

**В. Ш. БЕРИКАШВИЛИ**

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

**УЧЕБНИК**

*Рекомендовано*

*Федеральным государственным автономным учреждением  
«Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО»)  
в качестве учебника для использования в учебном процессе  
образовательных учреждений, реализующих программы  
среднего профессионального образования*

*Регистрационный номер рецензии 313  
от 08 июля 2013 г. ФГАУ «ФИРО»*

2-е издание, стереотипное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2015

УДК 621.38(075.32)  
ББК 32.85я723  
Б488

Рецензент —

преподаватель спецдисциплин высшей категории Московского колледжа  
градостроительства и сервиса № 38 (ГБОУ СПО КГиС),  
канд. техн. наук *В. Н. Иванов*

### **Берикашвили В. Ш.**

Б488 Основы электроники : учебник для студ. учреждений сред.  
проф. образования / В.Ш.Берикашвили. — 2-е изд., стер. —  
М. : Издательский центр «Академия», 2015. — 208 с.  
ISBN 978-5-4468-8799-6

Учебник создан в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по специальности «Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских знаний»; ОП «Основы электроники».

Изложены основы теории и практики построения электронных приборов, устройств и цепей на современной элементной базе с использованием новых конструктивных и схемотехнических решений. Рассмотрены принципы работы и структура электронных приборов и устройств. Показана тенденция перехода разработок электронных устройств от энергоемких и низкочастотных к миниатюрным и сверхвысокочастотным. Приведены типовые схемотехнические решения аналоговых и цифровых интегральных микросхем. Рассмотрено построение функциональных электронных устройств на основе операционных усилителей, компараторов, таймеров, оптронов и других оптоэлектронных устройств. Даны структурные схемы и принципы работы микропроцессоров, однокристалльных ЭВМ и контроллеров.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.38(075.32)  
ББК 32.85я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение  
любым способом без согласия правообладателя запрещается*

ISBN 978-5-4468-8799-6

© Берикашвили В. Ш., 2013  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

## Уважаемый читатель!

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по специальности «Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских зданий».

Учебник предназначен для изучения общепрофессиональной дисциплины «Основы электроники».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают в себя традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включены терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

Электронная техника стала стремительно развиваться в 60-е гг. XX в. в связи с возросшей потребностью передачи информации на большие расстояния и развитием вычислительной техники. Открытие полупроводников резко изменило характер электронных устройств: они стали малогабаритными и более надежными, появилась возможность их миниатюризации и значительного снижения энергоемкости.

В настоящее время существует целая отрасль электронной техники — микроэлектроника, разрабатывающая и производящая аналоговые, цифровые и специализированные микросхемы с числом элементарных полупроводниковых устройств от  $10^3$  до  $10^6$ . Микроэлектронные устройства получили широкое распространение в радиотехнике, электронике, системах связи, вычислительной и бытовой технике, благодаря чему электронные и радиотехнические устройства стали легкими, малогабаритными, экономичными и широкодоступными.

В последние годы стремительно развивается импульсная цифровая техника. Например, посредством импульсных сигналов передают данные о состоянии технических объектов (в телеметрии), управляют космическими кораблями при стыковке, создают высококачественные цифровые радиовещание и телевидение. В повседневной жизни мы сталкиваемся с импульсами и импульсными устройствами, иногда и не подозревая об их существовании. Кнопочный пульт позволяет нам на расстоянии управлять телевизором с помощью импульсов инфракрасного излучения. Спутниковая антенна принимает цифровые радиоимпульсы. Набирая номер телефона, мы посылаем импульсы телефонной станции, которая расшифровывает их и соединяет нас с требуемым абонентом.

Наиболее высокий уровень развития характерен для цифровой вычислительной техники. Современные вычислительные машины имеют тактовую частоту импульсов 2 ГГц, а в быстродействующих вычислительных комплексах передача информации происходит со скоростью до  $2 \cdot 10^9$  импульсов в секунду.

Бытовые приборы также насыщены цифровой электронной техникой. В современных автомобилях электроника используется в системах зажигания, контрольной и охранной сигнализации. В последних моделях автомобилей устанавливаются микропроцессоры, определяющие оптимальные режимы работы двигателя.

Строительство новых жилых домов связано с одновременным монтажом силовых и информационных сетей. В жилых, офисных и промышленных зданиях используются различные контрольно-измерительные приборы, системы охранной сигнализации и системы управления энергией.

