ. Такие накопители имеют высокую надежность (наработка на отказ составляет 8 ... 10 ч).

● Примечание. В ближайшее время в качестве внешней памяти вычислительных систем для хранения больших массивов информации будут использоваться накопители на оптических дисках. Информация на нем записывается и считывается в двоичном коде с помощью лазерного луча. Информационным слоем служит золотая пленка, нанесенная на пластмассовый диск. При записи информации луч лазера разогревает подложку и на пленке образуется бугорок, служащий логической 1. В качестве информационного слоя может применяться сплав на основе теллура, в котором прожигаются отверстия, служащие логическими 1. Привод, механические и другие узлы оптических ЗУ аналогичны обычным накопителям на магнитных дисках.

Перезапись на оптических дисках невозможна, и для них рекомендуются области применения, где обновление информации требуется очень редко (например, архивные ЗУ).

20.4. Накопители на магнитных барабанах

Накопители на магнитных барабанах имеют сложные конструкции (рис. 20.12) с высокими требованиями к точности геометрической формы ротора, качеству его поверхности, неуравновешенности и др. Эти требования обусловливаются наличием вращающегося магнитного носителя и малыми зазорами между рабочей поверхностью ротора и магнитными головками.

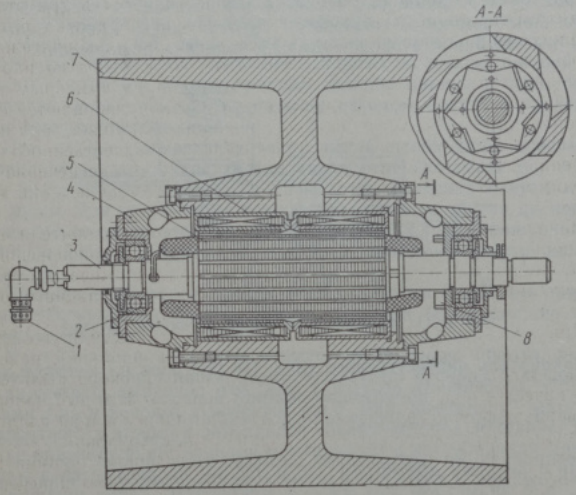


Рис. 20.12. Ротор накопителя на магнитном барабане:
1 — вилка; *2* — подшипник; *3* — неподвижная ось; *4* — крышка; *5* — статор; *6* — ротор; *7* — корпус ротора, *8* — крыльчатка

Основой конструкции магнитного барабана является ротор, который изготовляют из немагнитного материала (обычно алюминиевых сплавов Д-16, АК-6 и др.). Эти сплавы обладают высокими механическими свойствами, имеют малый коэффициент линейного расширения и хорошо обрабатываются ковкой и резанием.

На наружную цилиндрическую поверхность ротора наносят медное (0,3 мм) и магнитное (1 ... 5 мкм) покрытия. В качестве

магнитного покрытия применяют ферролак или гальванические покрытия на основе кобальта с вольфрамом и др. На ротор с напрессованной латунной гильзой наносится только магнитное покрытие.

Для ускорения записи и считывания информации желательно повышать скорость вращения ротора. Она составляет 20 ... 35 м/с. При высоких скоростях и малых зазорах между магнитными головками и поверхностью ротора требуется весьма высокая точность изготовления барабана и необходимость динамического уравновешивания вращающихся частей. Высокие требования предъявляются к подшипникам.

Заготовку ротора получают ковкой или горячей штамповкой. Механическая обработка заготовки осуществляется в три этапа: предварительная обточка заготовки, чистовая обработка ротора с запрессованными секциями электродвигателя и окончательная обточка после сборки. Окончательную обточку ротора по наружному диаметру производят в собственных опорах алмазным резцом на токарных или фрезерных станках. Станки оснащаются приспособлениями для установки и крепления барабана, а также режущего инструмента. Важнейшим условием качественного выполнения окончательной обточки ротора является обеспечение необходимой жесткости системы «станок — приспособление — инструмент».

Важнейшее значение для качественной работы накопителя имеют операции уравновешивания ротора. Статическое уравновешивание выполняют на опорных ножах или осях, а динамическое уравновешивание — на рабочей частоте вращения на собственных опорах.

При нанесении ферролакового покрытия осуществляют операции подготовки поверхности (промывку, обезжиривание), нанесение подслоя и покрытия. При этом используют краскораспылитель.

В качестве подслоя применяют спиртовой лак, который наносят пульверизатором на вращающийся барабан. Образования гладкой и ровной поверхности достигают полированием войлоком.

Ротор вращается со скоростью 5 ... 6 м/с. Общая толщина покрытия составляет 60 ... 70 мкм. Она образуется путем нанесения 6 ... 8 слоев покрытия с сушкой в течение 6 ... 10 мин после нанесения каждого слоя. Сушка после нанесения всех слоев продолжается в течение 18 ч при вращающемся роторе.

Для удаления раковин и неровностей покрытие протачивают алмазным резцом и полируют тончайшей шкуркой. При этом снимают слой толщиной 15 ... 20 мкм.

Покрытие поверхности ротора сплавом «кобальт — вольфрам» при толщине 8 ... 10 мкм обладает высокой механической прочностью. Нанесение его производят гальваническим путем. Поверхности, не подлежащие покрытию, защищают химически стойким лаком.

После нанесения магнитного покрытия проверяют шероховатость поверхности ротора, магнитные характеристики материала покрытия, параметры сигналов считывания (амплитуду и длительность импульса).

Для определения сигналов считывания на поверхность ротора записывают серию импульсов. Считывание производится при подключении контактов магнитной головки к входу осциллографа.

20.5. Накопители на магнитной ленте

Накопители на магнитной ленте могут хранить большие массивы информации. Запоминающей средой является *магнитная лента*, которая представляет собой эластичную основу толщиной 40 ... 60 мкм из ацетилцеллюлозы, поливинилхлорида и других материалов, на которую нанесен слой ферролака толщиной 10 ... 20 мкм. Ленты на пластмассовой основе имеют малую массу, обладают большой гибкостью и допускают возможность склеивания. Емкость определяется поверхностью ленты и плотностью записи.

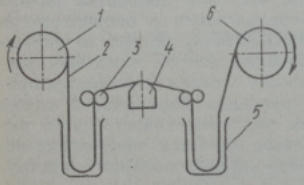


Рис. 20.13. Лентопротяжный механизм

Магнитные ленты, используемые в вычислительной технике, обычно имеют ширину 12,7 мм (ГОСТ 20958—80), в ряде случаев ширину 35; 25,4 и 19 мм, а в кассетных накопителях — 3,81 и 6,25 мм. Для универсальных ЭВМ рекомендуется лента длиной 742, 370, 180 и 90 м. Лента шириной 3,81 мм имеет толщину 18, 12 и 9 мкм. На ленте шириной 12,7 мм располагается девять дорожек. Девятая дорожка может использоваться для контроля и синхронизации.

Поперечная плотность записи определяется шириной дорожек и составляет 1,2 ... 1,6 мм. Продольная плотность записи составляет 20 ... 30 имп/мм. Плотность продольной записи ограничивается влиянием полей, создаваемых смежными намагниченными участками ленты.

Максимальная скорость движения магнитной ленты составляет 4 м/с, средняя скорость — 2 м/с. Применение высоких скоростей ограничено возможностью обрывов ленты при пусках и реверсировании.

Подготовка ленты к записи заключается в размагничивании при помощи стирающей головки. Основным устройством, от которого зависит качество всего накопителя, является лентопротяжный механизм (рис. 20.13). Во время работы лента *2*, перематываясь с катушки *1* на катушку *6* при помощи ведущих роликов *3* лето-

протяжного механизма, перемещается относительно блока магнитных головок *4*, касаясь его в области рабочих зазоров магнитных головок. Инерционность катушек с лентой компенсирует специальный демпферный узел *5*. Запись и считывание производят головки, расположенные по линии, перпендикулярной движению носителя. Каждой головке соответствует своя дорожка на ленте, и запись производится параллельно-последовательно. Лентопротяжный механизм при большой скорости (1 ... 4 м/с) равномерного перемещения ленты должен обеспечить быстрый разгон и полную остановку ленты за 5 ... 10 мкс. Увеличение времени разгона и торможения снижает емкость ЗУ вследствие больших промежутков между зонами записи информации.

На электромагнитные свойства носителя существенно влияет толщина ферромагнитного покрытия. Уменьшение толщины покрытия влечет за собой увеличение плотности записи. Для порошковых носителей достигнута толщина слоя порядка 2 ... 8 мкм. Дальнейшее уменьшение толщины покрытия представляет сложный процесс. Поэтому появились разработки металлизированных магнитных лент с толщиной покрытия 0,1 ... 0,5 мкм. Такие ленты обладают высокой магнитной индукцией и почти прямоугольной петлей гистерезиса. В качестве покрытия используют сплавы Co — Mo или Co — Mo — Ni, которые наносят гальваническим способом или напылением в вакууме. В качестве основы ленты используется полиэтилентерефталат.

Другим направлением в создании новых магнитных лент является разработка многослойных лент (с двумя слоями и более). Для нижних слоев применяют магнитный материал Fe_2O_3, для верхних слоев — CoFeO; CrO. Толщина слоев может быть одинакова или верхний слой меньше. Общая толщина находится в пределах 8 ... 10 мкм.

20.6. Полупроводниковые запоминающие устройства

Основной частью полупроводникового ЗУ является БИС. Она содержит матрицу-накопитель и функциональные узлы, необходимые для усиления сигналов при записи и считывании, обеспечения режима синхронизации и др. Микросхемы памяти делят на две группы: для оперативных (ОЗУ) и постоянных (ПЗУ) запоминающих устройств.

Оперативные запоминающие устройства. По способу хранения информации ОЗУ разделяют на статические и динамические.

В статических ОЗУ элементами памяти являются триггеры. Они могут хранить информацию неограниченное время при условии сохранения напряжения питания.

В динамических ОЗУ запоминающим элементом служит конденсатор. Логический 0 означает отсутствие электрического заряда, а логическая 1 — его наличие. Динамические ОЗУ обеспечи-

вают высокий уровень интеграции и быстродействие. Недостатками являются необходимость периодической регенерации конденсатора, который самопроизвольно разряжается, и необходимость в различных номиналах питающих напряжений.

Постоянные запоминающие устройства. По способу записи информации ПЗУ делят на масочные, программируемые и репрограммируемые.

Масочные ПЗУ программируются в процессе изготовления БИС.

Программируемые ПЗУ имеют возможность однократной записи нужной информации у потребителя путем разрушения элементов структуры ПЗУ. Для этого прожигают плавкие перемычки путем пропускания через них тока необходимого значения. Плавкие перемычки изготовляют из сплавов титана с вольфрамом, поликремния и др.

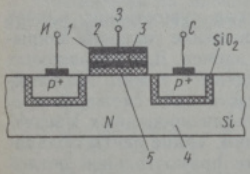


Рис. 20.14. МОП-транзистор с двухслойным диэлектриком

Репрограммируемые ПЗУ строят на основе структур «металл — нитрид кремния — оксид кремния — полупроводник» (МНОП). Такая структура представляет собой МОП-транзистор с двухслойным диэлектриком под алюминиевым затвором (рис. 20.14). Нижний, примыкающий к полупроводнику слой диоксида кремния *5* толщиной 3...4 нм «прозрачен» для электронов. Если к затвору относительно подложки приложить импульс напряжения положительной полярности, то под действием сильного электрического поля между затвором и подложкой *4* электроны приобретают достаточную энергию, чтобы пройти через тонкий слой диэлектрика *5* до границы раздела *3* двух диэлектриков. Верхний слой нитрида кремния *2* имеет значительную толщину, которую электроны преодолеть не могут. Логическому нулю соответствует состояние транзистора без зарядов на диэлектрике. При подаче напряжения на затвор *1* при записанной единице транзистор откроется, а при нуле останется в закрытом состоянии. Такие ПЗУ позволяют сохранять информацию при отключении питания.

Микросхемы памяти реализуются в составе серий микросхем общего применения (К155, К500 и др.) или в составе специальных серий.

Перспективным материалом для изготовления ПЗУ являются халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП), которыми называют стекла, в состав которых входит хотя бы один элемент VI группы (сера, селен, теллур). По своим параметрам элементы, построенные на основе ХСП, превосходят МОП-структуры. Они имеют высокое быстродействие (на порядок выше, чем МОП-структуры), большую надежность, способность неограниченно дол-

го сохранять информацию при отключенном источнике питания, более низкое пороговое напряжение, меньшие токи записи и др.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют ХСП на основе эвтектических систем G — Te; As — Te с различными добавками.

Несмотря на значительные успехи в области исследования стеклообразных проводников, разработка промышленных образцов репрограммированных ПЗУ остается сложной задачей, так как необходимо решить ряд комплексных вопросов, связанных с технологией, испытаниями и др.

ГЛАВА 21
НАЛАДКА И КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

21.1. Наладка опытных и серийных изделий

Наладка заключается в том, чтобы не изменяя схемы и конструкции получить оптимальные значения выходных параметров, удовлетворяющих техническим условиям. Она осуществляется за счет изменения значения одного или нескольких первичных параметров.

Наладка схемы может выполняться с помощью предусмотренных в конструкции настроечных элементов (например, потенциометров) или путем подбора какого-либо из элементов конструкций, влияющего на выходной параметр.

При массовом и серийном производстве наладка устраняет ошибки монтажа и изготовления отдельных элементов.

Наладка опытной аппаратуры позволяет выявить ошибки в схеме и конструкции. Замена отдельных неудачных схем, конструкций и элементов, выявленных в процессе наладки макетов или первых образцов, позволяет повысить надежность устройства. Наладка опытной аппаратуры значительно сложнее, чем серийной. В этом случае наладчику неизвестно, может ли вообще налаживаемое устройство в данном схемном и конструктивном оформлении надежно функционировать.

При наладке схемы приходится выполнять самые разнообразные электрические измерения, по результатам которых оцениваются параметры схемы и отдельных элементов.

При выборе измерительных приборов необходимо исходить из заданной точности, определяемой поставленной задачей. Например, при лабораторных измерениях и исследованиях точность должна быть выше, чем при наладке в условиях серийного производства. В первом случае надо оценить работу схемы, а во втором — соответствие техническим условиям.

Выбор измерительных приборов с высокой точностью измерения нецелесообразен, так как более точные приборы сложнее и

работа с ними менее производительна. Кроме того, они имеют большие габариты, вес и значительно более высокую стоимость.

Однако совершенно недопустимо применение приборов, не обеспечивающих требуемую точность измерений. Для измерения выбирают приборы одинаковой точности (с одинаковыми допустимыми погрешностями). При этом допустимую погрешность в определении результата необходимо разделить на число приборов.

Стрелочные приборы делят на пять классов: 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5. Приведенные цифры указывают погрешность, выраженную в процентах от максимального значения шкалы. Так, прибор класса 0,5 на шкале 0 ... 300 В гарантирует точность измерения $\pm 0{,}5$ %, т. е. 1,5 В, причем эта погрешность сохраняется на протяжении всей шкалы. Таким образом, при измерении напряжения, например, порядка 1,5 В (на той же шкале) ошибка составит ± 100 %. При работе с прибором надо использовать такой диапазон, чтобы его показания, соответствующие измеряемой величине, лежали во второй половине шкалы, а не в начале, при этом относительная погрешность будет меньше. При оценке точности измерения необходимо также учитывать дополнительные ошибки, вносимые в результате измерений вследствие влияния подключаемых приборов на налаживаемое устройство.

Подключение измерительных приборов создает новую систему, процессы и режимы в которой отличны от процессов и режимов до подключения приборов. Любой измерительный прибор с соединительными проводами имеет входное сопротивление. Соединительные провода емкостно и индуктивно связаны между собой и с элементами проверяемой схемы.

Для уменьшения влияния подключаемых приборов надо ослаблять их связь с проверяемой схемой. Это можно сделать, например, путем подключения приборов через небольшие емкости, но при этом нарушается градуировка приборов и необходима их юстировка.

Внешние паразитные связи и наводки можно уменьшить правильным расположением приборов и измеряемой схемы. Приборы для измерения сигнала надо располагать соответственно его распространению. Например, если измеряют входное и выходное напряжения, то выходной вольтметр должен быть расположен ближе к выходу, а входной — к входу.

Точная аналитическая оценка погрешностей измерения, вносимых вследствие подключения измерительных приборов, практически трудно выполнима. Однако даже примерные расчеты помогают уточнить отдельные неясные вопросы.

При экспериментальных исследованиях влияние подключения измерительных приборов можно оценивать по выходному параметру всего устройства. Например, при наладке усилителя влияние подключения измерительного прибора в любой точке схемы оцени-

вается по изменению показаний прибора, включенного на выходе схемы при неизменном входном напряжении.

При наладке сложных схем измерительные приборы подключают на все время наладки и настраивают схему по этим приборам. После окончания наладки приборы постепенно отключают, проводя поднастройку для компенсации погрешностей, внесенных отключением очередного прибора. Если оценка влияния приборов по выходному параметру невозможна, то включают одновременно несколько приборов к разным точкам схемы и, поочередно отключая их, наблюдают изменения показаний оставшихся приборов.

Для упрощения измерений при наладке надо подбирать такие комплексные параметры, которые однозначно характеризуют исправное функционирование изделия. Соответственно принятым комплексным параметрам выбирают измерительные приборы, при помощи которых можно осуществить прямые (без промежуточных вычислений) измерения. Прямые измерения, как правило, имеют меньшую погрешность и повышают производительность труда при наладке.

21.2. Контроль электроэлементов

Электроэлементы перед монтажом подвергают контролю. Тип аппаратуры для контроля во многом зависит от серийности производства. При небольшом количестве электроэлементов, подлежащих контролю, используют стандартную измерительную аппаратуру. Однако в ряде случаев стандартная аппаратура не обеспечивает требуемой точности измерения, а для контроля ряда параметров электроэлементов стандартной измерительной аппаратуры вообще не существует. В этом случае проектируют специальные приборы или стенды.

Повышение производительности при контроле достигается с помощью приборов, шкалы которых градуированы в соответствии с граничными значениями параметров каждой группы, или применением специальных автоматических устройств. В последнем случае после настройки автомата задачей оператора является наполнение загрузочного устройства и периодическое наблюдение за работой автомата.

Электрические параметры интегральных схем проверяют в статических и динамических режимах.

Статический режим. Статическими параметрами цифровых интегральных микросхем являются ток потребления при высоком и низком уровне выходного напряжения, выходной ток низкого и высокого уровня, напряжение блокировки, выходное напряжение высокого и низкого уровня, выходной ток высокого уровня и ток выключенного состояния, ток короткого замыкания и др.

Метод измерения статических электрических параметров основан на прямом измерении физической величины параметра (напря-

жения, тока и т. п.) в заданной точке характеристики микросхемы (входной, выходной, передаточный и др.) в установившемся электрическом режиме или логическом состоянии любым приемлемым методом (амперметра, вольтметра и т. п.), соответствующим измеряемой физической величине параметра и обеспечивающим заданную точность измерения. Последующие измерения обеспечивают проверку функций или части функций, выполняемых микросхемой. Состояние на выводах микросхем должно соответствовать выполняемым функциям.

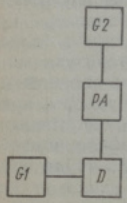


Рис. 21.1. Схема измерения тока потребления микросхем: *PA* — измеритель тока

Измерения статических параметров интегральных микросхем принципиально не отличаются от измерения токов и напряжений в обычных цепях постоянного тока. Особенностью таких измерений является необходимость жестко поддерживать заданные режимы. Точность установки напряжений и токов питания составляет $\pm 1\%$ для источников переменного тока. Структурная схема установки для измерения тока потребления при высоком и низком уровнях выходного напряжения показана на рис. 21.1.

На микросхему D подают напряжение питания от источника G2 и входные напряжения от источника G1, значения которых установлены в стандартах или ТУ на микросхемы конкретных типов. Ток измеряют измерителем PA. Схемы установок для измерения других статических электрических параметров приведены в ГОСТ 18683.1—83.

Автоматизированные установки для контроля статических параметров интегральных схем можно разделить на аналоговые, цифровые и цифроаналоговые.