В настоящее время приоритетными направлениями развития науки и техники являются информационные технологии, высокотехнологичные производственные процессы и энергосберегающие технологии. Эти направления тесно связаны с развитием информационной и энергетической электроники, применением микропроцессорной вычислительной техники в системах автоматического управления, телекоммуникационных и информационных системах.

Целью настоящей книги является ознакомление будущих специалистов в области монтажа, наладки и эксплуатации электрооборудования промышленных и гражданских зданий с основами электронной техники, включая элементную базу, аппаратные средства информатики и энергетической электроники, элементы цифровой и микропроцессорной техники.

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

**Электронная техника (электроника)** — область науки и техники, связанная с изучением физических свойств, методов исследования и применения устройств, основанных на взаимодействии электронов с электрическим и магнитным полями в вакууме или твердом теле.

В настоящее время под электронной техникой понимают также приборы и устройства, основанные на электронных потоках и их взаимодействии с веществом и электромагнитными полями. В основе электронных устройств лежат электронные приборы.

**Электронные приборы** — элементарные электронные устройства, выполняющие определенные функции. Различают вакуумные и твердотельные электронные приборы.

К *вакуумным* электронным приборам относят электронные лампы, электроннолучевые трубки и газоразрядные приборы (магнетроны, гиротроны, фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи и т. п.); к *твердотельным* — полупроводниковые диоды, транзисторы, тиристоры, светодиоды, фотодиоды, полупроводниковые лазеры, интегральные микросхемы.

Под электронной техникой понимают также разнообразные электронные устройства, связанные с использованием элементарных электронных приборов, начиная от простых усилителей и заканчивая сложными вычислительными машинами. К ним относятся и различные бытовые и музыкальные электронные устройства. Особое место занимают электронные устройства, связанные с формированием, распознаванием и преобразованием радиосигналов: их изучением и описанием занимается **радиоэлектроника**.

Характерной является область электроники, к которой относятся импульсные устройства и электронные устройства, связанные с цифровой и вычислительной техникой.

Другое направление электроники, связанное с преобразованием и использованием оптических сигналов и изображений, называется **оптоэлектроникой**.

Специфичны и разделы электроники, посвященные методам исследования физических явлений, измерениям физических величин, характеристик и параметров электронных устройств, в том числе электрических цепей и электромагнитных полей. Приборы, осуществляющие измерения параметров и исследования процессов, протекающих в электрических цепях и устройствах, называют электронными **измерительными приборами**.

**Элементы электронной техники** являются кирпичиками, из которых конструируются более сложные электронные устройства. Базовые, или основные элементы электронной техники — резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, микросхемы и т. п. Приборы, не увеличивающие амплитуду и не изменяющие частоту электрических сигналов, называются **пассивными** (конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности). **Активными** элементами электронной техники называют диоды, транзисторы, светодиоды, лазеры, оптрона, управляющие микросхемы, обладающие способностью усиливать напряжение, изменять частоту или преобразовывать электрический ток в свет.

С помощью электронных приборов (базовых элементов) создают электронные устройства (усилители, генераторы, радиоприемники и т. п.).

**Аналоговая электроника** — это электронная техника, работающая с непрерывными сигналами (непрерывно меняющиеся напряжения и ток). К устройствам аналоговой электроники относятся усилители, смесители, преобразователи частоты, фильтры, стабилизаторы напряжения, тока, частоты, а также генераторы гармонических колебаний.

**Импульсная электроника** — это электронная техника, работающая с импульсными сигналами (одиночные импульсы напряжения и тока или последовательности импульсов). К устройствам импульсной электроники относятся импульсные усилители и генераторы, компараторы и т. п.

**Цифровая электроника** — это электронная техника, работающая с отдельными (дискретными) значениями напряжений, токов, частот. К устройствам цифровой электроники относятся логические устройства, оперирующие с сигналами 0 и 1, аналого-цифровые

и цифроаналоговые преобразователи, микропроцессоры, персональные вычислительные машины, сложные вычислительные устройства. Цифровая электроника тесно связана с импульсной техникой, так как сигналы в ней передаются последовательностями импульсов.

Электронная техника начала развиваться в начале прошлого века с изобретения радио.

В радиотехнических системах передачи информации и радиовещании используются мощные высокочастотные колебания напряжения, создающие радиоволны. Модуляция высокочастотных колебаний (т.е. изменение их амплитуды, частоты или фазы) позволяет передавать звуковые частоты и видеосигналы с помощью радиоволн. Для реализации такой передачи информации необходимы мощные высокочастотные генераторы. Для приема сигналов от передатчика на больших расстояниях необходимы высокочувствительные приемники, осуществляющие прием, фильтрацию, преобразование и усиление сигналов.