Аналоговые установки (рис. 21.2). В таких установках программа контроля задается в виде уровней напряжений и токов отдельно по каждому тесту. Уровни устанавливают вручную перед началом контроля в устройствах заданий режимов *3* и граничных значений *2*. Контролируемый параметр подается на проверяемую интегральную схему *4*, откуда поступает в устройство измерений *5* и аналоговое устройство *6* для сравнения с граничным значением параметра. Управление подачей уровней осуществляется от устройства *1* автоматического распределения тестовых импульсов. Результат сравнения по каждому тесту в форме «годен — не годен» высвечивается в устройстве индикации *7* и сохраняется до конца контроля. Применение метода сравнения дает значительные преимущества перед методом измерения в отношении быстродействия.

Аналоговые установки могут быть собраны из стандартных приборов, что является их преимуществом. Недостатком аналоговых установок являются громоздкость, так как на каждый испы-

тательный уровень необходим отдельный источник напряжения или тока, подверженность аналоговых сигналов влиянию помех, малое быстродействие, невысокая точность измерения и регистрации.

Цифровые установки (рис. 21.3). В цифровых установках программа контроля по каждому тесту задается в виде цифровых кодов, поступающих от устройств программирования и управления *1*. Цифровые коды преобразуются в испытательные уровни с помощью преобразователей *2* «код — аналог», представляющих собой программируемые источники напряжений и токов. Программа коммутации, выраженная также в виде кодов, расшифровывается дешифратором и выполняется с помощью реле в устройстве коммутации *3*. Контролируемый параметр микросхемы *4*, преобразованный на ее выходе преобразователем *5* «аналог — код», подается в устройство индикации и регистрации *6*, а также на цифровое устройство сравнения *7* с граничным значением, поступающим в цифровой форме от устройства программирования. Результат сравнения поступает на устройство классификации.

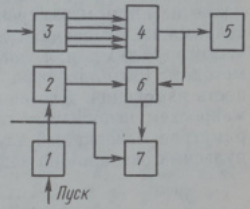


Рис. 21.2. Структурная схема аналоговой установки для контроля статических параметров интегральных микросхем

Цифровая форма обработки информации имеет следующие преимущества: удобство ввода и вывода информации, более высокая точность устройства сравнения и простота конструкции, так как отпадает необходимость в многочисленных источниках испытательных уровней и граничных значений.

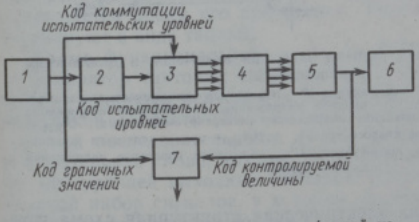


Рис. 21.3. Структурная схема цифровой установки для контроля статических параметров интегральных микросхем

Однако к преобразователям установок с цифровой обработкой предъявляют высокие требования в отношении точности и быстродействия. Кроме того, для цифрового устройства сравнения необходимо иметь по одной входной линии для каждой цифры сравнения.

Аналого-цифровые установки. Наиболее целесообразно сочетание в одной установке цифровых и аналоговых устройств.

Динамический режим. Динамическими параметрами интегральных цифровых микросхем являются время задержки включения и выключения и время задержки распространения сигнала и перехода при включении и выключении.

Метод измерения динамических электрических параметров основан на прямом измерении интервала времени между заданными точками на огибающих импульсных сигналов при смене электрического режима или логического состояния любым приемлемым методом (осциллографа и др.), обеспечивающим заданную точность измерения. Для синхронизированных функциональных типов микросхем используют также метод измерения динамических параметров, основанный на измерении частоты последовательных импульсных сигналов на заданном выводе микросхемы.

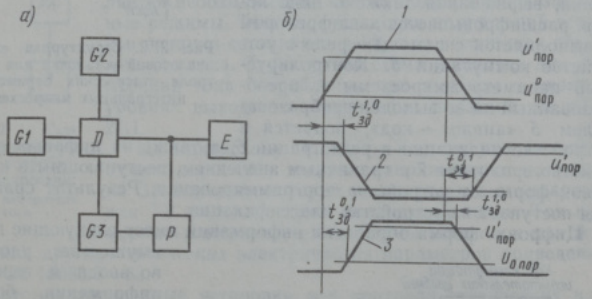


Рис. 21.4. Схема измерения времени задержки включения и выключения микросхем:

G3 — генератор импульсного напряжения; *P* — измеритель динамических параметров; *E* — эквивалент нагрузки; *1* — входное напряжение; *2* — выходное напряжение (инвертируемая схема); *3* — выходное напряжение (инвертируемая схема); $U^0_{пор}$ — входное пороговое напряжение низкого уровня; $t^{1,0}_{зд}$ — время задержки включения; $t^{0,1}_{зд}$ — время задержки выключения; $U'_{пор}$ — входное пороговое напряжение высокого уровня

На рис. 21.4 показана электрическая структурная схема установки для измерения времени задержки включения и выключения. На микросхему D (рис. 21.4, *а*) подают напряжение питания от источника G3, входные постоянные напряжения от источника G2 и входные импульсные напряжения от источника G1, значения которых установлены в стандартах или технических условиях на микросхемы конкретных типов.

Интервал времени между входным и выходным импульсами измеряют (рис. 21.4, *б*) при требуемом значении напряжений.

Функциональный контроль предусматривает измерение динамических параметров, характеризующих время выполнения микро-

схемой своих функций (время выборки, время выборки адреса, время восстановления и др.). Он приобретает большое значение при контроле БИС, микропроцессоров, БИС-ЗУ и других сложных цифровых БИС.

Функциональный контроль заключается в задании на входы БИС входной последовательности сигналов и сравнении выходных сигналов БИС с эталонной. Тестовые последовательности разрабатывают так, чтобы они позволяли проверить правильность логических элементов и электрических цепей из этих элементов.

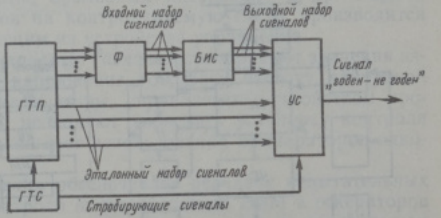


Рис. 21.5. Схема функционального контроля БИС

Количество функциональных тестов определяется количеством входов и числом логических элементов. Для проверки всех возможных комбинаций БИС, имеющей 38 внешних выводов и 100 элементов памяти, необходимо только в статике провести 2^{38} измерений. На практике для БИС разрабатываются тестовые комбинации, содержащие значительно меньшее количество тестов. При этом снижается полнота контроля, но сокращается время его проведения. Тестовые последовательности формируют в виде таблиц.

Схема функционального контроля БИС показана на рис. 21.5. Генератор тактовых сигналов (ГТС) формирует тактовые сигналы с заданным периодом и стробирующие сигналы с требуемой задержкой относительно каждого тактового сигнала. Генератор тестовой последовательности (ГТП) формирует в каждом тактовом интервале слово, которое поступает на выходы формирователя (Ф) уровней выходных сигналов. Последние преобразуются во входной набор сигналов, у которых уровни логических 0 и 1 соответствуют логическим уровням сигналов проверяемой БИС. Устройство сравнения (УС) производит сравнение эталонного и выходного набора сигналов. В случае сигнала «не годен» контроль прекращается, а результат контроля поступает на устройство индикатора.

Функциональный контроль, который осуществляется одновременно с контролем некоторых статических и (или) динамических параметров, называется *функционально-параметрическим.*

Для контроля цифровых микросхем применяют как специализированные установки настольного типа, так и универсальные информационно-измерительные системы (ИИС).

Обобщенная структурная схема установки для контроля электрических параметров цифровых микросхем показана на рис. 21.6. На базе этой схемы могут быть созданы автоматизированные установки и информационно-измерительные системы для проверки конкретных микросхем. Установка включает: контактирующие устройства (КУ); коммутатор (К); генераторы испытательных сигналов (ГС); нормализаторы измеряемых сигналов (Н); компараторы (КО); устройство управления (УП); устройство сопряжения (УС);

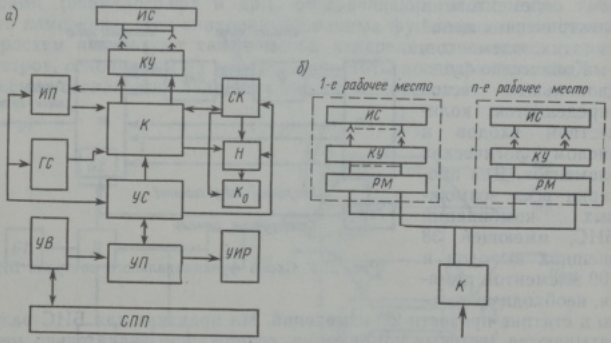


Рис. 21.6. Структурная схема установки для контроля электрических параметров микросхем:
а — однопостовая; *б* — многопостовая

устройство ввода программ (УВ); устройство индикации и регистрации результатов испытаний (УИР); источники питания (ИП); устройства самоконтроля (СК); средства подготовки программ и обработки результатов измерений (СПП).

Контактирующие устройства должны обеспечивать быстрое и надежное подключение выводов контролируемой интегральной схемы (ИС) к измерительным цепям установки. Основным требованием, предъявляемым к контактирующим устройствам, является наименьшее переходное сопротивление (не более 0,1 Ом) между контактным устройством и выводом интегральной схемы. Контактное усилие не должно приводить к остаточным деформациям выводов и повреждать их поверхности.

Одной из причин, приводящих к отказу контактных устройств, является постепенный рост оксидных пленок в зоне контактирования. Для безотказной работы контактов необходимо механическое разрушение пленок, которое может быть обеспечено подбором соответствующего контактного усилия, выбором формы контактов и др.

Коммутатор представляет собой электромеханическое или электронное устройство, обеспечивающее включение, отключение и переключение электрической цепи или присоединение к другой цепи. Коммутаторы выполняют в виде коммутационной матрицы, позволяющей любое из устройств установки подключать к одному или нескольким выводам контролируемой микросхемы. Высокую точность и быстродействие обеспечивают магнитоуправляемые контакты.

Генераторы испытательных сигналов вырабатывают сигналы напряжения, тока, частоты, временных интервалов и др. Подача испытательных сигналов на контролируемую схему производится по командам, поступающим из устройства управления.

Нормализаторы измеряемых сигналов преобразуют значения измеряемых параметров: напряжение, ток, фазу, частоту, временной интервал и т. д. Нормализаторы, управляемые устройством программного управления, позволяют упростить установку контроля и повысить ее точность за счет использования компараторов одного типа.

Устройство сопряжения обеспечивает передачу испытательных сигналов на объект контроля от управляющей ЭВМ и генераторов испытательных сигналов, а также подключение к контрольным точкам измерительной аппаратуры и коммутацию цепей.

Устройство управления обеспечивает выполнение операций, предусмотренных программой контроля: прием и хранение команд контроля, исполнение команд и управление работой установки согласно перечню команд; задание режимов работы генераторов и устройств самоконтроля; выдачу на устройство индикации и регистрации результатов контроля.

Программы контроля хранятся во внешних накопителях, выполняемых в виде коммутационных полей, перфокарт, перфолент. В устройстве программного управления используется анализатор для анализа результатов измерения, поступающих в дискретной форме.

Устройство ввода программ реализуют в виде коммутационного поля, ввода с перфоленты, магнитных лент, дисков и др.

Устройство индикации и регистрации результатов испытаний выдает информацию оператору о результатах контроля. При этом используют регистрирующие устройства мгновенного действия и накопители информации.

Источники питания выполняют в виде стабилизаторов напряжения и тока. Самоконтроль производят путем калибровки измерительных устройств установки по ряду эталонов.

Средства подготовки программ и обработки результатов измерений включают в себя различного типа инструкции, таблицы и т. д., предназначенные для установок, имеющих в качестве ввода программ коммутационные поля, магнитные долговременные ЗУ и т. п.

Информационно-измерительные системы (ИИС), у которых к измерительным устройствам подключено одно контактирующее устройство, называют *однопостовыми* (рис. 21.6, *а*). Они достаточно просты и имеют невысокую стоимость. Недостатком однопостовых ИИС является низкая производительность.

Наиболее перспективными являются *многопостовые* ИИС (рис. 21.6, *б*), в составе которых имеется несколько постов (рабочих мест) (РМ). Они работают в режиме разделения времени, что позволяет использовать значительную часть электронной аппаратуры для обслуживания ряда контрольных постов.

21.3. Неразрушающие методы контроля

Неразрушающими методами контроля (интроскопией) называют такие, которые позволяют по косвенным признакам обнаруживать скрытые дефекты производства. Качество и характеристики изделия при этом не изменяются.

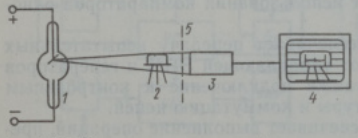


Рис. 21.7. Рентгенотелевизионный микроскоп

Скрытые дефекты производства могут иметь место на любом участке электронного изделия, и их нельзя выявить при обычных методах контроля. Они не влияют на функционирование схемы и проявляются в начальный период эксплуатации.

Методами неразрушающего контроля могут быть выявлены дефекты оксидной пленки, металлизации, присоединения выводов и др.

К неразрушающим методам контроля относятся рентгеновские, оптические, радиотехнические, ультразвуковые, тепловые и др.

Рентгеновский метод контроля. Метод использует жесткие лучи. При облучении проверяемого изделия они проходят через него и несут информацию о неоднородностях, наличии трещин и других дефектов.

Рентгенотелевизионный микроскоп представляет собой рентгеновский аппарат, сопряженный с телевизионной системой (рис. 21.7). Рентгеновское излучение от трубки *1* попадает через просвечиваемый объект *2* на мишень передающей телевизионной трубки *3*. Сигнал от видикона после соответствующей обработки поступает на приемную телевизионную трубку. Таким образом, невидимое рентгеновское изображение преобразуется в телевизионное *4*. Способ обладает высокой разрешающей способностью и позволяет обнаружить дефекты в микросхемах и зарегистрировать их на пленку *5*, помещаемую за объектом. При этом имеется возможность наблюдения за изменением параметров отдельных элементов при подаче напряжения.

Рентгеновский метод дает возможность контролировать почти всю номенклатуру изделий электронной техники. С помощью рентгенотелевизионного микроскопа можно обнаружить обрывы выводов, короткое замыкание, несовмещение отдельных слоев МПП и другие дефекты в электрических цепях.

Недостатками рентгеновских методов контроля являются вредное воздействие жестких лучей на обслуживающий персонал и возможность изменения характеристик элементов. Кроме того, при контроле мелких деталей необходима весьма высокая контрастная чувствительность. Алюминиевые выводы микросхем вообще не просматриваются.

Оптические методы контроля. Они могут быть автокомпенсационными и визуальными. *Автокомпенсационный способ* имеет сравнительно высокую производительность. При этом пользуются бинокулярным микроскопом, позволяющим совмещать два изображения (эталонного образца и контролируемого). *Визуальный способ* наиболее прост и имеет высокую разрешающую способность. Средствами контроля являются микроскопы, лупа, часовой проектор и др. Для выявления дефектов в полупроводниковых интегральных схемах используются оптические методы с использованием жидких кристаллов. На интегральную схему наносится несколько капель жидкого кристалла, которые покрываются тонкой стеклянной пластиной. Нижняя часть последней покрывается прозрачным слоем олова, являющимся одним из электродов. Для обнаружения дефекта подается напряжение на схему и точечный дефект становится видимым.

Радиотехнические методы. Их применяют для контроля физических и геометрических характеристик материалов, качества контактных соединений и др. При этом используются вихревые токи, электроимпульсное зондирование и др. Основным достоинством методов является относительная простота, а недостатком — низкая разрешающая способность.

Ультразвуковые методы. Они основываются на возбуждении в изделии механических колебаний частотой 20 кГц и выше. При прохождении колебаний через изделие волны частично отражаются от неоднородностей, а частично поглощаются. Характер поглощения, отражения и преломления ультразвуковых колебаний зависит от наличия неоднородностей (раковины, трещины и др.). Такие методы применяют для контроля толщины металлических покрытий, качества печатных проводников.

Тепловые методы контроля. Они основаны на анализе характера теплового поля проверяемой цепи (или элемента). При распространении тепловых потоков по проверяемому изделию возникают градиенты температур, значение которых зависит от физических свойств материала, наличия неоднородностей и дефектов.

Отклонение теплового режима от нормы, перегрев или аномальное уменьшение нагрева отдельных элементов могут служить сиг-

налом о наличии дефекта или возникновении его в ближайшее время. Анализ характера теплового поля позволяет определять отдельные участки с повышенной и пониженной температурой и находить места повреждения или потенциально ненадежные элементы. Измерение температур может быть выполнено контактными (прямыми) и бесконтактными способами.

Контактные способы измерения выполняются при помощи термометров, термокрасок, термопар и др.

Бесконтактные способы основаны на определении интенсивности инфракрасного излучения, которое преобразуется в электрические сигналы. В активных системах инфракрасного контроля предусматривается введение тепловой энергии в контролируемое изделие. В пассивных системах измеряется распределение тепловой энергии, генерируемой внутри контролируемого изделия (например, электронной схемы) и затем излучаемой. Системы инфракрасного контроля обладают высокой чувствительностью и универсальностью. Они обеспечивают высокую точность, производительность и снижение стоимости контроля. Одним из новых направлений работ в этой области является преобразование тепловых изображений в видимые с использованием жидких кристаллов. При определенной температуре жидкие кристаллы (обычно производные холестерина) заметно меняют цвет при небольших колебаниях температуры. После нанесения пленки из жидких кристаллов на металлическое изделие его нагревают, а затем охлаждают на воздухе до 30 °С. Поверхность изделия при этом приобретает ту или иную окраску. Участки, отличающиеся по цвету от остальной поверхности, имеют дефекты, так как они охлаждаются быстрее или медленнее бездефектных.

Методы нанесения специальных покрытий заключаются в том, что изделие покрывается слоем вещества, которое при соответствующих воздействиях изменяет свои физико-механические свойства. Например, при исследовании механических напряжений изделие покрывают слоем вещества, которое при нагрузках трескается; величина и наличие трещин пропорциональны деформации изделия при нагрузке.

Для выявления микротрещин ($\sim$0,01 мм) применяют смачивающую жидкость, которая заполняет эти трещины и при облучении ультрафиолетовыми лучами светится (люминесцентный метод) или остается в трещинах после удаления красителя (цветовой метод).

Методы измерения магнитного поля (феррозондовый, магнитографический и др.) применяют для контроля качества материалов с хорошей магнитной проницаемостью. При этом исследуемый объект намагничивается и измеряются напряженность и поток магнитного поля. Распределение напряжения по образцу записывается на магнитную ленту. Такими методами можно контролировать толщину изделия, наличие скрытых дефектов и др.

Электроиндуктивная дефектоскопия основана на использовании вихревых токов, возникающих в проводящем металле контролируемого изделия при воздействии переменного магнитного поля.

Взаимодействие магнитного поля, образованного вихревыми токами, с полем возбуждающей катушки создает результирующее поле, несущее информацию о дефектах в металле контролируемой детали. Информацию получают при измерении параметров электромагнитного поля катушки — датчика (например, напряжение). Электроиндуктивным методом можно измерять толщину покрытия.

21.4. Методы наладки электронных устройств

Перед наладкой необходимо установить степень влияния отдельных элементов на выходные параметры схемы.

В общем случае контролируемый параметр изделия A является функцией ряда элементов и параметров схемы:

$$A=\varphi(x_1;\ x_2,\ldots,\ x_n). \qquad (21.1)$$

Значение абсолютной погрешности ΔA контролируемого параметра можно получить разложив уравнение (21.1) в ряд Тейлора:

$$\Delta A=\frac{\partial A}{\partial x_1}\Delta x_1+\frac{\partial A}{\partial x_2}\Delta x_2+\ldots+\frac{\partial A}{\partial x_n}\Delta x_n, \qquad (21.2)$$

где $\partial A/\partial x_1$ — коэффициент влияния, который можно считать постоянным во всем диапазоне возможных вариаций.

Схема и конструкция изделия должны обеспечивать возможность независимых регулировок. Регулировочное воздействие должно действовать автономно и не приводить к изменению других выходных параметров, вариация которых данной регулировочной операцией не предусмотрена. Взаимозависимость регулировок резко увеличивает время, необходимое для их проведения.

Наладку схемы производят в следующем порядке. После сборки и монтажа электронное устройство подвергают тряске на вибростенде в течение нескольких минут. Это необходимо для выявления плохих контактов, получившихся вследствие небрежной работы монтажников, а также удаления случайно попавших при сборке предметов (винтов, шайб, капель припоя и др.). Затем проверяют правильность монтажа в соответствии с электроконтрольными картами (таблицами), в которых указывают, между какими точками схемы какое должно быть сопротивление; допустимые границы изменений режимов и параметров элементов, уровней сигналов и др. Простейшим прибором, служащим для проверки цепей, является пробник.

Собственно наладка заключается в получении заданных технических характеристик. Изделие при этом разбивают на отдельные блоки, взаимное влияние которых незначительно. Блоки, выделенные для независимой наладки, следует нагружать эквивалентными

нагрузками от внешних источников. При наладке отдельных блоков обычно приходится менять только один параметр. Затем изделие собирают и проверяют все блоки во взаимодействии. Наладку схемы можно выполнять методом регулировки и подгонки.

Метод регулировки. Метод состоит в том, что точность выходных параметров достигается путем изменения величины специального регулируемого схемного элемента с переменным параметром.

Основными достоинствами метода регулировки являются возможность достижения высокой точности выходных параметров изделия при широких допусках на параметры схемных элементов, а также возможность поддержания точности при старении схемных элементов и замене их в процессе эксплуатации. В то же время наличие специальных регулировочных элементов усложняет конструкцию и снижает надежность изделия.

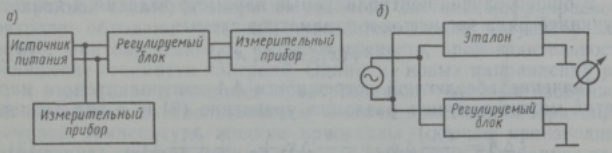


Рис. 21.8. Структурные схемы настройки:
а — по измерительным приборам; *б* — по эталону

Получение определенных выходных параметров аппаратуры методом подгонки заключается в том, что необходимая точность достигается путем подбора одного из схемных элементов с постоянными параметрами. Для сокращения количества операций по подбору необходимо выбирать элемент, отклонение параметров которого сильно влияет на выходные параметры схемы.

Метод подгонки. Этот метод дает возможность получать высокую точность выходных параметров аппаратуры при использовании транзисторов и других схемных элементов с большими допусками на параметры, но требует достаточно высокой квалификации исполнителя для выполнения работ, связанных с измерениями и подгонкой выходных параметров настраиваемой схемы.

Наладку электронной аппаратуры можно выполнять по измерительным приборам или путем сравнения настраиваемого изделия с образцовым (рис. 21.8).

При наладке по измерительным приборам на вход изделия подается определенное значение требуемого параметра. Затем с помощью настроечного элемента добиваются получения нужного значения выходного параметра. Так, например, при наладке усилителя низкой частоты устанавливают калиброванное входное напряжение от генератора, а по показаниям катодного вольтметра, включенного на выход усилителя, можно судить о со-

ответствии регулируемого изделия техническим условиям. В случае необходимости требуемое соответствие получают путем изменения параметров регулируемого объекта. Характерным для метода наладки по измерительным приборам является то, что значения на выходе регулируемого изделия известны.

При методе наладки путем сравнения настраиваемого изделия с эталоном нет необходимости в точном определении входных параметров. Он сводится к сравнению воздействия входных параметров на изделие и эталон. Применение метода сравнения не требует больших дополнительных затрат на оборудование. В качестве эталона можно использовать серийное изделие, более тщательно отрегулированное.

Вообще, чем проще блок и меньше в нем элементов, тем целесообразнее вести его наладку методом сравнения. Если после наладки изделие работает плохо, то его следует расчленить на более простые блоки и проверить еще раз их функционирование.

Необходимо также проанализировать схему устройства и конструктивное оформление, чтобы убедиться в отсутствии неучтенных связей. При анализе схемы можно воспользоваться методом искусственного повреждения. Для этого необходимо замкнуть или разомкнуть какую-либо цепь, отключить отдельные электроэлементы и посмотреть, как реагирует реальное изделие на это повреждение. Метод искусственных повреждений помогает разобраться, на какие цепи воздействуют внешние наводки, и уточнить источники этих помех.

Наладка опытного образца считается законченной после проверки устойчивости функционирования схемы при различных электрических режимах.

ГЛАВА 22
СБОРКА И КОНТРОЛЬ ЭВМ

22.1. Виды изделий и схемы сборки

Технологическим процессом сборки называется совокупность операций, в результате которых детали соединяются в сборочные единицы, а сборочные единицы — в изделие. *Изделием* называется любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии. Изделия основного производства предназначены для поставки, а вспомогательного производства — только для собственных нужд.

Виды изделий. Установлены следующие виды изделий: детали, сборочные единицы, комплексы и комплекты.

Деталь — изделие, изготовляемое из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций (например, валик из одного куска металла, печатная плата, от-

резок провода заданной длины). К этому виду изделий относятся также детали, подвергнутые покрытиям (защитным и декоративным) независимо от вида, толщины и назначения покрытия или изготовленные с применением местной сварки, пайки, склейки, сшивки и т. п. (например, хромированный винт, трубка, сваренная из одного куска листового материала).

Сборочная единица — изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе с помощью сборочных операций (свинчиванием, клепкой, сваркой и т. п.), например микромодуль, маховичок из пластмассы с металлической арматурой.

Комплекс — это два изделия и более, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций. Каждое из изделий, входящих в комплекс, выполняет одну или несколько основных функций, установленных для всего комплекса, например поточная линия станков, изделие, состоящее из метеорологической ракеты, пусковой установки и средств управления. В комплекс могут входить детали, сборочные единицы и комплекты, предназначенные для выполнения вспомогательных функций, например для монтажа комплекса на месте его эксплуатации, комплект запасных частей и др.

Комплект состоит из двух изделий и более, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих собой набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например комплект измерительной аппаратуры, комплект запасных частей.

Изделия агрегатной системы средств вычислительной техники на основе микроэлектронных схем, предназначенные для построения и эксплуатации вычислительных комплексов, изготовляются следующих видов (ГОСТ 20397—82): субкомплексы, устройства, агрегатные модули, блоки элементов и др.

Субкомплекс — часть комплекса, выделенная функционально, территориально или конструктивно.

Устройство — функционально законченное изделие, выполняющее определенную функцию получения, передачи, преобразования информации, не имеющие самостоятельного эксплуатационного назначения.

Агрегатный модуль предназначен для компоновки устройств, субкомплексов и комплексов. Он состоит из приборов, блоков и элементов, но представляет собой неделимое изделие для потребителя.

Блок элементов — первичная функциональная конструкторская единица, не имеющая самостоятельного эксплуатационного назначения и используемая для построения приборов.

Расчленение изделий на сборочные элементы производится путем построения схемы сборочного состава.

Схема сборки. Схема сборки (ГОСТ 23887—79) представляет собой графическое изображение в виде условных обозначений последовательности сборки изделия или его составной части. Каждый элемент (деталь, сборочная единица) изображается на схеме прямоугольником, разделенным на три части, где указываются наименование элемента, индекс и число, входящее в данное соединение. Схемы сборки строятся с максимальным расчленением изделия на сборочные единицы независимо от программы выпуска. Технологические схемы сборки облегчают разработку технологического процесса благодаря своей наглядности. В практике используют схемы сборки с базовой деталью и «веерного» типа.

Схема сборки с базовой деталью (рис. 22.1) отражает последовательность процесса сборки. Базовой деталью является плата, панель или другая деталь, с которой начинается сборка. Направления движения деталей и узлов показаны стрелками.

Схема сборки «веерного» типа (рис. 22.2) показывает, из каких деталей образуется сборка. Достоинством такой схемы является ее простота и наглядность, но она не отражает последовательность сборки.

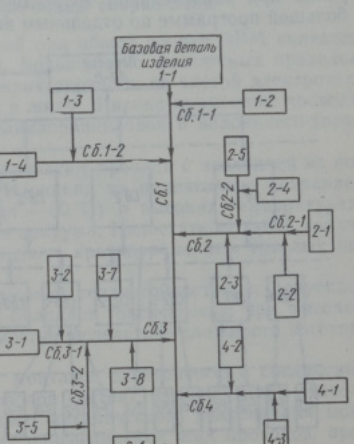


Рис. 22.1. Схема сборки с базовой деталью

Схемами сборки пользуются при разработке технологического процесса наряду со сборочным чертежом и техническими условиями.

Различают стационарную и подвижную сборку.

Стационарная сборка выполняется на одном рабочем месте, к которому подаются все необходимые детали и сборочные единицы. Она является наиболее распространенным видом сборки в условиях единичного и серийного производства.

Стационарная сборка может строиться по принципу концентрации и дифференциации. При концентрации весь сборочный процесс выполняется одним сборщиком, а при дифференциации разделяет-

ся на предварительную и окончательную. Предварительная сборка производится несколькими отдельными бригадами параллельно, а общая сборка — специальной бригадой или одним рабочим. Это обеспечивает специализацию рабочих и сокращает длительность сборки.

Стационарная сборка по принципу дифференциации целесообразна при значительной трудоемкости сборочного процесса или большой программе по отдельным видам изделия.

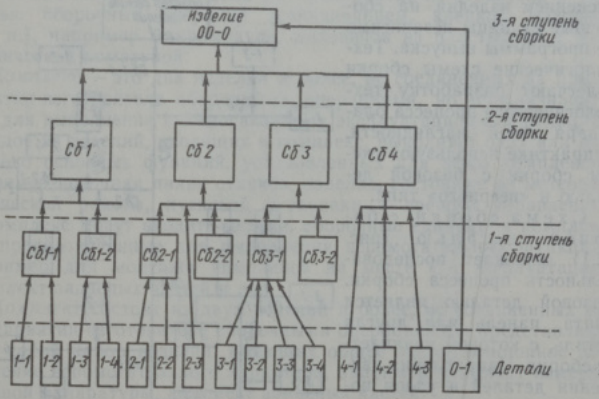


Рис. 22.2. Схема сборки «веерного» типа

Подвижная сборка выполняется при перемещении собираемого изделия от одного сборочного места к другому. На каждом рабочем месте выполняется одна повторяющаяся операция. Эта форма сборки применяется в условиях поточного производства. Она может осуществляться двумя способами:

а) со свободным движением собираемых объектов, перемещаемых от одного рабочего места к другому вручную или при помощи механического транспортера;

б) с принудительным движением собираемых объектов, которые перемещаются посредством конвейера при строго рассчитанном такте.

Процесс сборки осуществляется непосредственно на конвейере. Поточная сборка является основной формой, применяемой в серийном и массовом производстве. Переход на поточные методы повышает производительность труда за счет технических и организационных мероприятий, а также сокращает длительность производственного цикла и размер незавершенного производства.

Различия в организационных формах поточного производства сводятся к различиям в поточных линиях (по степени специализации, степени ритмичности, способу поддержания ритма работы, оснащенности транспортными устройствами и др.).

22.2. Технологические процессы, применяемые при общей сборке ЭВМ

Основным видом соединений при общей сборке ЭВМ является монтаж с помощью проводов. Большинство монтажных проводов изготовляют из отдельных тонких проволок из чистой электротехнической меди, скручиваемых в жилу. Широко применяют провода с волокнистой, пленочной, полихлорвиниловой и волокнисто-хлорвиниловой изоляциями.

В бортовой аппаратуре используют провода с изоляцией из полиэтилена и фторопласта-4. Изоляция из полиэтилена сохраняет свои свойства при низких (до —60 °С) и высоких температурах, а также в условиях глубокого вакуума. Недостатком такой изоляции является недопустимость даже кратковременных токовых перегрузок.

Фторопласт-4 обладает высокой теплостойкостью и допускает нагрев до 250 °С. Однако он обладает токсичностью при высокой температуре и большой стоимостью вследствие сложности изготовления.

Технологический процесс монтажа электрических соединений при помощи монтажных проводов состоит из следующих этапов: подготовки провода к монтажу, механического закрепления монтажных проводов, пайки мест присоединений жил проводов, проверки правильности монтажа.

Подготовка к монтажу заключается в резке провода необходимой длины, зачистке концов, закреплении изоляции на конце.

Наиболее простая конструкция приспособления для резки монтажных проводов состоит из подвижного и неподвижного дисков, имеющих ряд отверстий, рассчитанных на резку проводов разного диаметра. Провод отрезается при повороте подвижного диска.

Более высокая производительность получается при резке на автоматизированных приспособлениях (рис. 22.3). Бухта *5* (или катушка) провода устанавливается на оси *8*. Конец провода через поводок *7* и ролики *4, 6* подается роликами *3, 9* в направляющую втулку *2*. Провод необходимой длины отрезается ножом *1*. Снятие изоляции на длине от 7 до 50 мм осуществляется механическим путем (надрезкой) или обжигом.

Волокнистую изоляцию, не имеющую в своем составе асбеста и стекловолокна, удаляют обжигом.

В практике достаточно широкое применение получили электроножи типа клещей. Они представляют собой две петли из нихро-

мовой проволоки, закрепленные в контактодержателях. Для удаления изоляции провод помещают в нагретые нихромовые петли, и при их сближении изоляция обжигается по периметру. При этом обжигаются края оставшейся изоляции, что является недостатком метода.

С тонких многожильных проводов вначале снимают оболочку, а покрытые эмалью тонкие жилы провода нагревают 4 ... 6 с в верхней области спиртовой горелки, а затем опускают в раствор 10 %-ного нашатырного спирта. После снятия изоляции жилы провода зачищают ножом или на специальном приспособлении до металлического блеска.

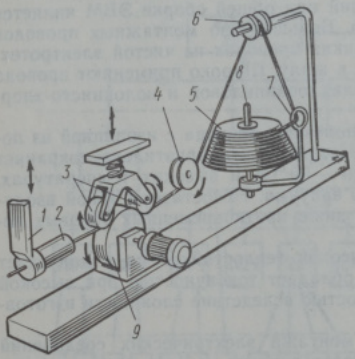


Рис. 22.3. Автомат для резки монтажных проводов

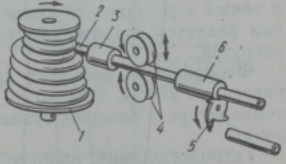


Рис. 22.4. Схема резки изоляционных трубок на автомате

Разлохмаченные концы изоляции нуждаются в заделке. Она производится проклеиванием концов нитроклеем, надеванием на них полихлорвиниловых и других трубок, наложением ниточного бандажа, опрессовкой концов в пластмассовые наконечники. Концы многожильных проводов должны быть скручены. Для этого применяют плоскогубцы со шлифованными губками или специальные приспособления.

В число обязательных операций электрического монтажа входит маркировка проводников в соответствии с принципиальной и монтажной схемой. Маркировка значительно упрощает проверку схемы и ускоряет нахождение неисправностей.

Провода маркируют при помощи липких лент или бирок, которые надевают на их концы. Бирки представляют изоляционные трубки из полихлорвинила с нанесенными на них номерами или другими обозначениями. Резка бирок производится на автоматизированных приспособлениях (рис. 22.4). Трубка *2* из бухты *1* через направляющие втулки *3* и *6* роликами *4* подается в зону резки и обрезается ножом *5*. Длина бирок регулируется за счет измене-

ния скорости подачи трубки. Производительность автомата составляет 10 ... 150 шт/мин. Точность резки при длине трубки до 25 мм составляет ±1 мм.

При надевании бирок с зазором их закрепляют на проводах клеем. Для маркировки проводов диаметром до 1 мм следует применять цветные бирки. Маркировку можно заменить применением монтажного провода с цветной изоляцией. На электромонтажных схемах в этом случае указывается цвет монтажных проводов сокращенными обозначениями или цифровыми шифрами.

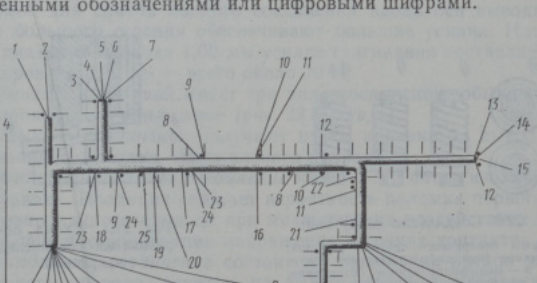


Рис. 22.5. Плоский жгут:
1—25 — номера проводов

При монтаже вычислительных устройств применяют жгуты из проводов, связанных и уложенных в определенном порядке.

Раскладка жгутов производится на специальных шаблонах (плоских и пространственных). На рис. 22.5 показан жгут, изготовленный на плоском шаблоне. Последний представляет собой доску, на которой шпильками показано направление проводов. Конец провода заводят в отверстие шаблона и закрепляют шпилькой. Около каждой шпильки ставят номер провода. После этого провод прокладывают по контуру шаблона, загибая на угловых шпильках. Раскладка проводов заканчивается закреплением другого конца на конечной шпильке, имеющей тот же номер, что и начальная.

Провода, идущие по одной трассе, вяжут провощенными льняными нитками через каждые 15 ... 20 мм. Для предохранения жгутов от механических повреждений их обматывают лентами или заключают в шланги. При раскладке на обычном шаблоне много времени затрачивается на отыскание соединений в таблице и соответствующих шпилек на шаблоне, что снижает производитель-

ность труда и утомляет рабочего. Для облегчения этой работы применяют электрифицированные шаблоны, в которых при закреплении начала первого провода сигнальная лампочка гаснет и загорается сигнальная лампочка зажима, в котором надо закрепить конец первого провода. После этого загорается лампочка у третьего зажима для закрепления следующего провода и т. д.

Применение электрифицированных шаблонов гарантирует правильность укладки и исключает необходимость контроля.

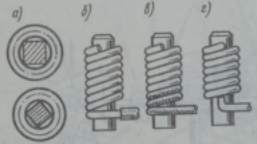


Рис. 22.6. Соединение накруткой:

а — формы поперечного сечения выводов; *б* — обычное (немодифицированное) соединение; *в* — модифицированное соединение; *г* — бандажное соединение

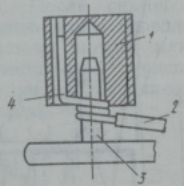


Рис. 22.7. Схема образования соединения накруткой

Снизить трудоемкость монтажных работ и повысить надежность соединения по сравнению со жгутовым монтажом позволяет использование гибких печатных кабелей и ленточных проводов (опрессованных, плетеных, тканых). Плоские ленточные провода поступают на сборку в рулонах, которые разрезают на мерные отрезки и удаляют с обоих концов изоляционный слой.

Механическое крепление провода является основным видом заделки монтажных проводов с токоведущей деталью (лепестком, монтажной стойкой и др.) с последующей пайкой. Механическое крепление обеспечивает прочность соединения, а пайка — хорошую электропроводность. Соединение монтажных проводов сваркой обеспечивает более высокую по сравнению с пайкой прочность соединения, термическую стойкость и меньшую трудоемкость.

Несмотря на ряд преимуществ сварных соединений, пайка остается основным способом соединения монтажных проводов. Для электрического монтажа функциональных модулей второго и более высоких уровней наряду с пайкой используется накрутка.

Монтаж накруткой заключается в соединении одножильного провода со штыревым выводом схемы путем накрутки с натягом определенного числа витков провода вокруг вывода, имеющего два острых края и более (рис. 22.6). Острые края вывода образуют точки высокого давления, которые приводят к появлению выемок как на проводе, так и на выводе. Соединение двух металлов с боль-

шим механическим натягом обеспечивает электрическую непрерывность и механическую стабильность.

Натяжение провода при накрутке достаточно велико для того, чтобы разрушить оксидную пленку на выводе и на навиваемом проводе, а также вдавить провод в грань вывода, на котором при этом образуются газонепроницаемые контактные поверхности.

Важным параметром, характеризующим качество соединения накруткой, является усилие стягивания, т. е. усилие, необходимое для снятия полного соединения вдоль оси вывода. Провода большого сечения обеспечивают большие усилия. Например, при диаметре провода 1,02 мм усилие стягивания составляет 48 Н, для провода 0,32 мм — всего около 20 Н.

Монтаж накруткой имеет три вида соединений: обычное, модифицированное и бандажное (рис. 22.6, *б, в, г*).

Обычное соединение получают путем навивки на вывод неизолированного участка одножильного провода.