Благодаря современным достижениям радиозлектроники во всем мире широко используются радиовещание и телевидение, причем телевизионные и радиосигналы через спутниковые ретрансляторы можно принимать в любой точке земного шара.

Современные системы передачи телефонной и цифровой информации, как правило, многоканальные. Они основаны на импульсно-кодовой модуляции, осуществляют передачу в режиме спектрального или временного уплотнения. Развитие этих систем связано с непрерывным ростом потребности людей в общении. Сейчас во всем мире широко применяют местные и международные телефонные сети, сеть Интернет, банковские и другие системы связи.

Многие современные радиотехнические системы передачи информации работают в прерывистом импульсном режиме. Наиболее качественная передача звука и телевизионного изображения осуществляется в цифровом виде в режиме импульсно-кодовой модуляции в цифровых радиорелейных и спутниковых системах связи. Использование импульсного режима в радиотехнических системах связи обусловлено тем, что в импульсе можно развить большую мощность сигнала, перекрывающую радиопомехи. При этом средняя мощность передатчика может быть сравнительно низкой. Спутниковая радиосвязь и цифровое телевидение основаны на принципах работы с импульсными цифровыми данными, что обеспечивает их помехоустойчивость и высокое качество передачи изображения.

Наряду с развитием радиотехнических систем происходило развитие вычислительной техники и электронно-вычислительных

систем, которые также оперируют импульсными электрическими сигналами. Современные вычислительные машины имеют тактовую частоту 2 ГГц, а передача информации в вычислительных комплексах происходит со скоростью до  $2 \cdot 10^9$  импульсов в секунду. На крупных промышленных и научных предприятиях вычислительные машины объединены в комплексы, состоящие из множества вычислительных машин, сети датчиков и исполнительных механизмов. Это позволяет контролировать производство и управлять им без участия человека и в оптимальном режиме.

Следует особо отметить появление новых направлений электроники, связанных с развитием спутниковых и волоконно-оптических систем связи. Они способствовали появлению цифрового телевидения и сотовой связи, совершенствованию радиотехнических систем, включая навигационные. Бурное развитие направлений электроники, относящихся к информационным технологиям, позволило удовлетворить потребность человечества в обмене аудио-, видео- и цифровой информацией по телефону, по электронной почте. Другая ценность таких систем в создании специализированных локальных, региональных и глобальных вычислительных систем обработки данных (банковских, транспортных, гостиничных и т.д.), повышающих качество жизни людей.

С развитием информационных технологий связано возникновение «функциональной электроники», где элементы обработки процессов основаны на использовании полей разной физической природы — магнитных, электрических, акустических и оптических. Другое новое направление электроники связано с развитием нанотехнологии, которая позволяет получать новые материалы с новыми свойствами, а также электронные приборы с сотнями тысяч активных элементов размером в несколько молекул. Уже сейчас создают элементы памяти размерами менее 0,1 мкм, элементы солнечных батарей, сверхчувствительные датчики для контроля вредных примесей в атмосфере. В перспективе устройства нанoeлектроники станут доступными, повседневными и незаменимыми помощниками в нашей жизни.

## 1.2. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

При изготовлении электронных приборов и устройств используют самые разнообразные материалы, выполняющие функции

проводников, диэлектриков, полупроводников. Металлы широко применяются в качестве соединительных проводников и элементов катушек индуктивности; органические и неорганические диэлектрики — в качестве изоляторов и составных частей конденсаторов, полупроводники — для изготовления диодов и транзисторов.

Материалы могут быть органическими (на основе углеродных соединений) и неорганическими, чистыми химическими элементами или соединениями. Обычно материалы используются в твердом виде, но есть устройства, в которых применяются жидкости (жидкие кристаллы и электролиты) и газы (газозарядные ячейки). Многие электронные приборы и устройства основаны на использовании физических особенностей границ раздела материалов с разными свойствами (проводники и полупроводники, проводники и диэлектрики), материалов с различными фазовыми состояниями (твердых и жидких, жидких и газообразных), материалов и вакуума (электронные лампы).

Известно, что все вещества состоят из одного или более химических элементов. Мельчайшими составными частицами вещества являются атом и молекула. Как правило, атомы различных химически чистых элементов соединяются с образованием молекул вещества. Например, молекулы водорода, кислорода, азота и инертных газов состоят из двух атомов.