Модифицированное соединение имеет 1 ... 2 витка изолированного провода. Изоляция снижает вероятность поломки первого витка неизолированного провода при механических воздействиях за счет уменьшения концентрации напряжения в точках контакта.

Бандажное соединение состоит из нескольких витков неизолированного провода, навитых на вывод навесного элемента, который должен прилегать к широкой поверхности вывода. Число витков при накрутке составляет 5 ... 8, а при бандажном соединении — не менее 8.

Для всех видов соединения накруткой необходимо плотное прилегание витков друг к другу. Накрутку выполняют с помощью специального инструмента (рис. 22.7), который представляет собой валик *1*, имеющий два отверстия. Центральное отверстие служит для размещения присоединительного штифта *3*, а боковое *4* — для монтажного провода *2*. На торце валика выполнены канавка для провода и накручивающая кромка *4*. С провода снимают изоляцию и оголенный конец провода вставляют в отверстие валика и загибают. Затем насаживают накручивающий инструмент на присоединительный штифт. Процесс накрутки выполняют под легким давлением (до 30 Н) в осевом направлении.

Автоматизация электромонтажа методом накрутки осуществляется на установках с программным управлением. В процессе монтажа автоматически удаляется изоляция с определенного участка провода и производится его отрезка после получения соединения.

22.3. Сборка типовых элементов замены и общая сборка ЭВМ

Типовой элемент замены (ТЭЗ) является функциональным элементом (модулем) второго уровня, осуществляющим операции логического преобразования (рис. 22.8).

Конструктивной основой ТЭЗ является двусторонняя или многослойная печатная плата. Для осуществления внешних соединений на плате предусматриваются ламели (рис. 22.8, *а*) или колодки соединителя (рис. 22.8, *б*). Печатные ламели под 48-контактный разъем выполняются преимущественно на двусторонней печатной плате, а ТЭЗ с гнездовой колодкой соединителя — на многослойной печатной плате.

На двусторонней печатной плате устанавливаются до 24 микросхем, на многослойной — до 72 микросхем.

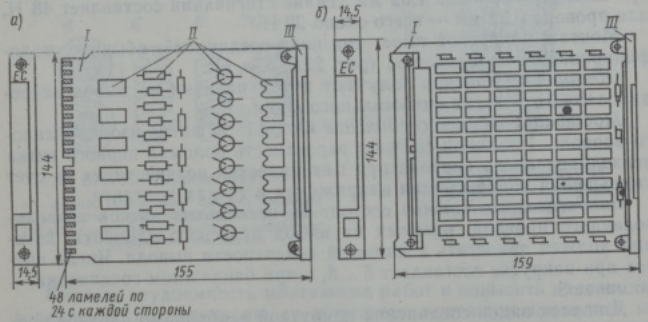


Рис. 22.8. Логический ТЭЗ:

а — с ламелями; *б* — с гнездовой колодкой; *I* — лицевая сторона; *II* — радиоэлементы; *III* — лицевая планка

Установка микросхем на плату должна обеспечить надежное механическое крепление и электрическое соединение ее выводов с контактными площадками печатной платы. Микросхемы устанавливают с шагом, кратным основному шагу координатной сетки, с формовкой и без формовки выводов.

Формовку применяют для увеличения расстояния между выводами, совмещения их с отверстиями координатной сетки, фиксации расстояния от корпуса микросхемы до платы.

Расстояние от основания корпуса микросхемы до изгиба должно быть минимальным. Радиус гибки при этом не должен нарушать форму сечения вывода и его покрытия.

Интегральные схемы со штыревыми выводами устанавливают только с одной стороны печатной платы на расстоянии 1 ... 1,5 мм от монтажной плоскости до корпуса платы (рис. 22.9). Этот зазор необходим для устранения перегрева микросхемы при пайке и для возможности нанесения защитного покрытия. Зазор может обеспечиваться за счет формовки или переменным сечением выводов. Для

дополнительного механического крепления корпуса приклеивают к изоляционной прокладке. Интегральные схемы в корпусах с планарными выводами устанавливаются с одной или двух сторон платы (рис. 22.10). Они могут приклеиваться к печатной плате эпоксидным клеем или иметь равномерный зазор 0,3 ... 0,6 мм, который



Рис. 22.9. Установка интегральных схем со штыревыми выводами на печатную плату:
а — без формовки выводов; *б* — с формовкой выводов; *в* — на прокладку

обеспечивается формовкой выводов. Если под корпусом микросхемы проходят проводники, то его устанавливают на прокладку из стеклоткани толщиной 0,2 ... 0,3 мм.

Все микросхемы имеют визуальные ключи, исключающие возможность неправильной установки. Они располагаются в зоне первого вывода с учетом возможности их осмотра после установки микросхемы на печатную плату. Конструктивное выполнение ключей не регламентируется. При необходимости предусматриваются установочные ключи в виде штыря, выступа на корпусе, несимметричного расположения выводов и т. п.

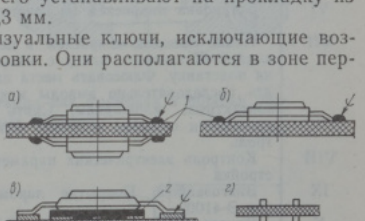


Рис. 22.10. Установка интегральных схем с планарными выводами на печатную плату:
а — с двух сторон платы; *б* — с одной стороны платы; *в* — на прокладку; *г* — между платами; *д* — в отверстиях платы

Основными этапами технологического процесса монтажа микросхем на печатной плате являются входной контроль печатных плат и микросхем, формовка, обрезка и лужение выводов, установка микросхем на печатные платы, пайка выводов микросхем к контактным площадкам печатной платы, контроль электрических параметров, покрытие лаком, окончательный контроль (табл. 22.1). *Входной контроль* микросхем заключается в визуальном осмотре при помощи лупы.

В случаях, предусмотренных техническими условиями, проверяются электрические параметры интегральных схем. Логические

интегральные схемы проверяют в статическом и динамическом режимах.

Печатную плату проверяют на отсутствие механических повреждений (сколов, трещин, отслаивания проводников и др.), а также оксидов и загрязнений на проводниках, подлежащих пайке. Формовка и обрезка выводов выполняются в различных приспособлениях.

Таблица 22.1

Номер операции	Наименование и содержание	Оборудование приспособления
I	Входной контроль микросхем	Лупа 10ˣ, стенд
II	Защита маркировки	Вытяжной шкаф, ванна
III	Формовка и обрезка выводов микросхем	Приспособление
IV	Лужение выводов микросхем. Флюсовать выводы погружением во флюс ФСКП. Лудить выводы припоем ПОС-61	Ванна
V	Подготовка печатной платы к сборке. Лудить контактные площадки	Ванна для обезжиривания
VI	Установка микросхем на печатную плату	Верстак, стойки технологические
VII	Пайка выводов микросхем к печатным платам. Установить плату с микросхемами на подставку. Флюсовать места пайки. Паять последовательно выводы микросхем к контактным площадкам. Снять плату и произвести отмывку остатков флюса. Контроль	Верстак. Подставка. Паяльник с дозирующим устройством. Прибор для контроля температуры —
VIII	Контроль электрических параметров. Настройка	Стенд. Комплект измерительных приборов
IX	Влагозащита. Покрытие лаком УР-23Т или Э-4100	—
X	Контроль электрических параметров	Стенд

На рис. 22.11, *а* показана рабочая часть штампа для формовки и обрезки планарных выводов. Микросхема помещается в углубление формовочной матрицы *1*. При опускании верхней плиты прижим *2* закрепляет выводы, а пуансон *3* производит их формовку. Обрезание выводов производится внешней кромкой пуансона, которая сопрягается с матрицей. Пружина возвращает пуансон в исходное положение при подъеме верхней части штампа. При выполнении формовки выводы подвергаются растягивающему усилию. Если оно будет большим, то в месте их заделки могут возникать трещины, приводящие к нарушению герметичности корпуса. Создание независимых усилий (рис. 22.11, *б*) прижатия P_2, формовки P_3 и обрезки P_4 обеспечивает оптимальное растягивающее усилие P_1, не приводящее к нарушению гальванического покрытия выводов и герметичности корпуса. Во всех случаях формовку следует производить с радиусом не менее двух толщин выводов.

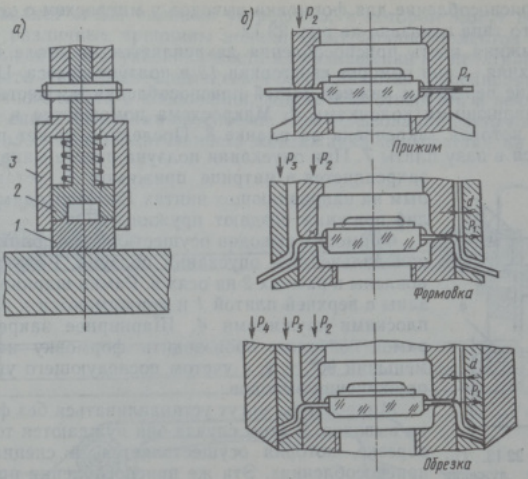


Рис. 22.11. Рабочая часть штампа для формовки и обрезки планарных выводов

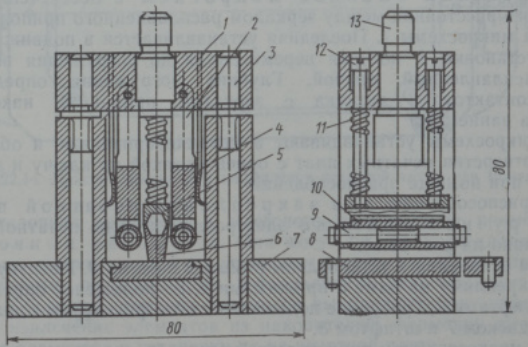


Рис. 22.12. Приспособление для обрезки и формовки выводов в корпусах второго типа

Приспособление для формовки выводов у микросхем с корпусами 2-го типа показано на рис. 22.12.

Нижняя часть приспособления закрепляется на столе пресса, а верхняя — при помощи хвостовика *13* в ползуне пресса. Центрирование верхней и нижней частей приспособления осуществляется направляющими колонками *3*. Микросхема помещается в матрицу *6*, которая закреплена на планке *8*. Последняя может перемещаться в пазу платы *7*. При опускании ползуна пресса микросхема закрепляется в матрице прижимом *5*, установленным на направляющих винтах *12*. Необходимое усилие прижима создают пружины *11*.

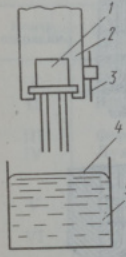


Рис. 22.13. Горячее лужение выводов

Формовка выводов осуществляется роликами *10* при дальнейшем опускании ползуна. Ролики установлены в рамках *2* на осях *9*. Рамки шарнирно связаны с верхней плитой *1* и прижимаются к матрице плоскими пружинами *4*. Шарнирное закрепление рамок позволяет производить формовку на угол, меньший 90°, т. е. с учетом последующего упругого пружинения выводов.

Микросхемы могут устанавливаться без формовки выводов. В этом случае они нуждаются только в обрезке, которая осуществляется в специальных приспособлениях. Эти же приспособления применяют в тех случаях, когда обрезка выводов производится независимо от формовки. Лужение выводов элементов обеспечивает высокое качество паяного соединения.

На рис. 22.13 показана схема горячего лужения штырьковых выводов микросхем с обеспечением заданного расстояния между зеркалом расплавленного припоя и корпусом микросхемы *1*. Последняя устанавливается в подвижной части установки *2*, которая перемещается до погружения выводов в расплавленный припой. Глубина погружения определяется контактом *3* датчика с зеркалом припоя *4*, находящегося в ванне *5*.

Микросхемы устанавливают в металлизированные и облуженные отверстия печатных плат с ориентировкой по ключу и закрепляют при помощи приспособлений.

Приспособление для закрепления печатной платы при ручном монтаже электроэлементов на печатной плате показано на рис. 22.14.

На основании *1* установлены стойки *2* с осями *3*. Печатную плату закрепляют на раме *5* прижимами *4*. Ее положение определяется штифтами *6*. Требуемое положение платы фиксируется делительным диском *7* и штифтом *8*.

В мелкосерийном производстве целесообразно применять светомонтажные столы, обеспечивающие программирование ручной сборки элементов на печатной плате. Светомонтажный стол

представляет собой сложное устройство, в котором могут применяться различные принципы подачи электрорадиоэлементов и интегральных схем и указания места их размещения на печатной плате. Места установки элементов обеспечиваются проецированием посадочного места с кинопленки, подсветкой отверстий в печатных платах снизу и другими способами. При пользовании светомонтажных столов производительность монтажника повышается на 20 % и более.

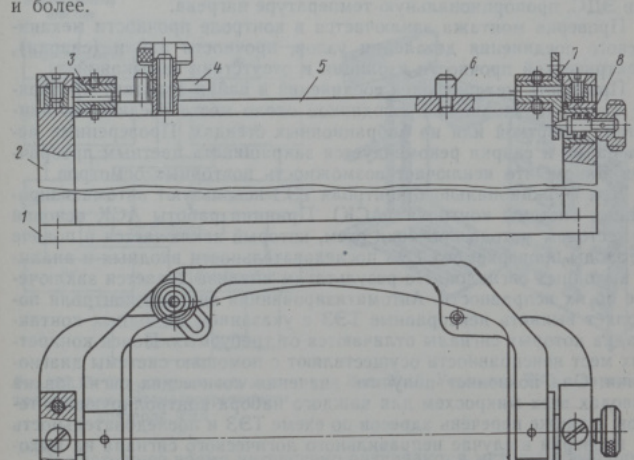


Рис. 22.14. Приспособление для закрепления печатной платы при монтаже

В условиях серийного и массового производства применяют сборочные автоматы. Они могут быть узкоспециализированными, рассчитанными на установку одного элемента, или универсальными, позволяющими устанавливать разнообразные элементы. Сборочные головки автоматов выполняют следующие операции: извлечение элементов из накопителей; формовку выводов; перенос элементов и установку их на печатной плате.

Высокое качество монтажной пайки обеспечивается правильным выбором режимов пайки. Групповые методы пайки обеспечивают

автоматическое поддержание режимов. При пайке паяльником на рабочем месте устанавливают прибор универсальный монтажника (ПУМ), предназначенный для подключения паяльника, электроножа для снятия изоляции и пробника. В приборе предусмотрена термопара для измерения температуры жала паяльника. Она состоит из двух металлов: хромеля и копеля. Прикосновение к термопаре нагретого жала паяльника вызывает в спае двух материалов ЭДС, пропорциональную температуре нагрева.

Проверка монтажа заключается в контроле прочности механического соединения деталей и узлов, прочности пайки (сварки), электрической прочности изоляции и отсутствия замыканий.

Прочность механических соединений и пайки (сварки) проверяют путем покачивания проводников около места соединения пинцетом, отверткой или на вибрационных стендах. Проверенные места пайки и сварки рекомендуется закрашивать цветным прозрачным лаком, что исключает возможность повторных осмотров.

Для функционального контроля ТЭЗ используют автоматизированные системы контроля (АСК). Принцип работы АСК основан на тестовом методе проверки схем, который заключается в подаче на входы проверяемого ТЭЗ последовательности входных и анализе выходных сигналов. По результатам анализа делается заключение об их исправности. Автоматизированная система контроля позволяет выявить неисправные ТЭЗ с указанием выходных контактов, на которых сигналы отличаются от требуемых. Поиск конкретных мест неисправности осуществляют с помощью системы диагностики. Она позволяет получить значения логических сигналов на выводах всех микросхем для каждого набора контролирующих тестов, а также перечень адресов по схеме ТЭЗ и последовательность их проверки в случае неправильного логического сигнала на выходе любой микросхемы.

Структурная схема АСК представлена на рис. 22.15.

Сигналы управления и информации из ЭВМ подаются на преобразователь (Пр), где устанавливаются по амплитуде и уровню и поступают в регистр абонента и дешифратор. Регистр абонента (РгА) обеспечивает выборку подрегистров и используется для хранения управляющего слова во время операции обмена. Дешифратор осуществляет расшифровку состояния регистра абонента и выборку сигналов управления (установка «0», запись, считывание).

Регистр Рг1 используется для хранения информации, поступающей из ЭВМ на проверяемые ТЭЗ и из них в ЭВМ, регистр Рг2 является буферным между Рг1 и проверяемыми ТЭЗ. Регистр Рг3 программно делит контакты проверяемого ТЭЗ на входные и выходные. Каждый регистр имеет 132 разряда и состоит из четырех подрегистров.

Переключающие элементы позволяют распознавать входные и выходные сигналы для проверяемых ТЭЗ. В зависимости от состояния соответствующего разряда регистра Рг3 сигнал переключаю-

щего элемента (ПЭ) является выходным с проверяемого ТЭЗ и поступает на вход Рг1 или, наоборот, является входным для проверяемого ТЭЗ. Сдвигатель предназначен для согласования по разрядности ЭВМ и проверяемого ТЭЗ. Время проверки одного ТЭЗ составляет примерно 2 мин при числе проверяющих наборов контролирующего теста не более 100.

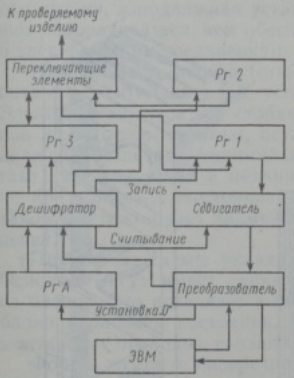


Рис. 22.15. Структурная схема установки для автоматизированного контроля ТЭЗ

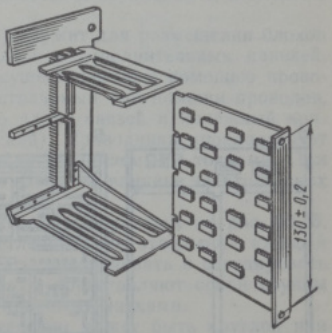


Рис. 22.16. Установка ТЭЗ в панель

В настоящее время интенсивно развиваются методы поверхностного монтажа, которые обеспечивают повышение плотности монтажа и производительности оборудования. При этом предусматривается использование миниатюрных плоских компонентов, для монтажа которых не требуется наличия в печатных платах металлизированных отверстий. Плоские компоненты приклеиваются к печатной плате со стороны монтажа, а затем припаиваются. Использование плоских компонентов не исключает применения обычных, которые устанавливаются на противоположной стороне платы.

При общей сборке ЭВМ ТЭЗ монтируются в более крупные сборочные единицы, из которых образуются стойки. На рис. 22.16 показана установка ТЭЗ в панель, которая является промежуточным элементом конструкции между ТЭЗ и стойкой. Основными конструктивными частями панели являются основание, каркас, направляющие, ответные части разъемов, элементы коммутации панели.

Надежность разъемного соединения определяется материалом контактной пары и удельным давлением в месте контакта. В каче-

стве материала для контактов обычно используют латунь, фосфористую или бериллиевую бронзу. Для повышения износоустойчивости и получения низкого переходного сопротивления контакты покрывают серебром, золотом, палладием. Контактное усилие должно обеспечивать надежный контакт. Большие усилия приводят к быстрому износу контактной пары, а малые — повышают переходное сопротивление и приводят к нестабильности контакта.

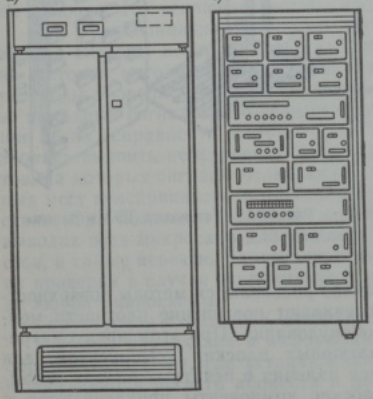


Рис. 22.17. Типовая конструкция:
а — шкаф, *б* — стойка

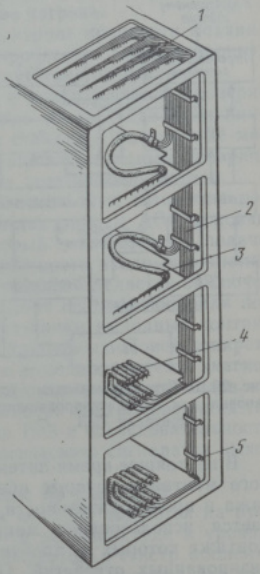


Рис. 22.18. Схема укладки жгутов:
1 — выводы на клеммные платы; *2* — жесткий монтаж; *3* — гибкий жгут круглого сечения; *4* — гибкий жгут плоского сечения; *5* — скоба для крепления жгута

Для получения разъемного соединения на каждую пару выводов устанавливается пружинящий элемент, обеспечивающий необходимое контактное усилие в паре. При необходимости место контакта подвергают пайке. Такие соединения позволяют производить многократную замену элементов в блоке.

Стойка (шкаф) является типовым конструктивным элементом ЭВМ (рис. 22.17). В отличие от шкафа (рис. 22.17, *а*) стойка не имеет передних дверей (рис. 22.17, *б*), которые заменяют лицевые панели блоков. Конструкция шкафа предусматривает механический замок для удержания дверей в закрытом состоянии. Основными конструктивными элементами шкафа являются подвижная и неподвижная рамы. Неподвижная рама жестко связана с каркасом стойки, а подвижная установлена на шарнирных петлях и может поворачиваться, чем обеспечивается доступ ко всем элементам и электрическим соединениям.

Нижняя часть шкафа (стойки) служит для размещения блоков питания, вентиляционной установки и дополнительных панелей. Электрический монтаж стойки осуществляется с помощью проводов или жгутов. Монтаж, осуществляемый при помощи проводов, должен обеспечить минимальную длину связей и надежный контакт (электрический и механический). Проводники прокладывают по кратчайшему расстоянию между соединяемыми точками. При таком монтаже будет наименьшее взаимное влияние электрических цепей.

Примерные схемы укладки жгутов изображены на рис. 22.18. Основной жгут имеет гибкие петлеобразные отводы на каждый из блоков. Это позволяет выдвигать, поворачивать и регулировать блоки в рабочем состоянии. Отводы представляют собой группы монтажных проводов, связанных прочными нитками.

Форма жгута в поперечном сечении может быть круглой или плоской. Ее выбирают в зависимости от вида деформации, которой он подвергается при выдвижении блока, и сечения жгута.

Большое взаимное влияние электрических цепей имеет место при организованном монтаже (жгутовом или струнном), когда провода укладываются в строго определенных направлениях и на заранее заданном расстоянии друг от друга.

При организованном струнном монтаже блоки, которые должны быть скоммутированы друг с другом, помещают в направляющие шасси. Монтажные провода соединяют соответствующие гнезда разъемов. Каждый проводник помещают в определенном отверстии монтажных колодок. Таким образом, провода на всем протяжении имеют опоры в виде монтажных колодок и не касаются друг друга. При этом монтажные провода, припаянные к контактам одного разъема, не должны проходить над контактами другого разъема. Длину провода берут без запаса на повторные пайки. Провод прокладывают через отверстия монтажных колодок кратчайшим путем, а изменение направления производится только под прямым углом. Провода не должны иметь натяжения, но и не допускается их провисание между контактными колодками. Применение для электрического монтажа гибких печатных кабелей (см. рис. 12.2, *б*) является более экономичным по сравнению с объемным жгутовым монтажом. При этом повышаются качество и надежность соедине-

ний, уменьшается трудоемкость за счет механизации и автоматизации изготовления ГПК. Монтаж можно вести в трех плоскостях, чему способствует гибкость кабеля.

22.4. Контроль ЭВМ

Эффективность эксплуатации ЭВМ зависит от надежности их работы. Повышение надежности заключается в увеличении показателя, характеризующего способность машины выдавать безошибочную информацию в течение заданного времени эксплуатации, и в повышении ее ремонтопригодности, т. е. уменьшении времени обнаружения и устранения отказов.

Наряду с отказом для ЭВМ характерно явление *сбоя*, под которым понимается кратковременное нарушение нормальной работы машины. Сбой появляется вследствие того, что один или несколько элементов срабатывают неправильно. После сбоя машина может в течение длительного времени функционировать нормально. Вероятность сбоя возрастает по мере старения элементов и приближения их параметров к граничным значениям. Но часто сбои возникают вследствие колебания напряжений в питающей сети, временного нарушения контакта (например, от вибрации) и др.

Система устранения случайных сбоев является важным средством повышения надежности ЭВМ, так как обычно сбои в машине возникают чаще, чем отказы. Системы контроля и устранения сбоев можно разделить на программные, аппаратурные и программно-аппаратурные.

Программный контроль. Программный контроль разделяют на программно-логический и тестовый.

Программно-логический контроль заключается в том, что при составлении программы в нее включаются дополнительные операции, имеющие математическую связь с алгоритмом основной задачи. Например, если по программе вычисляются значения $\sin x$ и $\cos x$, то для контроля можно использовать соотношение $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$. Однако не всегда удается находить удобные соотношения, требующие небольшого числа контрольных операций, а в ряде случаев они вообще не существуют. Поэтому весьма часто применяют двойной счет. В качестве контрольного соотношения принимают совпадение результатов первого и второго пересчета.

Если программа большая, то ее разбивают на несколько частей. Каждую часть программы выполняют дважды. Результаты, полученные после счета, суммируются, и обе контрольные суммы сравниваются. Если суммы совпадают, то переходят к выполнению следующей части программы, а в случае их несовпадения машина останавливается.

Основной недостаток двойного счета — снижение производительности машины в два раза и более. Кроме того, двойной счет

не позволяет установить причину ошибки и не всегда обнаруживает систематические ошибки.

Тестовый контроль — периодический контроль машины с помощью специальных испытательных программ (тестов). Контрольная задача может быть введена в рабочую программу. В определенных точках рабочей программы (контрольных точках) предусматривается обращение к контрольной задаче. Анализ результатов решения контрольной задачи в процессе выполнения основной программы позволяет судить о состоянии ЭВМ.

В зависимости от назначения применяют наладочные, поверочные, контрольные, диагностические и некоторые другие тесты.

Наладочные тесты служат для выявления грубых ошибок (например, в монтаже, логике работы отдельных блоков и др.). Такие тесты должны обеспечить разделение всего процесса контроля на этапы, каждый из которых позволяет проверить отдельный небольшой элемент машины.

Поверочные тесты используют в процессе эксплуатации машины для оценки ее работоспособности и поиска неисправности. Они обеспечивают достаточно полный контроль и включают в себя ряд обслуживающих операций, которые облегчают поиск неисправности. Например, возможность бесконечного повторения каждого этапа контроля. Это дает возможность с помощью осциллографа просматривать отдельные сигналы в блоках и выяснить причины неисправностей.

Контрольные тесты выполняют через определенные интервалы времени и с определенной частотой проверяют работоспособность машины, работающей в остальное время по основной программе. В качестве контрольной задачи можно использовать основную программу машины и выполнять ее периодически. Полученные результаты сравниваются с заранее вычисленными эталонами.

Диагностические тесты обеспечивают ускорение поиска неисправностей с указанием ее места. Между проверяющими и диагностическими тестами нет четкой границы. Как правило, диагностические тесты строятся на базе проверяющих, т. е. используют сведения о состоянии устройства, полученные в результате применения проверяющих тестов.

В настоящее время используется несколько различных методов построения диагностических тестов. Одним из основных является *метод моделей*. Он предполагает, что имеется модель диагностируемого устройства, приспособленная для искусственного внесения в нее отказов. Суть диагностики заключается в подаче на вход устройства и модели входных слов. Совпадение выходной последовательности с эталоном свидетельствует о том, что устройство работает правильно. Несовпадение с эталоном показывает, что среди соответствующих элементов имеются отказавшие. Подачей на вход новых последовательностей сигналов можно сузить область возможных дефектов элементов до пределов требуемой. Такая ме-

тодика построения диагностических тестов может обеспечить локализацию отказов с требуемой точностью. Однако количество испытаний и время их выполнения могут быть достаточно велики.

При тестовом контроле затрачивается много времени и не всегда обнаруживаются сбои, так как в момент решения контрольной задачи сбои могут не возникать. Сбои по месту их возникновения можно разделить на два класса: сбои арифметического устройства и сбои устройств управления. Эти сбои легко распознаются с помощью аппаратурного контроля.

Сбои арифметического устройства вызывают искажение результатов отдельных операций. Для исправления результатов следует повторить сбившийся участок программы. При сбое в устройстве управления необходимо определить адрес записи, исправить информацию в ячейке по найденному адресу. Если после сбоя запись результата не производилась, то исправление последствий можно осуществить повторением участка программы. Программные методы контроля не требуют дополнительной аппаратуры и могут применяться в любой машине.

Аппаратурный (схемный) контроль. Аппаратурный контроль ЭВМ связан с введением в ее структуру дополнительного оборудования, предназначенного для обнаружения ошибок при переработке информации. Встроенное контрольное оборудование позволяет проверить отдельно каждую операцию выполнения программы вычислений и их последовательность. Принцип действия дополнительного оборудования основан на использовании специального кодирования и команд программы. Код должен содержать дополнительные знаки, несущие необходимую для контроля избыточную информацию.

Схемный контроль позволяет обнаружить сбой непосредственно в момент его появления и свести к минимуму время отыскания. Примером схемного контроля может служить широко используемый способ «четности» для проверки передачи информации между устройствами машины.

При такой проверке код образуется добавлением к группе информационных двоичных знаков одного контрольного знака. Значение этого знака (1 или 0) выбирают таким образом, чтобы общее число единиц всегда было четным. Если число единиц четно, то контрольная цифра четности равна 0; если число единиц нечетно, то контрольная цифра четности равна 1.

Программно-аппаратурный контроль. Он обладает достоинствами обоих методов контроля. При этом обнаружение ошибок выполняют средствами аппаратурного контроля, а сами ошибки устраняют специальной программой. Специальная программа включается в работу по сигналу ошибки, вырабатываемому аппаратурными средствами. Производительность машины в этом случае снижается незначительно, так как контрольная программа включается редко.

В то же время объем дополнительного оборудования значительно меньше.

При вводе ЭВМ в эксплуатацию она проходит испытания на заводе-изготовителе и после монтажа на месте ее использования. Объем и последовательность испытаний устанавливают программой испытаний или техническими условиями на конкретную ЭВМ.

Общие технические требования на ЭВМ общего назначения установлены ГОСТ 16325—76. Наименования проверяемых технических требований и соответствующих им пунктов испытаний и проверок приведены в ГОСТ 23773—79.

Все испытания, кроме испытаний на транспортирование, климатических и на надежность, проводят в нормальных климатических условиях. При проведении испытаний допускается совмещение различных испытаний и сокращение их объема без ухудшения качества проверки.

ГЛАВА 23
ПРИЕМОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ

23.1. Испытания опытных и серийных изделий

Испытанием электронной аппаратуры называется экспериментальное определение значений параметров и показателей качества изделия в процессе функционирования или при воспроизведении определенных воздействий на аппаратуру по заданной программе. Испытания являются одним из важнейших и завершающих этапов производства, так как по их результатам судят об эксплуатационной надежности изделия.

Испытания могут осуществляться с целью контроля качества продукции (*контрольные испытания*) и изучения ее параметров и показателей качества (*исследовательские испытания*).

Исследовательские испытания, проводимые для установления зависимостей между предельно допустимыми значениями параметров продукции и значениями режимов эксплуатации, называются *граничными*.

По срокам проведения испытания делят на ускоренные и нормальные.

Ускоренными называют *испытания*, дающие информацию о показателях качества в более короткие сроки, чем в нормальных условиях эксплуатации. Они могут быть форсированными и сокращенными. Форсированные испытания основаны на интенсификации процессов, вызывающих отказы или повреждения, путем увеличения нагрузок (температуры, давления, скоростей и т. д.). Сокращенные испытания обеспечивают уменьшение сроков испытаний за счет получения дополнительной информации вне испытания, при-

менения экстраполяции и других методов без интенсификации причин отказов.

По методу проведения различают испытания *разрушающие и неразрушающие*. В результате проведения разрушающих испытаний проверенные изделия становятся непригодными к использованию.

Испытания проводят на этапах производства и эксплуатации. Следует различать испытания опытных образцов и изделий, изготовленных серийно.

Основной задачей испытаний опытных образцов является наиболее полное выявление соответствия их технологических и эксплуатационных характеристик требованиям технических условий. По результатам этих испытаний, называемых приемочными, решают вопрос о целесообразности внедрения опытных образцов в серийное производство. В связи с этим испытания проводят очень тщательно, по расширенной программе, при жестких режимах и длительных воздействиях различных климатических и механических факторов.

Для опытных образцов и изделий единичного производства применяют испытания следующих видов: предварительные, доводочные, ведомственные, межведомственные и государственные.

Предварительные (контрольные) испытания опытных изделий проводят для определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

Доводочные испытания применяют в процессе разработки продукции для оценки влияния вносимых в нее изменений с целью обеспечения требуемых показателей точности.

Изделия, изготовленные серийно, подвергают контрольным испытаниям, приемосдаточным, периодическим, типовым и аттестационным.

Приемосдаточные испытания имеют целью проверку соответствия изготовленных изделий требованиям технических условий.

Периодические испытания проводят в тех случаях, когда технические характеристики изделия (например, показатели надежности) невозможно или нецелесообразно определять при приемосдаточных испытаниях. Периодические испытания позволяют следить за поддержанием качества продукции на требуемом уровне.

Типовые испытания готовых изделий проводят до и после внесения изменений в конструкцию или технологию изготовления с целью проверки эффективности внесенных изменений или сравнения качества продукции, выпущенной в различное время. Типовые испытания должны осуществляться по программе, обеспечивающей сопоставимость результатов испытаний до и после внесений изменений.

Аттестационные испытания служат для оценки уровня качества продукции. Испытания двух или большего числа изделий, проводи-

мые в идентичных условиях для сравнения характеристик их качества, называют *сравнительными*.

Разновидностью контрольных испытаний являются *оценочные*. Их проводят для такой оценки качества продукции, при которой не требуется определять значения ее параметров.

Контрольные испытания могут быть сплошными или выборочными. При *сплошных испытаниях* проверяют каждое изделие, а при *выборочных* — только часть изделий и по полученным данным судят о годности всей партии. Обязательным условием допустимости выборочных испытаний является однородность состава генеральной совокупности изделий. Однако при этом всегда имеется определенная вероятность, что в генеральной совокупности окажутся дефектные изделия. Значение этой вероятности может быть определено в зависимости от размеров выборки.

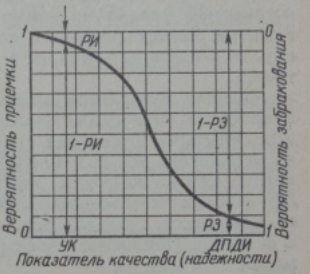


Рис. 23.1. Оперативная характеристика выборочного контроля

При разработке выборочного контроля необходимо установить число испытуемых изделий, продолжительность испытаний и приемочное число (ПЧ). Под приемочным числом понимают наибольшее число дефектных изделий в выборке, при котором результаты испытаний можно считать положительными. Если число дефектных изделий больше, чем ПЧ, результаты испытаний считают отрицательными. В последнем случае возможны два решения: продолжить контроль или забраковать всю партию, которая может быть подвергнута сплошной проверке или возвращена изготовителю (исполнителю).

Вероятность приемки партии изделий, качество которых не соответствует установленному допустимому проценту дефектных изделий (ДПДИ), называют *риском заказчика* (РЗ). По согласованию между заказчиком и изготовителем устанавливают приемлемый *уровень качества* (УК) изделий. Вероятность забракования партии изделий, качество которых соответствует УК, называют *риском изготовителя* (РИ). Каждому плану выборочного контроля соответствует определенная зависимость вероятности приемки от показателей качества. Типичный график такой зависимости, называемой оперативной характеристикой, показан на рис. 23.1. Оперативная характеристика справедлива только для определенного закона распределения погрешностей (например, нормального).

Объем и последовательность испытания ТЭЗ блоков и других изделий, функционирующих в составе ЭВМ, определяются про-

граммой испытания или техническими условиями на конкретное изделие.

Основным требованием, предъявляемым к изделиям, подвергаемым климатическим, механическим и электрическим испытаниям, является сохранение выходных (проверяемых) параметров после проведения испытания в пределах, установленных техническими условиями.

Испытания проводят в камерах и на стендах, имитирующих воздействие различных климатических и механических факторов. Если нельзя воспроизвести полный комплекс условий эксплуатации, то испытания проводят в реальных условиях (натурные испытания).

Изделия перед испытаниями должны пройти контроль и этап приработки. Последний уменьшает вероятность отказов, вызванных скрытыми дефектами производства. Приработке целесообразно подвергать все изделия и отдельные наименее надежные элементы схемы, имеющие ярко выраженный период приработки. Приработка значительно удлиняет цикл изготовления, но повышает надежность. Весьма важным является установление времени и режимов (тепловых и электрических) для выполнения этой операции.

Продолжительность приработки целесообразно ограничить участком *1* кривой интенсивности отказов (см. рис. 8.2).

23.2. Механические испытания

Механические испытания предусматривают проверку работы изделия в условиях воздействия механических факторов, создаваемых в реальной обстановке или с помощью специальных испытательных устройств. В результате механических воздействий возможны нарушения как механической прочности отдельных элементов изделия, так и его монтажа (самоотвинчивание винтов, облом выводов радиодеталей, скол керамики, разрывы в местах пайки и др.).

Механические испытания включают в себя вибрационные и ударные испытания, испытания на воздействие линейных ускорений и на транспортирование.

Вибрационные испытания. Эти испытания являются основными и наиболее универсальными при испытании электрических устройств и их элементов на механические воздействия.

Вибрации изменяют электрические параметры аппаратуры и существенно влияют на контактные соединения. Особо опасны вибрации, если собственная резонансная частота механических колебаний элементов совпадает с частотой вибрации. Резонансные частоты известных элементов схемы (радиодеталей, микросхем и др.) массой 0,3 ... 12 г с выводами диаметром 0,6 ... 1 мм и длиной 30 мм составляют 200 ... 450 Гц.

Вибрацию можно рассматривать как колебательное движение материальной точки или тела относительно своего исходного положения. Она может быть периодической и случайной. Периодическая вибрация может быть гармонической и полигармонической, а случайная — стационарной и нестационарной (узкополосной и широкополосной).

Простейшей формой периодических колебаний являются *гармонические* (рис. 23.2), которые описываются выражением

$$x(t) = A \sin(2\pi t/T + \varphi), \qquad (23.1)$$

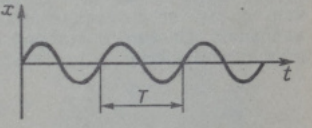


Рис. 23.2. Гармоническое колебание

где $x(t)$ — смещение или размах колеблющейся величины от положения равновесия в момент времени t, мм; A — амплитуда перемещения, т. е. абсолютное значение наибольшего смещения от среднего значения, мм; T — период колебания; φ — начальная фаза.

Величина f, обратная периоду T, называется *частотой колебаний:*

$$f = 1/T. \qquad (23.2)$$

Под частотой понимается число колебаний в секунду.

Угловая частота

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T. \qquad (23.3)$$

Введя в формулу (23.1) вместо периода частоту, получим

$$x = A \sin(\omega t + \varphi). \qquad (23.4)$$

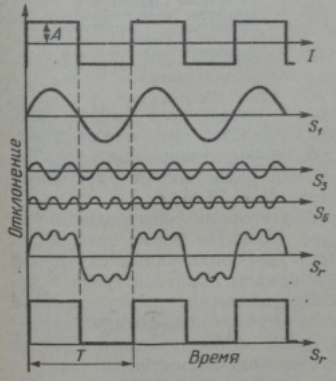


Рис. 23.3. Представление прямоугольных колебаний с помощью синусоидальных колебаний

В практике более распространенной является периодическая *полигармоническая вибрация.* Такие колебания можно представить посредством разложения в ряд Фурье как сумму гармонических колебаний с частотами, кратными основной частоте.

Колебание, изображенное на рис. 23.3, приближенно можно описать с помощью трех синусоидальных колебаний.

Сложение трех колебаний S_1, S_3 и S_5 дает результирующее колебание S_r. Приближение может быть сколько угодно улучшено, если добавить S_7, S_9, ...

Синусоидальную составляющую с наименьшей круговой частотой $\omega = 2\pi/T$ называют *первой* или *основной гармоникой*; составляющую с удвоенной частотой $2\omega = 2(2\pi/T)$ — *второй гармоникой* и т. д. Все гармоники начиная со второй называют *высшими*. Чем ближе форма колебаний к синусоиде, тем меньше гармоник надо брать, чтобы сумма их с удовлетворительной точностью воспроизвела форму несинусоидальных колебаний. *Случайной* называется вибрация, параметры которой изменяются во времени и постоянства статистических характеристик не ожидается.