Молекулы, из которых состоит вещество, определяют свойства данного вещества. Например, молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, что и определяет ее физические свойства (плотность, температуры кипения и замерзания). Молекулы органических веществ состоят из многих атомов, соединенных определенным образом. Различие структур соединений одних и тех же атомов определяет получение веществ с различными физическими свойствами.

Атом состоит из электронов, вращающихся вокруг ядра, находящегося в центре атома и содержащего протоны и нейтроны. Отрицательно заряженные электроны притягиваются к ядру с положительно заряженными протонами и непрерывно вращаются по орбитам, или оболочкам, вокруг него. Атомы разных элементов отличаются друг от друга числом протонов и электронов, например, у атома водорода один протон и один электрон, а атом углерода имеет четыре протона и четыре электрона. Число электронов в атоме равно числу протонов, однако они не могут находиться на одном расстоянии от ядра, так как отталкиваются друг от друга. Электроны также не могут находиться на произвольных расстояниях от ядра и занимают только разрешенные энергетические уровни. На

первом уровне могут находиться максимум два электрона, а на втором и далее — до восьми.

Число протонов определяет атомный номер элемента в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева, общее число протонов и нейтронов — его атомную массу, а число электронов, занимающих последний энергетический уровень, во многом определяет физические и химические свойства вещества. Если последний разрешенный энергетический уровень атома полностью заполнен, то этот атом инертен (инертными газами являются гелий, неон, аргон, криптон, ксенон). Если на последнем энергетическом уровне атома находятся от одного до трех электронов, то они слабо связаны с ядром и атом склонен отдавать эти электроны при соединении с другими элементами. При этом говорят, что он обладает *металлическими свойствами*. Если до полного заполнения последнего энергетического уровня атома не хватает одного, двух или трех электронов (т. е. имеется от одной до трех вакансий), то атом склонен притягивать электроны при соединении с другими элементами. При этом говорят, что он обладает *неметаллическими свойствами*.

В металлических веществах электроны, слабо связанные с ядром (так называемые свободные электроны), под действием электрического потенциала покидают свои орбиты и начинают упорядоченное движение, образуя поток электронов, или электрический ток. Такие вещества, имеющие хорошую электрическую проводимость, называются *проводниками*. Хороший проводник имеет большое число несвязанных (или слабо связанных) с ядром электронов, которые способствуют возникновению электрического тока. Проводник обладает на небольших отрезках (до 1 м) столь малым сопротивлением, что им можно пренебречь. Примерами хороших проводников являются серебро, медь, алюминий. Наличие свободных электронов и, соответственно, свойства металлических соединений определяют высокую теплопроводность проводников.

**Диэлектрик (изолятор)** — это материал, имеющий только связанные электроны, т. е. не имеющий свободных электронов. Изоляторы препятствуют протеканию электрического тока и, следовательно, обладают очень большим сопротивлением (приближающимся к сопротивлению разомкнутой цепи). Примерами изоляторов могут служить диоксид кремния (кварц), стекло, сухое дерево, резина, поливинилхлорид, слюда, полистирол и др. Если диэлектрик поместить в электрическое поле, то электроны его молекул ориентируются в определенном порядке за счет поляризации. При этом говорят, что молекулы диэлектрика поляризуются.

Атомы **полупроводников** относятся к четвертой группе Периодической системы элементов Д. И. Менделеева. К ним относятся углерод (C), кремний (Si) и германий (Ge). Как правило, чистые полупроводники являются аморфными веществами. Однако при определенных условиях при получении из расплавов они могут образовывать монокристаллы с правильной кристаллической решеткой.

К полупроводникам относятся и некоторые соединения металла и неметалла, например, арсенид галлия (GaAs) и уникальные соединения — карбид кремния (SiC) и нитрид кремния (SiN).

Полупроводники имеют слабую собственную проводимость, обусловленную наличием небольшого количества свободных электронов. Причем появление свободного электрона под действием температуры или света создает появление положительно заряженного атома с недостающим электроном, который называется **дыркой**. При этом дырка может захватывать электрон соседнего атома, который в этом случае станет дыркой. Таким образом, дырки могут перемещаться до тех пор, пока не найдут свободный электрон и соединятся с ним. Свободные электроны и дырки полупроводника — основные носители зарядов, они создают слабую собственную проводимость. Процесс образования электронов и дырок под действием теплоты или света представляет собой генерацию носителей зарядов. Количество свободных электронов и дырок в полупроводниках возрастает при повышении температуры, что приводит к увеличению их проводимости, в отличие от металлов, проводимость которых с ростом температуры падает.