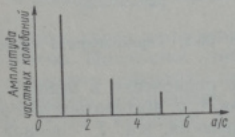


Рис. 23.4. Представление прямоугольных колебаний в виде спектра

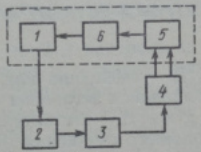


Рис. 23.5. Схема электродинамической вибрационной установки:

1 — система управления; *2* — усилитель мощности; *3* — согласующее устройство; *4* — вибростенд; *5* — виброизмерительный преобразователь; *6* — катодный повторитель

Описание колебательного процесса, показанного на рис. 23,3, можно представить в виде спектра. Ординаты, называемые спектральными линиями, изображают амплитуды отдельных частот. Такой спектр называют *линейчатым*. Он представляет простейшее изображение колебательного процесса (рис. 23.4).

Вибрационные испытания производятся на электродинамических вибрационных установках (рис. 23.5). По форме возбуждаемых колебаний различают генераторы синусоидальной и случайной вибрации. Такие генераторы имеют каналы обратной связи и называются *системой управления вибрационными процессами*. Они включают в себя устройства автоматического поддержания заданного ускорения и перемещения, а также автоматического качания частоты в заданном диапазоне и с заданной скоростью.

Усилитель мощности усиливает сигнал переменного тока, который поступает в подвижную катушку вибростенда.

Согласующее устройство предназначено для согласования выходного сопротивления усилителя мощности с входным сопротивлением подвижной катушки.

Виброизмерительный преобразователь служит для выработки электрических сигналов, пропорциональных амплитуде ускорения. Эти сигналы поступают на измерительное устройство аппаратуры управления и схему поддержания заданной амплитуды.

Катодный или эмиттерный повторитель предназначен для согласования сопротивлений без изменения амплитуды сигнала.

Наиболее широкое применение получили электродинамические вибраторы (рис. 23.6), принцип действия которых основан на взаимодействии проводника с током, постоянного магнитного поля. Катушка подмагничивания *3*, по которой протекает постоянный ток, создает в магнитопроводе *5* постоянный магнитный поток *6*, пересекающий воздушный зазор магнитопровода. В этом зазоре помещена цилиндрическая подвижная катушка *2*, через которую пропускается переменный ток. Подвижная катушка жестко соединена с рабочим столом вибратора *9* и удерживается в нужном положении с помощью гибких подвесок *8*. В результате взаимодействия постоянного магнитного потока с переменным магнитным полем возникает сила, перемещающая подвижную катушку, а следовательно, и рабочий стол с изделием *1*. Направление движения подвижной катушки изменяется в соответствии с направлением тока. Магнитный экран *7* обеспечивает защиту изделия *1* от действия магнитного поля вибратора, который установлен в раме *4*. Рама дает возможность поворота вибратора на цапфах на угол 90° от вертикали.

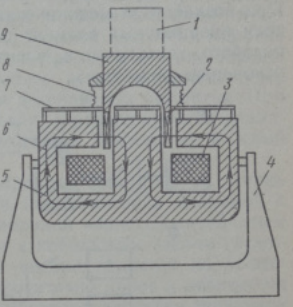


Рис. 23.6. Электродинамический вибратор

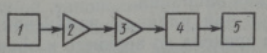


Рис. 23.7. Структура виброизмерительного прибора:

1 — пьезоэлектрический преобразователь; *2* — согласующий усилитель; *3* — измерительный усилитель; *4* — детектор; *5* — измерительный прибор

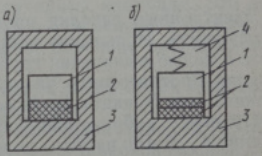


Рис. 23.8. Типовые конструкции пьезоэлектрических преобразователей:

а — клеевый; *б* — с упругим поджимом; *1* — инерционный груз, *2* — пьезоэлемент; *3* — основание; *4* — пружина

Для измерения вибраций применяют различные виброизмерительные приборы (рис. 23.7), основной частью которых является вибропреобразователь. Наиболее часто используют пьезоэлектрические вибропреобразователи, действие которых основано на исполь-

зовании прямого пьезоэлектрического эффекта. Он состоит в том, что некоторые вещества с кристаллической структурой (кварц, титанат бария и др.) при действии механических сил превращают механическую энергию в электрическую (рис. 23.8). Виброизмерительный преобразователь жестко крепят к испытуемому изделию. При воздействии механических колебаний на корпус преобразователя инерционный элемент давит на пьезоэлемент, на электродах которого генерируется электрический заряд, пропорциональный ускорению элемента.

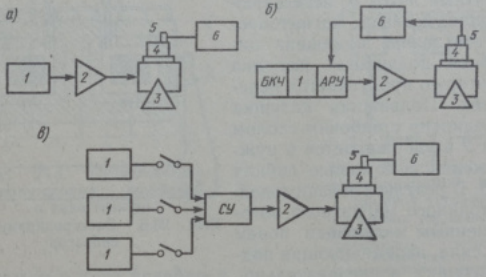


Рис. 23.9. Структурные схемы испытаний гармонической вибрацией:

а — на фиксированных режимах; *б* — методом качающейся частоты; *в* — на полигармонические вибрации; *1* — задающий генератор; *2* — усилитель мощности; *3* — вибратор; *4* — испытуемое изделие; *5* — виброизмерительный преобразователь; *6* — виброизмерительная аппаратура; БКЧ — блок качания частоты; АРУ — автоматический регулятор уровня; СУ — суммирующее устройство

Электронные изделия проверяют на вибропрочность и виброустойчивость. Испытания вибропрочности выполняют на одной частоте с целью выявления грубых дефектов и проверки способности изделия противостоять разрушающему действию вибрации и выполнять свои функции после воздействия вибрации.

Проверку виброустойчивости ведут при плавном изменении в течение 3 ... 5 мин частоты от нижнего предела до верхнего и обратно. Аппаратура считается выдержавшей испытание, если при воздействии вибрации в диапазоне заданных частот не наблюдаются механические повреждения, а электрические параметры сохраняют свои значения в пределах технических условий.

В зависимости от вида вибрации различают испытания с периодической и случайной вибрацией. Испытания с периодической вибрацией могут выполняться на одной частоте, гармонической вибрацией переменной частоты и полигармонической вибрацией.

Испытания на одной частоте (рис. 23.9, *а*) выполняют с целью выявления грубых дефектов и проверки способности изделия про-

тивостоять разрушающему действию вибрации и выполнять свои функции после воздействия вибрации. При таких испытаниях указывают диапазоны частот, время выдерживания изделия на высшей частоте каждого диапазона и продолжительность выдержки.

Испытания гармонической вибрацией переменной (качающейся) частоты (рис. 23.9, *б*) проводят при плавном изменении в заданном диапазоне частот от нижней до верхней частоты и обратно при постоянстве заданных параметров вибрации в течение определенного времени. Такой метод позволяет легко определять собственные частоты изделия и величины резонансных амплитуд. При этом любая резонансная частота изделия, соответствующая диапазону частот испытания, будет возбуждаться дважды за каждый цикл качания.

Испытание полигармонической вибрацией (рис. 23.9, *в*) заключается в одновременном воздействии гармонических вибраций с различными фазами. Спектр таких вибраций является линейчатым и может быть определен рядом Фурье с небольшим числом гармонических составляющих. Суммарный сигнал подается на усилитель мощности вибростенда. Метод достаточно прост и отличается от испытания гармонической вибрацией числом сигналов задающих генераторов и необходимостью регулирования фазовых сдвигов между этими сигналами. Возможности метода ограничены количеством задающих генераторов и сложностью настройки. Наиболее целесообразно его применять в тех случаях, когда реальная вибрация представляет собой детерминированный периодический процесс.

Испытания случайной вибрацией получили широкое распространение в качестве моделей реальных процессов. При таких испытаниях принимается гипотеза о нормальности закона распределения и локальной стационарности случайных вибраций. Это значит, что статистические характеристики, вычисленные в определенном интервале времени, дают адекватное описание вибрационного процесса на этом отрезке времени.

Испытания случайной вибрацией могут выполняться широкополосной, узкополосной и реальной вибрациями.

При *испытаниях широкополосной вибрацией* (рис. 23.10, *а*) в качестве сигнала возбуждения используется широкополосный случайный сигнал, который пропускается через узкополосные фильтры с фиксированным уровнем частот. В современных установках используется от 40 до 120 узкополосных фильтров. Область частот, пропускаемых фильтром, называется *полосой пропускания*.

Испытание узкополосной случайной вибрацией (рис. 23.10, *б*) требует задающей аппаратуры простой конструкции и обеспечивает быстрый выход на требуемый режим. Полосовой избирательный усилитель, выполняющий роль фильтра, имеет четыре перенастраиваемые полосы: 3, 10, 30 и 100 Гц. При правильной регулировке этот метод обеспечивает то же число наиболее важных

ускорений на заданном уровне, как и при широкополосном методе.

Испытания реальными вибрациями (рис. 23.10, *в*) являются дополнительным видом испытаний сложных и ответственных электронных устройств.

Ударные испытания применяются для проверки способности изделия сохранять в заданных пределах основные параметры и выполнять свои функции во время ударного действия и после него.

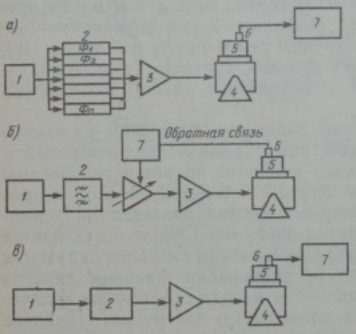


Рис. 23.10. Структурные схемы испытаний случайной вибрацией:

а — на широкополосную вибрацию; *б* — на узкополосную вибрацию; *в* — на реальные вибрации; *1* — генератор шума; *2* — блоки фильтров; *3* — усилитель мощности; *4* — вибратор; *5* — испытуемое изделие; *6* — виброизмерительный преобразователь; *7* — виброизмерительная аппаратура (регистрирующие и анализирующие устройства)

Важной характеристикой, обеспечивающей единство испытаний, является форма ударного импульса, которым называется зависимость ударного ускорения a от времени t (рис. 23.11). Для расчета ударных воздействий обычно задаются три характеристики: максимальное значение ударного ускорения H (амплитуда импульса), интервал действия импульса τ и зависимость ударного ускорения от времени. Для упрощения расчета ударных воздействий форму ударного импульса идеализируют, заменяя ее более простой (прямоугольной, полусинусоидальной и др.). Ударные испытания проводят на механических и электродинамических стендах. Действие стендов основано на том, что изделие бросают с некоторой высоты на упругую опору. В результате взаимодействия масс с упругим телом, воспринимающим удар, создаются перегрузки, которые измеряются при помощи пьезоэлектрических и других датчиков.

Испытание на воздействие линейных (центробежных) ускорений проводят на центрифуге (рис. 23.12). Металлическая рама *2*, укрепленная на оси *4*, приводится во вращение электродвигателем *5*. Испытуемое изделие *3* укрепляют на конце рамы. На противоположном ее конце устанавливают груз *1* или аналогичные изделия, обеспечивающие уравновешивание рамы. Изменение амплитуды ускорения j достигается изменением скорости вращения v рамы и перемещением испытуемого изделия, так как центробежное ускорение пропорционально расстоянию R от оси вращения до центра тяжести испытуемого изделия:

$$v = 3000\sqrt{j/R}. \qquad (23.5)$$

Испытания на прочность при транспортировании имеют целью проверить способность изделия противостоять разрушающему действию механических нагрузок, возникающих при перевозке любым транспортом. Режимы испытания изделия (длительность, максимальное ускорение и др.) и допустимые отклонения от нормы устанавливаются техническими условиями.

Для испытания изделий на воздействие ускорений, возникающих при транспортировании в кузовах грузовых автомашин, движущихся по грунтовым, булыжным или асфальтовым дорогам с различной скоростью, служат установки, имитирующие подобные ускорения.

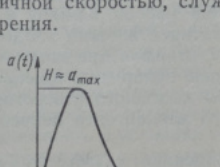


Рис. 23.11. Форма ударного импульса

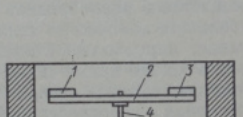


Рис. 23.12. Схема центрифуги

23.3. Климатические испытания

Надежность электронной аппаратуры зависит от условий и среды, в которой она работает. Возможность эксплуатации аппаратуры в конкретных условиях устанавливается путем проведения соответствующих испытаний, выполняемых после электрических и механических испытаний.

Основными видами климатических испытаний являются проверка на хладоустойчивость, теплоустойчивость, высотность (пониженное давление) и влажность.

Хладоустойчивость характеризует способность аппаратуры сохранять свою работоспособность при низких температурах окружающей среды. Испытания проводят в камере холода, куда помещают изделие после проверки выходных параметров. Затем изделие выдерживают требуемое время и снова проверяют его рабочие параметры.

Камера, которая используется для проведения испытаний, должна обеспечивать возможность поддержания в любой точке ее рабочего объекта температуры в пределах от —65 до +5 °С с точностью ±3 °С. Время выдержки изделия в камере принимают от 16 до 72 ч. При испытании элементов, имеющих небольшую массу,

время выдержки устанавливается равным 2 ч. По окончании проверки параметров при низкой температуре изделие оставляют в камере, температура в которой постепенно повышается до +20 °С. Для удаления капель воды изделие обдувают струей воздуха комнатной температуры.

После камеры холода изделие выдерживают в нормальных атмосферных условиях в течение времени, достаточного для установления температурного равновесия.

Низкие температуры в испытательной камере получают за счет отвода теплоты. В качестве хладоагента используют жидкости, испаряющиеся при низких температурах и поглощающие большее количество теплоты при парообразовании (фреон, аммиак и др.). Подводимый через входное отверстие батарей жидкий хладоагент превращается в парообразное состояние, отнимая при этом от воздуха большое количество теплоты на свое испарение. Компрессор отсасывает парообразный хладоагент из выходного отверстия батареи и в то же время порции жидкого хладоагента непрерывно поступают во входное отверстие.

В камерах с непосредственным охлаждением, называемых *криостатами*, температура понижается за счет введения внутрь камеры хладоагента. В качестве последнего применяют жидкий кислород или жидкий азот, а также твердую углекислоту («сухой лед»). С помощью жидкого кислорода в рабочем пространстве камеры можно получать температуру до —170°С, с помощью жидкого азота — до —120 °С, с помощью твердой углекислоты — до —70 °С.

Недостатками камер с сухой углекислотой являются существенное изменение температуры в зависимости от количества теплоты, выделяемой испытуемыми образцами, и трудности регулирования температуры внутри камеры. Они применяются при отсутствии более совершенных испытательных камер.

Теплоустойчивость характеризует свойство аппаратуры сохранять свою работоспособность в условиях повышенной температуры окружающей среды. Испытания проводят в тепловой камере, где устанавливают заданную температуру, которая регулируется при помощи специального устройства. Допустимые отклонения температуры не должны превышать $\pm(3 \ldots 5)$ °С. Изделия, которые подвергаются испытанию, помещаются в камеру при нормальных атмосферных условиях. Затем температура в камере постепенно повышается до необходимой величины. Скорость изменения температуры выбирается не более 1°С/мин.

Электронные элементы при испытании выдерживаются в камере при высокой температуре в течение 16 ч. В технических условиях может быть указано и другое время выдержки. После выдержки изделий и проверки параметров температура в камере постепенно понижается до нормальных значений. Изделие остается в камере до тех пор, пока не установится температурное равновесие. Если имеется необходимость проверить работоспособность изделия

в период изменения температуры от высокой до нормальной, она остается на этот период включенной.

Наиболее простым устройством для испытания при повышенной температуре является *термостат*, который представляет собой застекленный шкаф. Нагревательными устройствами являются спирали из константановой проволоки, намотанные на стержни из керамики и закрытые кожухами. Нагреватели располагаются обычно в нижней части шкафа. Теплый воздух отсасывается мощным вентилятором из верхней части шкафа и направляется в нижнюю часть, откуда через отверстия в промежуточном дне проникает в рабочую полость и затем в верхнюю часть. Постоянная температура в термостате поддерживается терморегулятором.

Более совершенной является камера с внешними нагревателями, в которых предварительно подогретый воздух подается в рабочее пространство камеры. При этом исключается влияние нагревательных элементов на испытуемое изделие.

Высотностью называется свойство аппаратуры сохранять работоспособность в условиях эксплуатации при пониженном атмосферном давлении и различных температурах.

Перед испытанием на высотность измеряют электрические параметры изделия и определяют его механические свойства, сравнивая их с требованиями технических условий. Затем изделия помещают в камеру и устанавливают нужную температуру. По достижении температурного равновесия давление в камере снижается до необходимой величины и поддерживается на этом уровне в течение заданного времени. Изделие при этом находится во включенном состоянии. В конце периода выдержки измеряют электрические параметры изделия. После выдержки давление в камере постепенно повышают до нормального атмосферного. По окончании периода восстановления, определяемого техническими условиями, вновь измеряют электрические параметры изделий.

Одной из современных установок для испытания в условиях как низких, так и высоких температур с одновременным понижением давления в рабочей камере является *термобарокамера*.

Низкие температуры в этой установке достигаются при помощи многоступенчатого компрессорного холодильного агрегата, а высокие — с помощью электрически нагреваемых калориферов. Вакуумный агрегат, состоящий из двух вакуум-насосов, обеспечивает понижение давления в камере.

Требуемый режим работы барокамеры может осуществляться автоматически. Автоматизация основана на взаимодействии контактных манометров, установленных на определенное давление, и контактных термометров, установленных на заданную температуру, с программными часами и испытательными механизмами. Понижение температуры осуществляется с помощью одноступенчатых компрессоров. Для регистрации процесса испытания служит самописец.

Влагоустойчивость представляет собой способность аппаратуры сохранять работоспособность в условиях повышенной влажности. При этом также проверяют степень влияния влажной среды на величину электрического сопротивления изоляции и качество защитных покрытий деталей.

У изделия замеряют выходные параметры и помещают в камеру, где создают требуемую величину относительной влажности (до 95 ... 100 %) и выдерживают при температуре, превышающей максимальную эксплуатационную на 2 ... 3 °С, в течение определенного времени.

После извлечения из камеры проверяют выходные параметры изделия, электрическое сопротивление изоляции и внешний вид изделия. При длительных испытаниях определяется возможность эксплуатации изделия в условиях повышенной влажности. Длительность испытания колеблется в диапазоне 4 ... 50 дней. При этом обеспечивается возможность поддержания температуры в пределах 38 ... 42 °С и относительной влажности 90 ... 95 %, а также принудительная циркуляция воздуха.

Ускоренные испытания производятся для проверки возможности эксплуатации изделия в условиях высокой влажности и повышенной температуры. Цикл ускоренных испытаний на влажное тепло продолжается 24 ч. В начале цикла температура в камере в течение 1,5 ... 2,5 ч повышается до 55 °С при влажности 80 ... 100 %. На изделиях при этом конденсируется влага. Затем в течение 16 ч в камере поддерживается температура 55 °С с периодическими, не менее четырех раз, колебаниями на 2 ... 3 °С и относительной влажностью 95 ... 100 %. После окончания второго периода температура в камере понижается до нормальной при влажности 80 ... 100 %. Такие циклы повторяются от 1 до 6 в зависимости от требований ТУ.

Испытание влагоустойчивости может выполняться на сравнительно простых установках, представляющих собой камеры, внутри которых может быть создана требуемая влажность и удержана на необходимом уровне заданное время (рис. 23.13).

Рабочая камера *10* состоит из наружного и внутреннего кожухов, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом. Блок термометров *1* предназначен для контроля и автоматического поддержания в камере заданного режима теплоты и холода. Электронагреватель *4* расположен за перегородкой *3*. Вентилятор *2* способствует равномерному распределению температуры и влаги в камере. Проверяемые изделия устанавливаются в камеру через застекленную дверь *9*. Испарителем *7* служит сосуд, на $^1/_3$ заполненный водой, которая нагревается электронагревателем *5*. Центробежный вентилятор *8* обеспечивает циркуляцию воздуха. Контактный термометр *6* предназначен для автоматического поддержания температуры.

Более сложными являются комбинированные *термобаровлагокамеры*. Они обеспечивают испытание аппаратуры на устойчивость к воздействию повышенной и пониженной температуры, пониженного давления и повышенной влажности. Преимуществом таких установок является возможность одновременного испытания по нескольким факторам.

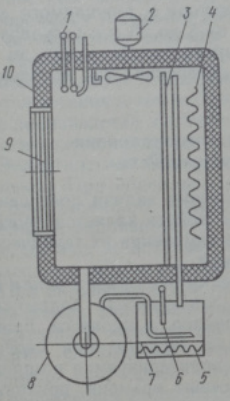


Рис. 23.13. Установка для проверки на влагоустойчивость

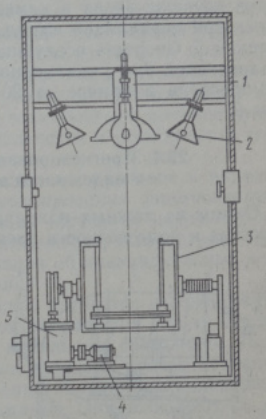


Рис. 23.14. Установка для испытания на действие солнечной радиации

Испытание на действие *солнечной радиации* производится облучением аппаратуры источниками света, по спектральному составу и интенсивности близкими к солнечному свету (рис. 23.14).

Испытываемое изделие устанавливают на столе *3*, который приводится во вращение со скоростью 1 об./сут двигателем *4* через редуктор *5*. При этом все стороны изделия облучаются ультрафиолетовыми лучами от лампы *2* и инфракрасными — от лампы *1*. Интенсивность потока лучистой энергии в месте расположения изделия должна быть не менее 1,5 кал/см^2.

Перед испытанием и после него производится сравнение внешнего вида аппаратуры с эталонным образцом и измерение параметров, указанных в программе испытаний. Эталонный образец сохраняется в нормальных климатических условиях в течение всего времени испытания.

Испытание пылезащищенности и пылеустойчивости осуществляется на специальных установках. В качестве пыли используют

смесь из кварцевого песка, каолина и молотого мела. Размер частиц не должен превышать 200 мкм.

Воздушно-пылевой поток создается в рабочем объеме камеры, представляющей замкнутый воздухопровод *1* (рис. 23.15). В верхней секции *2* на столе *3*, вращаемом с помощью редуктора *4* и электродвигателей *5*, находятся проверяемые изделия. Пылевой поток создают вводя в камеру определенное количество пылевой смеси при циркуляции воздуха от вентилятора *6*, вращаемого двигателем *7*. Скорость воздушного потока от 5 до 20 м/с регулируется заслонкой *8*, а равномерность воздушного потока — щитком *10*. Температура в камере от 20 до 50 °С обеспечивается нагревателем *9*.

23.4. Прогнозирование технического состояния и надежности электронных устройств

Одним из важных направлений в решении задачи повышения качества и долговечности электронных устройств является прогнозирование изменения их технического состояния.

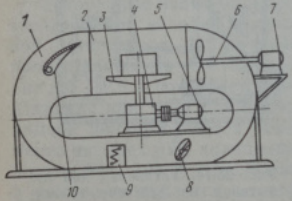


Рис. 23.15. Стенд для контроля на пылепроницаемость

Под *техническим состоянием* понимается совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта, характеризуемая в определенный момент времени признаками, установленными технической документацией на этот объект.

Для выявления технического состояния объекта используются специальные методы и технические средства контроля. Анализ полученных при контроле данных с целью определения места неисправности называется *прогнозированием*.

Задачи прогнозирования можно решать различными путями. В общем плане прогнозирование разделяют на эвристическое и математическое.

Эвристическое прогнозирование — это суждения о развитии или исходе событий на основе оценки множества факторов, большая часть которых носит качественный характер. Эвристическое прогнозирование используют для определения перспективности развития новых направлений в науке и технике, распределения ресурсов в народном хозяйстве и т. п.

Математическое прогнозирование может быть аналитическое или вероятностное. Аналитическое или детерминистическое прогнозирование основано на использовании для прогноза функциональной зависимости вида

$$y(t_{пр}) = f(x_1, x_2, \ldots), \qquad (23.6)$$

где $y(t_{пр})$ — значение прогнозируемого параметра y к моменту времени $t_{пр}$; x_1, x_2 — значения некоторых параметров объекта. Такие зависимости являются результатом теоретически или эмпирически найденных соотношений.

Вероятностное прогнозирование основано на использовании вероятностных моделей. Применение методов вероятностного прогнозирования возможно при статистической устойчивости параметров исследуемого объекта. Это может быть достигнуто при условии такого изготовления изделий, когда режимы технологических процессов, состав и свойства используемых материалов выдерживаются в одних и тех же пределах, что возможно при высокой культуре производства и обеспечении стабильности и устойчивости технологического процесса.

Вероятностное прогнозирование делят на групповое и индивидуальное. При *групповом методе прогнозирования* (прогнозирования для ансамбля) исследуется функция состояния целой группы изделий и анализируются их статистические характеристики. При этом, однако, не используется информация об индивидуальных особенностях каждого конкретного изделия.

При *индивидуальном прогнозировании* изучается вероятностная связь между значением прогнозируемого параметра j-го экземпляра изделия к моменту времени $t_{пр}$ и начальным состоянием этого изделия. С помощью методов индивидуального прогнозирования возможно сокращение объема испытаний изделий на надежность без использования форсированных режимов. Они позволяют по заданному критерию отказа определить принадлежность каждого изделия к одному из классов (надежному или ненадежному). Основными методами индивидуального прогнозирования являются метод потенциальных функций и метод распознавания Байеса.

Метод потенциальных функций. Данный метод основан на теории распознавания образов. Сущность метода заключается в том, чтобы найти такую функцию в пространстве исследуемых объектов, которая положительна для всех объектов одного класса (надежных) и отрицательна для всех объектов другого класса (ненадежных). Множество объектов, разделенных на классы, называют *образами*. Реальным объектам соответствуют определенные состояния, характеризуемые N-мерными векторами признаков. Изделие в пространстве контролируемых параметров изображается точкой.

На рис. 23.16 изображено двумерное (для простоты) пространство параметров, содержащее два множества: A и B. Проведенная кривая (в общем случае гиперповерхность) разделяет эти множества. В зависимости от того, по какую сторону от разделяющей линии (или гиперповерхности) лежат параметры изделия, предъ-

являемого для прогнозирования, определяют его принадлежность к классу А или В.

Метод потенциальных функций предусматривает три этапа выполнения прогнозирования: испытание на надежность; обучение; индивидуальное прогнозирование (экзамен). Испытание на надежность включает определение объема обучающей выборки, выбор контролируемых параметров и контрольно-измерительной аппаратуры, проведение обучающего эксперимента.

Минимальный объем обучающей выборки устанавливается в объеме 20 изделий. Выбор производится методом случайного отбора из числа изделий, изготовленных в соответствии с установленной технологией, обеспечивающей стабильное качество.

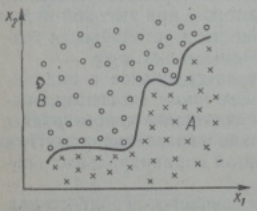


Рис. 23.16. Пространство параметров, содержащее два множества

В качестве контролируемых параметров выбираются наиболее информативные, контроль которых предусмотрен техническими условиями. При этом необходимо сократить число измеряемых параметров и число мест измерения. Если выбрана какая-то большая исходная совокупность признаков, то можно математическими методами отобрать наиболее информативные из них.

Контрольно - измерительная аппаратура должна обеспечивать измерение параметров изделия с точностью 0,5%. Можно применять индикаторы отказов и самопишущие приборы.

Обучающий эксперимент следует проводить при наиболее жестких режимах, но в пределах технических условий. Продолжительность испытаний определяется временем, на которое устанавливается прогноз. При отсутствии отказа продолжают испытания до появления отказа или устанавливают более узкие границы допуска на изделия. Если их значения вышли за пределы допуска, то они относятся к классу отказавших.

Наибольшие трудности связаны с формированием представительной обучающей выборки для высоконадежных изделий из-за большого времени испытаний. Для построения решающего правила необходимо иметь достаточно большое количество отказавших изделий, которыми не всегда можно располагать.

Для формирования обучающей выборки испытанные изделия разделяют на два класса: А — надежные изделия (не имеющие отказов при испытании); В — ненадежные изделия (имеющие отказы при испытании или условно отказавшие).

Обучение включает следующие операции: нормирование контролируемых параметров; проверку принадлежности изделия к одному из классов; оценку эффективности распознавания.

Нормированное значение k-го параметра i-го изделия в данный момент времени

$$\overline{X}_{k_i}=\frac{X_{k_i}}{\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{k}[X_{k_i}-M(x_{k_i})]^2}}=\frac{X_{k_i}}{\sigma_{k_i}}, \qquad (23.7)$$

где X_{k_i} — значение k-го контролируемого параметра изделия;

$$N=N_{\text{А}}+N_{\text{В}}; \qquad (23.8)$$

N — объем обучающей выборки; $N_{\text{А}}$ — количество изделий класса А в обучающей выборке; $N_{\text{В}}$ — количество изделий класса В в обучающей выборке; $M(x_{k_i})$ — математическое ожидание k-го контролируемого параметра; σ_{k_i} — среднее квадратическое отклонение k-го контролируемого параметра.

Из обучающей выборки поочередно исключаются изделия класса А и В и проверяются на правильность принадлежности к соответствующему классу по значениям контролируемых параметров.

Степень близости исследуемого изделия к данному образу определяется значением потенциальной функции распознавания. Если ввести аналогию между точками, представляющими выборочные образы в N-мерном пространстве, и некоторыми источниками энергии, то в любой точке потенциал достигает максимального значения и быстро уменьшается при переходе во всякую точку, отстоящую от точки, представляющей выборочный образ. Степень близости может быть оценена, по аналогии со значением потенциала в точке, удаленной на некоторое расстояние от источника электрического заряда, потенциальной функцией вида

$$\varphi_{x_i x_j}=\frac{q_{x_j}}{1+\alpha R^k_{x_i, x_j}}, \qquad (23.9)$$

где $\varphi_{x_i x_j}$ — потенциал i-го исследуемого узла в пространстве контролируемых параметров, наводимых j-м изделием; q_{x_j} — потенциал i-го исследуемого узла, равный ± 1; α и k — соответственно коэффициенты и показатель степени, определяемые экспериментально (обычно $\alpha=4$; $k=3$);

$$R_{x_i x_j}=\sqrt{\sum_{k=1}^{n}(\overline{X}_{k_i}-\overline{X}_{k_j})^2} \qquad (23.10)$$

— расстояние между точками изделий i и j в пространстве контролируемых параметров; n — число контролируемых параметров.

При подсчете потенциала функции $\varphi_{x_i x_j}$ знаки потенциала q_{x_j} устанавливаются по правилу: если для исследуемого изделия рас-

считывается наводимый потенциал от изделия класса А, то q_{x_j} выбирается со знаком «+», и, наоборот, если определяется потенциал от изделия класса В — со знаком «—».

Суммарный нормированный потенциал каждого изделия класса А, наводимого другими изделиями классов А и В, определяется по формуле

$$\hat{\varphi}_{a_i} = \frac{\sum \varphi_{A_iA_j}}{N_A - 1} + \frac{\sum \varphi_{A_iB_j}}{N_B}, \qquad (23.11)$$

где $\varphi_{A_iA_j}$ — потенциал i-го узла для класса А, наводимый j-м узлом класса А; $\varphi_{A_iB_j}$ — потенциал i-го узла класса А, наводимый j-м узлом класса В.

Аналогично, суммарный нормированный потенциал каждого узла класса В, наводимого другими изделиями классов А и В,

$$\bar{\varphi}_{b_i} = \frac{\sum \varphi_{B_iB_j}}{N_B - 1} + \frac{\sum \varphi_{B_iA_j}}{N_A}. \qquad (23.12)$$

Классификация принадлежности узла к одному из классов производится по правилу: при $\bar{\varphi}_{A_i}$ и $\bar{\varphi}_{B_i} > 0$ изделия относятся к классу А, а при $\varphi_{B_i} < 0$ и $\varphi_{A_i} < 0$ — к классу В.

Оценка эффективности распознавания определяется числом ошибочных классификаций. Для оценки эффективности распознавания обучающей выборки и ее классов используют формулу

$$\tilde{y} = (N - z)/N, \qquad (23.13)$$

где z — число ошибочных классификаций обучающей выборки; для оценки эффективности распознавания изделия класса А — формулу

$$\tilde{y}_A = (N - z_A)/N, \qquad (23.14)$$

z_A — число ошибочных классификаций класса А;

для оценки эффективности распознавания изделия класса В — формулу

$$\tilde{y}_B = (N - z_B)/N, \qquad (23.15)$$

где z_B — число ошибочных классификаций изделий класса В.

Эффективность распознавания определяется по оценкам риска поставщика α и заказчика β, которые оцениваются по формулам

$$\alpha = 1 - \tilde{y}_A; \qquad (23.16)$$

$$\beta = 1 - \bar{y}_B. \qquad (23.17)$$

Распознавание считается эффективным при получении оценок рисков поставщика и заказчика, соответствующих заданным.

Индивидуальное прогнозирование (экзамен) включает проведение испытаний экземпляров изделий, не участвующих в обучающем эксперименте, и обработку результатов испытаний. Если оценки ошибочных решений согласуются с установленными требованиями, то считают, что экзамен прошел успешно и полученным оператором можно пользоваться для прогнозирования изделий такого класса. Для этого необходимо определить одинарный нормированный потенциал c-го вновь предъявленного к прогнозированию изделия по формуле

$$\bar{\varphi}_{x_C} = \frac{\sum \varphi_{x_{i\mathrm{A}_l}}}{N_{\mathrm{A}}} + \frac{\sum \varphi_{x_{i\mathrm{B}_l}}}{N_{\mathrm{B}}}, \qquad (23.18)$$

где $\varphi_{x_{i\mathrm{A}_l}}$ — потенциал вновь предъявленного изделия, наводимый изделием класса А обучающей выборки; $\varphi_{x_{i\mathrm{B}_l}}$ — потенциал вновь предъявляемого i-го узла, наведенный j-м узлом класса В обучающей выборки.

Если прогнозируемый c-й экземпляр принадлежит к классу А, следует ожидать, что первая сумма будет велика, а вторая мала и, значит, суммарный потенциал будет положительным и c-й экземпляр относится к классу А.

Если же $\int x_i < 0$, то будет принято решение об отнесении c-го экземпляра к классу В.

Пример 23.1. Прогнозирование надежности трансформатора по двум признакам: температуре перегрева (ΔT) по отношению к окружающей среде и сопротивлению изоляции ($R_{\text{из}}$). Для проведения обучающегося эксперимента была взята выборка из 20 изделий и установлены режимы испытания. Общая продолжительность испытания составляла 13 циклов по 500 ч каждый. По результатам испытаний все изделия разделены на два класса. К классу А отнесены 15 изделий с нормальной надежностью (отказавшие после 9-го цикла), а к классу В — пять изделий с пониженной надежностью (отказавшие до 9-го цикла). Причинами отказов были пробой и короткие замыкания. Величина $R_{\text{из}}$ измерялась после прохождения цикла испытаний.

Обучение заключается в определении класса, к которому будет отнесен j-й экземпляр изделия по прогнозу. Исходными данными для расчета являются значения математического ожидания и среднего квадратического отклонения, определенных по данным признаков всех деталей выборки:

$$M(\Delta T) = 13{,}74\,^{\circ}\mathrm{C},\quad \sigma(\Delta T) = 1{,}39\,^{\circ}\mathrm{C};\quad M(R_{\text{из}}) = 48 \cdot 10^4\ \text{мОм},$$

$$\sigma(R_{\text{из}}) = 62{,}63 \cdot 10^4\ \text{мОм}.$$

По формуле (23.7) определим нормированные значения признаков для первых трех изделий *:

1-е изделие (класс А) $\Delta T_{\text{н}} = 0{,}479$; $R_{\text{из}} = 10{,}17$;
2-е изделие (класс А) $\Delta T_{\text{н}} = 0{,}319$; $R_{\text{из}} = 9{,}96$;
3-е изделие (класс В) $\Delta T_{\text{н}} = 2{,}355$; $R_{\text{из}} = 11{,}58$.

Расстояние между точками изделий 1 и 2 определяется по формуле (23.10):

$$R_{1,2} = \sqrt{(0{,}479 - 0{,}319)^2 + (10{,}17 - 9{,}96)^2} = 0{,}264,$$

* Пример подробно рассмотрен в учебном пособии: *В. Б. Пестряков, А. А. Андреева.* Индивидуальное прогнозирование состояния РЭА с использованием теории распознавания образов. Куйбышев, 1980.

в потенциал — по формуле (23.9):

$$\varphi_{1,2} = +1/(1 + 4 \cdot 0{,}264^3) = 0{,}931.$$

Аналогично вычислим потенциал $\varphi_{1,3} = -0{,}0377$. Суммарный потенциал определим по формулам (23.11) и (23.12). Например, для 3-го экземпляра изделия, принадлежащего к классу В,

$$\varphi_{b_3} = \frac{1}{15}(\varphi_{3,1} + \varphi_{3,2} + \varphi_{3,6} + \varphi_{3,7} + \varphi_{3,9} + \varphi_{3,10} + \varphi_{3,11} + \varphi_{3,12} + \varphi_{3,13} +$$

$$+ \varphi_{3,14} + \varphi_{3,15} + \varphi_{3,16} + \varphi_{3,18} + \varphi_{3,19} + \varphi_{3,20}) - \frac{1}{4}(\varphi_{3,4} + \varphi_{3,5} + \varphi_{3,8} + \varphi_{3,17}).$$

После вычисления суммарных потенциалов выбираем порог $П$. Решение об отнесении экземпляра к классу В принимается, если его суммарный потенциал меньше П, в противном случае экземпляр относится к классу А. Суммарный потенциал первого изделия равен +0,0651, второго изделия +0,1612, а третьего изделия —0,055. Если принять П в диапазоне от —0,05 до +0,05, то изделия 1 и 2 относятся к классу А, а изделие 3 — к классу В.

Выбор порога зависит от требований по величине риска потребителя или вероятности ошибочных решений, которые для каждой конкретной задачи формулируются самостоятельно.

Метод распознавания Байеса. Метод относится к статистическим методам прогнозирования, которые позволяют одновременно учитывать признаки различной физической природы. Формула Байеса имеет вид [27]

$$P(D_k/k_i) = P(D_k)P(k_i/D_k)/P(k_i), \qquad (23.19)$$

где $P(D_k/k_i)$ — вероятность постановки диагноза D_k при наличии у исследуемого объекта признака k_i; $P(D_k)$ — вероятность постановки диагноза D_k, вычисленная по статистическим данным; $P(k_i/D_k)$ — вероятность появления признака k_i у объектов с состоянием D_k; $P(k_i)$ — вероятность появления признака k_i у всех объектов независимо от установленного для каждого из них диагноза (т. е. независимо от того, в каком состоянии они находятся).

Вероятности, входящие в формулу Байеса, вычисляют следующим образом:

$$P(D_k) = n_k/n, \qquad (23.20)$$

где n — число обследованных объектов; n_k — число объектов, у которых обнаружено состояние D_k;

$$P(K_i/D_k) = n_i/n_k, \qquad (23.21)$$

где n_k — число объектов, имеющих диагноз D_k; n_i — число объектов, у которых обнаружен признак k_i;

$$P(K_i) = n_i/n, \qquad (23.22)$$

где n — число обследованных объектов; n_i — число объектов, у которых обнаружен признак k_i.

Формулу (23.19) применяют в том случае, когда постановка диагноза для объекта осуществляется по наличию одного признака.

При наличии нескольких признаков формула Байеса имеет следующий вид:

$$P(D_k/K^*)=P(D_k)P(K^*/D_k)/P(K^*). \qquad (23.23)$$

Вероятности, входящие в обобщенную формулу Байеса, имеют тот же физический смысл, что и в формуле (23.19), но относятся не к отдельному признаку k_i, а к комплексу признаков, обозначенных звездочкой ($K^*=k_1, k_2, ..., k_s$).