Проводимость полупроводника можно повысить посредством введения определенного количества легирующих присадок (примесей). Некоторые присадки (например, атомы мышьяка As, неметалла пятой группы) вносят в кристаллическую решетку атома германия дополнительные электроны, в результате чего получают полупроводник *n*-типа (*negative*). Такие атомы называются атомами-донорами. Добавление к кристаллическому германию атомов-акцепторов (например, атомов алюминия Al, металла третьей группы) создает недостаток электронов в его внешней оболочке, т. е. образование дырок, имеющих положительный заряд. Такие полупроводники называются полупроводниками *p*-типа (*positive*). Полученные при внедрении примесей электроны являются основными носителями для полупроводников *n*-типа, а дырки — для полупроводников *p*-типа.

Явления проводимости в металлах, диэлектриках и полупроводниках хорошо описываются на основе зонной теории, которая

вводит понятие энергетического состояния электрона, обладающего кинетической и потенциальной энергией. Согласно зонной теории энергия электрона в твердом теле может изменяться в некоторых пределах практически непрерывно, но при этом существуют интервалы значений энергии (запрещенные уровни), которые электрон может преодолевать только скачком. Электроны в твердом веществе могут находиться только в валентной зоне (ВЗ) или в зоне проводимости (ЗП), между которыми имеется запрещенная зона (ЗЗ). Для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости требуется придать ему дополнительную энергию  $\Delta E$ , называемую энергией активации и измеряемую в электрон-вольтах (эВ). У атомов полупроводникового кремния энергия активации  $\Delta E_{Si} = 1,12$  эВ выше, чем у атомов германия  $\Delta E_{Ge} = 0,72$  эВ, поэтому перевести кремний в проводящее состояние труднее. Введением легирующих примесей можно уменьшить зону проводимости или увеличить валентную зону и таким образом уменьшить ширину запрещенной зоны.

Расположение электронов и ширина запрещенной зоны полностью определяют электрические свойства вещества. Дело в том, что валентные электроны сильно связаны с атомами и не могут переходить от атома к атому под действием электрического поля. И наоборот, электроны, находящиеся в зоне проводимости, менее связаны с атомами и легко перемещаются от одного атома к другому под воздействием электрического поля. Зонная теория объясняет это наличием многих свободных уровней в зоне проводимости.

У диэлектриков валентная зона полностью заполнена электронами и отделена от зоны проводимости широким барьером запрещенной зоны. Вследствие этого у диэлектриков нет свободных электронов в зоне проводимости и, соответственно, они имеют плохую проводимость.

Полупроводники имеют заполненную валентную зону и сравнительно узкую запрещенную зону. При низких температурах электроны полупроводников находятся в валентной зоне и, следовательно, ведут себя как диэлектрики.

С повышением температуры и под воздействием света часть электронов полупроводника приобретает энергию, достаточную для преодоления ЗЗ, и перескакивает в ЗП, создавая тем самым условия для появления электропроводности. В связи с переходом части электронов в ЗП в ВЗ полупроводника образуется соответствующее число свободных энергетических уровней — дырок. Это позволяет электронам перемещаться внутри ВЗ под действием электрическо-

го поля с одного уровня на другой, создавая дырочную проводимость. С повышением температуры все больше электронов проникает в ЗП, повышая тем самым электропроводность полупроводника, причем сильнее она повышается у полупроводников с более узкой ЗЗ.

При приложении напряжения энергетические зоны в веществе становятся наклонными, причем угол их наклона возрастает с увеличением напряженности электрического поля.

Если потенциальная энергия электрона в поле  $E_n = q\varphi$  (где  $q$  — заряд электрона;  $\varphi$  — разность потенциалов) выше энергии активации  $\Delta E$ , то электроны могут проникать (туннелировать) из ВЗ в ЗП, создавая электронную проводимость. При этом одновременно образуются и дырки (атомы без одного электрона), создающие дырочную проводимость.

Введение в полупроводник легирующих примесей приводит к появлению дополнительных энергетических уровней внутри ЗЗ. Если эти дополнительные уровни находятся вблизи ЗП (при введении донорной примеси), то электроны примесных атомов легко переходят в нее, увеличивая проводимость полупроводника. Если же дополнительные уровни находятся вблизи ВЗ (при введении акцепторной примеси), то на них легко переходят электроны полупроводника из ВЗ, создавая дырки и увеличивая дырочную проводимость.