По формуле (23.23) можно прогнозировать любое из N возможных состояний изделия, но считать, что оно может находиться одновременно только в одном состоянии, т. е.

$$\sum_{k=1}^{n} P(D_k)=1. \qquad (23.24)$$

Это условие используется для проверочных расчетов. Для диагностически независимых признаков справедливо соотношение

$$P(k^*/D_k)=\prod_{i=1}^{s} P(k_i^*/D_k). \qquad (23.25)$$

Вероятность появления комплекса признаков $P(k^*)$ имеет вид

$$P(k^*)=\sum_{k=1}^{N} P(D_k)P(k^*/D_k). \qquad (23.26)$$

Обобщенную формулу Байеса (23.23) с учетом (23.25) и (23.26) можно представить в следующем виде:

$$P(D_k/k^*)=P(D_k)\prod_{i=1}^{s} P(k_i^*/D_k)\Big/\sum_{k=1}^{N} P(D_k)P(k^*/D_k). \qquad (23.27)$$

Очевидно, что

$$\sum_{k=1}^{n} P(D_k/k^*)=1. \qquad (23.28)$$

Это значит, что один из N диагнозов обязательно реализуется, а реализация двух диагнозов одновременно невозможна. Вероятности диагнозов по методу Байеса удобно определить с помощью диагностических таблиц.

Пример 23.2. Техническое состояние электронного изделия характеризуется двумя признаками: k_1 — повышением температуры корпуса изделия выше критической; диагноз этого состояния D_1; k_2 — уменьшением напряжения на выходе; диагноз этого состояния D_2. Из статистических данных известно, что признак k_1 встречается, когда 30% изделий находятся в состоянии D_1 (т. е. ве-

роятность диагноза составляет 0,30), а 50% — в состоянии D_2. При наличии признака k_2 20% изделий находятся в состоянии D_1, 40% — в состоянии D_2.

Когда работа изделия происходит в номинальном режиме, соответствующем его состоянию D_3, признак k_1 вообще не наблюдается, а признак k_2 проявляется лишь в 5% случаев.

Известно также, что в среднем 85% изделий вырабатывают свой ресурс времени в состоянии D_3. 5% из них имеют состояние D_1 и 10% — состояние D_2.

Требуется установить вероятность нахождения изделия в состояниях D_1, D_2 и D_3.

Таблица 23.1

D_i	$P(k_1/D_i)$	$P(k_2/D_i)$	$P(D_i)$
D_1	0,3	0,20	0,05
D_2	0,50	0,40	0,10
D_3	0	0,05	0,85

Таблица 23.2

D_i	$P(\widehat{k}_1/D_i)$	$P(k_2/D_i)$	$P(D_i)$
D_1	0,70	0,2	0,05
D_2	0,50	0,40	0,10
D_3	1,0	0,05	0,85

Таблица 23.3

D_i	$P(\widehat{k}_1/D_i)$	$P(\widehat{k}_2/D_i)$	$P(D_i)$
D_1	0,70	0,80	0,05
D_2	0,50	0,60	0,10
D_3	1,00	0,95	0,85

Оценим вероятность пребывания изделия в каждом из состояний D_i, когда оба признака k_1 и k_2 проявляются одновременно (табл. 23.1).

Подставляя в (23.27) числовые значения из диагностической таблицы, получим:

для состояния D_1

$$P[D_1/(k_1k_2)] = \frac{0,05\cdot0,3\cdot0,2}{0,05\cdot0,30\cdot0,20+0,10\cdot0,50\cdot0,40+0,85\cdot0,05\cdot0} = \frac{0,003}{0,023} \approx 0,13;$$

для состояния D_2

$$P[D_2/(k_1k_2)] = \frac{0,10\cdot0,50\cdot0,40}{0,023} = 0,87;$$

для состояния D_3

$$P[D_3/(k_1k_2)] = 0.$$

По формуле (23.28) проверим правильность вычислений:

$$P[D_1/(k_1k_2)] + P[D_2/(k_1k_2)] + P[D_3/(k_1k_2)] = 0{,}13 + 0{,}87 + 0 = 1.$$

Определим вероятность пребывания изделия в каждом из состояний D_2, когда признак k_1 отсутствует и наблюдается только признак k_2. Обозначим отсутствие признака k_1 противоположным событием $\bar{k}_1$. Используя значения величин из диагностической табл. 23.2 и применяя формулу Байеса, получим:

$$P[D_1/(\bar{k}_1k_2)] = \frac{0{,}05 \cdot 0{,}70 \cdot 0{,}20}{0{,}05 \cdot 0{,}70 \cdot 0{,}20 + 0{,}10 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}40 + 0{,}85 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}05} =$$

$$= \frac{0{,}007}{0{,}069} \approx 0{,}1;$$

$$P[D_2/(\bar{k}_1k_2)] = \frac{0{,}10 \cdot 0{,}50 \cdot 0{,}40}{0{,}069} = 0{,}288;$$

$$P[D_3/(\bar{k}_1k_2)] = \frac{0{,}085 \cdot 1 \cdot 0{,}05}{0{,}069} = 0{,}612.$$

Проверяем правильность вычислений по формуле (23.28):

$$P[D_1/(\bar{k}_1k_2)] + P[D_2/(\bar{k}_1k_2)] + P[D_3/(\bar{k}_1k_2)] = 0{,}1 + 0{,}288 + 0{,}612 = 1.$$

Рассмотрим вероятности пребывания изделия в каждом из состояний, когда оба признака k_1 и k_2 отсутствуют (табл. 23.3). Используя данные диагностической таблицы и обобщенную формулу Байеса, получим:

$$P[D_1/(\bar{k}_1\bar{k}_2)] = \frac{0{,}05 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}8}{0{,}05 \cdot 0{,}70 \cdot 0{,}80 + 0{,}1 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}60 + 0{,}85 \cdot 1 \cdot 0{,}95} =$$

$$= \frac{0{,}028}{0{,}865} = 0{,}032;$$

$$P[D_2/\bar{k}_1\bar{k}_2)] = \frac{0{,}10 \cdot 0{,}50 \cdot 0{,}60}{0{,}865} = 0{,}035;$$

$$P[D_3/\bar{k}_1\bar{k}_2)] = \frac{0{,}85 \cdot 1 \cdot 0{,}95}{0{,}865} = 0{,}933.$$

Проверка:

$$0{,}032 + 0{,}035 + 0{,}933 = 1.$$

Заключение о диагнозе технической системы принимают на основе решающего правила, которое в методе Байеса имеет следующий вид:

$$k^* \in D_k, \text{ если } P(D_k/k^*) > P(D_j/k^*); \quad j = 1, 2, \ldots, N; \quad k \neq j \quad \textbf{(23.29)}$$

По этому правилу объект с комплексом признаков k^* относят к состоянию, характеризующемуся наибольшей априорной вероятностью.

В рассмотренном примере при наличии обоих признаков (k_1 и k_2) с вероятностью 0,87 в изделии может наступить состояние D_2, что может свидетельствовать о неисправности в системе охлаждения. При отсутствии признака k_1 с вероятностью 0,612 изделие будет находиться в состоянии D_3. Когда отсутствуют оба признака, изделие будет находиться в состоянии D_3 с вероятностью 0,933 и будет нормально функционировать.

Таблица П.1. Квантили распределения Кохрена f_1 (G-критерия) для уровня значимости $q=0{,}05$

№	Квантили распределения					
	1	2	3	4	5	10
2	0,9985	0,9750	0,9392	0,9057	0,8772	0,7880
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6025
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,4884
5	0,8412	0,6838	0,5981	0,5441	0,5065	0,4118
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,3568
7	0,7271	0,5612	0,4800	0,4307	0,3974	0,3154
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,2829
15	0,4709	0,3346	0,2758	0,2419	0,2195	0,1671
30	0,2929	0,1980	0,1593	0,1377	0,1237	0,0921
120	0,0998	0,0632	0,0495	0,0419	0,0371	0,0266

Таблица П.2. Квантили распределения Стьюдента f_2 (t-критерия) для уровня значимости $q=0{,}05$

f_2	t	f_2	t	f_2	t
1	12,71	9	2,26	22	2,07
2	4,30	10	2,23	24	2,06
3	3,18	11	2,20	26	2,06
4	2,78	12	2,18	30	2,04
5	2,57	13	2,16	40	2,02
6	2,45	14	2,15	60	2,00
7	2,37	15	2,13	120	1,98
8	2,31	20	2,09	∞	1,96

Таблица П.3. Квантили распределения Фишера f_3 (F-критерия) для уровня значимости $q=0{,}05$

f_2	Квантили распределения f_3							
	1	2	3	4	5	6	12	24
1	164,4	199,5	215,7	224,6	203,2	234,0	244,9	249,0
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3
24	4,2	3,4	3,0	2,8	2,6	2,5	2,2	2,0
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6
∞	3,8	3,0	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Броудай И., Мерей Дж.* Физические основы микротехнологии/Пер. с англ.; Под ред. *А. В. Шальнова.* — М.: Мир. 1985.

2. *Деньдобренко Б. Н., Малика А. С.* Автоматизация конструирования РЭА.— М.: Высшая школа, 1980.

3. *Гаврилов А. Н.* Технология авиационного приборостроения. — М.: Машиностроение, 1981.

4. *Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И.* Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность.— М.: Высшая школа, 1986.

5. *Забора С. С., Савета Н. Н., Китнер А. Б.* Внешние устройства ЭВМ.— Киев: Техника, 1985.

6. *Заморин А. П., Мячев А. А., Селиванов Ю. П.* Вычислительные машины, системы, комплексы. Справочник / Под ред. *Б. Н. Наумова, В. В. Пржиялковского.* — М.: Энергоатомиздат, 1985.

7. *Иванов А. А.* Гибкие производственные системы в приборостроении.— М.: Машиностроение, 1988.

8. Интегральные схемы и микроэлектронные устройства на сверхпроводниках/*В. Н. Алфеев, П. А. Бахтин, А. А. Васенков* и др.; Под ред. *В. Н. Алфеева.*— М.: Радио и связь, 1985.

9. *Красов В. Г., Петраускас Г. Б., Чернозубов Ю. С.* Толстопленочная технология в СВЧ-микроэлектронике.— М.: Радио и связь, 1985.

10. *Лунд П. К.* Прецизионные печатные платы. Конструирование и производство/Пер. с англ.; Под ред. *Н. Б. Айзенберга.*— М.: Энергоатомиздат, 1983.

11. *Малышева И. А.* Технология производства микроэлектронных устройств.— М.: Энергия, 1980.

12. *Парфенов О. Д.* Технология микросхем. — М.: Высшая школа, 1986.

13. *Преснухин Л. Н., Шахнов В. А.* Конструирование электронных вычислительных машин и систем.— М.: Высшая школа, 1986.

14. *Пронин Е. Г., Шохат Е. Г.* Проектирование технических средств ЭВА. — М.: Радио и связь, 1986.

15. Применение интегральных микросхем в электронной вычислительной технике. Справочник/Под ред. *Б. И. Файзулаева, Б. В. Тарабина* — М.: Радио и связь, 1986.

16. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация / *В. Г. Алексеев, В. Н. Гриднев, Ю. И. Нестеров* и др. — М.: Высшая школа, 1984.

17. Толстопленочная микроэлектроника/*В. Г. Гребенкина, В. С. Доброер* и др.— Киев: Наукова Думка, 1983.

18. *Тявловский М. Д., Хмыль А. А., Станишевский В. К.* Технология деталей и периферийных устройств ЭВА.— Минск: Высшая школа, 1981.

19. *Ушаков Н. Н.* Оптимизация технологических процессов в приборостроении.— М.: Машиностроение, 1981.

20. *Ушаков Н. Н.* Технология и оборудование производства ЭВМ.— М.: Машиностроение, 1979.

21. *Ушаков Н. Н.* Технология элементов вычислительных машин. — М.: Высшая школа, 1976.

22. *Федулова А. А., Котов Е. П., Явич Э. Р.* Сеточно-химическая технология изготовления печатных плат/Под ред. *Е. П. Котова.* — М.: Радио и связь, 1984.

23. *Черняев В. Н.* Физико-химические процессы в технологии РЭА.— М.: Высшая школа, 1987.

24. *Шпур Г., Краузе Ф. Л.* Автоматизированное проектирование в машиностроении / Пер. с нем.; Под ред. *Ю. М. Соломенцева, В. П. Диденко.* — М.: Машиностроение, 1988.

25. ЭВМ в проектировании и производстве. Вып. 2.— Л.: Машиностроение, 1985.

26. Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов/Пер. с англ.; Под ред. *Дж. Р. Брюэра.*— М.: Радио и связь, 1984.

27. *Яншин А. А* Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА.— М.: Радио и связь, 1983.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 4

Часть первая

Основы проектирования технологических процессов

Глава 1. Общая характеристика ЭВМ 7

1.1. Классификация ЭВМ 7
1.2. Конструктивная база ЭВМ 12
1.3. Периферийные устройства ЭВМ 16
1.4. Эксплуатационные требования 18

Глава 2. Содержание и порядок проектирования технологических процессов 20

2.1. Основные понятия и определения 20
2.2. Порядок проектирования технологических процессов 22
2.3. Технологическая документация 26

Глава 3. Технологическая подготовка производства 28

3.1. Организация и управление технологической подготовкой производства 28
3.2. Технологичность конструкции элементов и деталей ЭВМ 31
3.3. Структура систем автоматизированного проектирования технологических процессов 34
3.4. Автоматизация проектирования технологических процессов 40

Глава 4. Автоматизация технологических процессов 45

4.1. Основные направления автоматизации технологических процессов . . 45
4.2. Обработка на станках с числовым программным управлением . . . 46
4.3. Автоматизация подготовки управляющих программ для систем с числовым программным управлением 51
4.4. Промышленные роботы 55
4.5. Роботизированные технологические комплексы и гибкие производственные системы 62

Глава 5. Выбор варианта технологического процесса 65

5.1. Структура нормы времени 65
5.2. Выбор варианта технологического процесса по единичному показателю 67
5.3. Выбор варианта технологического процесса по комплексному показателю 71

Глава 6. Основные вопросы теории точности производства 72

6.1. Производственные погрешности 72
6.2. Расчетно-аналитический метод анализа точности производства 73
6.3. Статистические методы анализа точности производства 75
6.4. Размерные цепи 82
6.5. Качество поверхности 87

Глава 7. Моделирование и оптимизация технологических процессов методами планирования эксперимента 91

7.1. Сущность факторного анализа 91
7.2. Полный факторный эксперимент 93
7.3. Оптимизация технологических процессов на основе экспериментально-статистической модели 98

Глава 8. Надежность ЭВМ и пути ее обеспечения 101

8.1. Основные понятия и определения 101
8.2. Показатели надежности электронных устройств 104
8.3. Расчет надежности 107
8.4. Надежность технологического процесса 109
8.5. Пути повышения надежности электронных устройств 114

Часть вторая

Типовые технологические процессы изготовления и монтажа элементов ЭВМ

Глава 9. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки 120

9.1. Электроэрозионные методы обработки 120
9.2. Лучевые методы обработки 124
9.3. Обработка ультразвуком 129
9.4. Электрохимическая обработка 130
9.5. Обработка при помощи плазмы 131

Глава 10. Защитные покрытия 133

10.1. Виды защитных покрытий 133
10.2. Металлические покрытия 134
10.3. Химические и электрохимические покрытия 138
10.4. Лакокрасочные покрытия 140
10.5. Контроль покрытий 141

Глава 11. Защита электронных элементов и устройств от воздействия внешней среды 143

11.1. Методы защиты от внешней среды 143
11.2. Процессы изолирования жидкими диэлектриками 144
11.3. Полная герметизация 148

Глава 12. Технология производства печатных плат 150

12.1. Конструктивно-технологическая характеристика печатных плат . . . 150
12.2. Механическая обработка печатных плат 155
12.3. Получение рисунка печатной платы 159
12.4. Химические и гальванические процессы изготовления печатных плат 166
12.5. Типовые технологические процессы изготовления печатных плат . . 169

Глава 13. Типовые технологические процессы сборки и монтажа 182

13.1. Пайка 182
13.2. Групповые методы пайки 191
13.3. Проводной монтаж на печатных платах 196
13.4. Сварка 197
13.5. Монтажная микросварка 201
13.6. Склеивание 204

Технология изготовления функциональных элементов и общая сборка ЭВМ

Глава 14. Функциональные элементы и требования, предъявляемые к ним . . . 208

14.1. Виды функциональных элементов . . . 208
14.2. Микроминиатюризация функциональных элементов . . . 211
14.3. Интегральные микросхемы и микросборки . . . 212

Глава 15. Тонкопленочные микросхемы . . . 215

15.1. Подложки тонкопленочных микросхем . . . 215
15.2. Элементы тонкопленочных интегральных микросхем . . . 219
15.3. Методы получения тонких пленок . . . 226
15.4. Контроль толщины тонких пленок . . . 236
15.5. Основные этапы технологического процесса изготовления тонкопленочных интегральных микросхем . . . 239

Глава 16. Толстопленочные микросхемы . . . 245

16.1. Материалы толстопленочных элементов . . . 245
16.2. Элементы толстопленочных интегральных микросхем . . . 248
16.3. Основные этапы технологического процесса изготовления толстопленочных микросхем . . . 249

Глава 17. Полупроводниковые интегральные микросхемы . . . 255

17.1. Элементы полупроводниковых микросхем . . . 255
17.2. Получение монокристалла кремния и его первичная обработка . . . 260
17.3. Основные технологические процессы, применяемые при изготовлении полупроводниковых интегральных микросхем . . . 266
17.4. Вспомогательные технологические процессы . . . 280
17.5. Основные этапы технологического процесса изготовления полупроводниковых микросхем . . . 282

Глава 18. Сборка и герметизация микросхем . . . 294

18.1. Разделение полупроводниковой пластины на отдельные кристаллы 294
18.2. Монтаж навесных элементов на подложке . . . 296
18.3. Корпуса микросхем . . . 297
18.4. Монтаж кристаллов и подложек в корпусе . . . 302
18.5. Герметизация и испытание микросхем . . . 305

Глава 19. Микросхемы с повышенным уровнем интеграции и функциональная микроэлектроника . . . 308

19.1. Основные направления повышения уровня интеграции микросхем . . . 308
19.2. Большие интегральные схемы . . . 310
19.3. Большие гибридные интегральные схемы и микросборки . . . 319
19.4. Функциональная микроэлектроника . . . 321
19.5. Особенности производства микросхем . . . 328

Глава 20. Запоминающие устройства ЭВМ . . . 330

20.1. Виды запоминающих устройств . . . 330
20.2. Магнитные головки . . . 333
20.3. Накопители на магнитных дисках . . . 337
20.4. Накопители на магнитных барабанах . . . 344
20.5. Накопители на магнитной ленте . . . 346
20.6. Полупроводниковые запоминающие устройства . . . 347

Глава 21. **Наладка и контроль электронных устройств** 349
21.1. Наладка опытных и серийных изделий 349
21.2. Контроль электроэлементов 351
21.3. Неразрушающие методы контроля 358
21.4. Методы наладки электронных устройств 361

Глава 22. **Сборка и контроль ЭВМ** 363
22.1. Виды изделий и схемы сборки 363
22.2. Технологические процессы, применяемые при общей сборке ЭВМ . . 367
22.3. Сборка типовых элементов замены и общая сборка ЭВМ 371
22.4. Контроль ЭВМ 382

Глава 23. **Приемочный контроль и испытания** 385
23.1. Испытания опытных и серийных изделий 385
23.2. Механические испытания 388
23.3. Климатические испытания 395
23.4. Прогнозирование технического состояния и надежности электронных устройств 400

Приложения 410

Список литературы 411

Учебное издание

Ушаков Николай Николаевич

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭВМ

Зав. редакцией *Н. И. Хрусталева.* Редактор *И. Е. Якушина.* Мл. редакторы *Г. Г. Бучина, Л. А. Гусакова.* Художник *А. И. Шавард.* Художественный редактор *Т. М. Скворцова.* Технический редактор *Н. А. Битюкова.* Корректор *Г. И. Кострикова*

ИБ № 8246

Изд. № СТД—647. Сдано в набор 26.10.90. Подп. в печать 11.03.91. Формат 60×88¹/₁₆. Бум. офс. № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Объем 25,48 усл. печ. л. 25,48 усл. кр.-отт. 26,52 уч.-изд. л. Тираж 19 500 экз. Зак. № 673. Цена 2 руб.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8
Государственного комитета СССР по печати,
101898, Москва, Хохловский пер. 7