К полупроводникам относятся вещества, у которых ширина ЗЗ не превышает 2,5 эВ. При температуре 300 К ширина ЗЗ у кремния (Si) составляет 1,12 эВ, у германия (G) — 0,75 эВ, у арсенида галлия (GaAs) — 1,43 эВ, у карбида кремния (SiC) — 2,4... 3,4 эВ. Энергия ионизации донорных и акцепторных примесей находится в пределах 0,01... 0,05 эВ. Средняя энергия теплового возбуждения при комнатной температуре составляет 0,025 эВ. Поэтому введение в полупроводник ничтожного количества примесей приводит к многократному увеличению проводимости.

Согласно зонной теории в полупроводниках под действием теплоты, света и колебаний кристаллической решетки постоянно происходит образование свободных электронов и дырок, т.е. генерация носителей зарядов. Одновременно происходит обратный процесс — возвращение электронов в валентную зону (рекомбинация носителей зарядов). Эти процессы приводят к формированию равновесной концентрации электронов и дырок в объеме полупроводника.

Под воздействием электрического поля начинается генерация новых носителей зарядов и возникает избыточная (неравновесная) концентрация электронов и дырок. Избыточная концентрация но-

сителей зарядов может образовываться в некоторых областях полупроводниковой структуры за счет инжекции (впрыскивания) и экстракции (втягивания) электронов электрическим полем, а также в результате аккумуляции зарядов в ловушках.

Прямая рекомбинация электронов и дырок маловероятна, так как в основном они находятся в разных местах полупроводниковой структуры. Обычно рекомбинация проходит с участием рекомбинационных ловушек, роль которых выполняют примесные атомы либо дефекты кристаллической решетки и поверхности. При этом электрон из зоны проводимости переходит в ловушку и находится там до тех пор, пока к нему не подойдет дырка; после чего происходит второй этап рекомбинации — электрон переходит на свободный уровень в валентной зоне дырки.

Поскольку при рекомбинации электрон переходит на более низкий энергетический уровень, выделяется избыточная энергия. Если при этом излучается квант света — **фотон**, рекомбинация называется излучательной. При безызлучательной рекомбинации энергия электрона передается кристаллической решетке полупроводника с образованием кванта тепловой энергии колебаний — **фонона**.

### 1.3. ОБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА $p$ — $n$ -ПЕРЕХОДА

Если полупроводник  $p$ -типа соединить с полупроводником  $n$ -типа и поместить в высокотемпературный вакуумный реактор, то под действием диффузии образуется монолитный пограничный слой с разными типами полупроводников по обеим сторонам границы раздела. Этот пограничный слой, называемый  $p$ — $n$ -переходом, обладает особыми свойствами. Электроны в нем из области с проводимостью  $n$ -типа в нормальном состоянии под действием температурных колебаний и диффузии перетекают в область с проводимостью  $p$ -типа, чтобы заполнить в ней притягивающие их дырки. Дырки также диффундируют в  $n$ -область. Одновременно в  $p$ -области образуются некомпенсированные заряды акцепторной примеси, а в  $n$ -области — положительные заряды донорной примеси. Эти заряды создают электрическое поле и контактную разность потенциалов, препятствующую дальнейшему перемещению основных носителей зарядов и создающую для них потенциальный барьер. Перетекание электронов продолжается до тех пор, пока в  $p$ — $n$ -переходе не образуется нейтральная зона, или так называ-

емый обедненный слой, и потенциальный барьер достигнет максимальной величины.

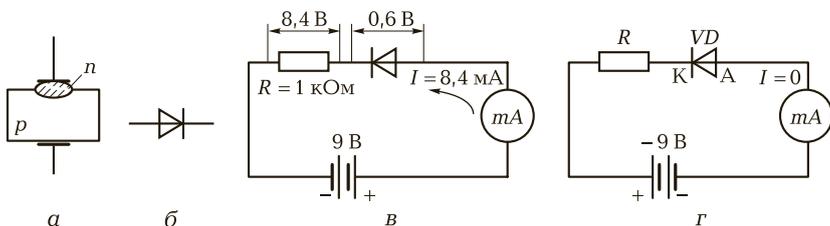
Вместе с тем электрическое поле контактной разности потенциалов обеспечивает возможность движения случайно возникающих неосновных носителей зарядов (дырок из  $n$ -области и электронов из  $p$ -области). Это приводит к появлению дрейфового тока, состоящего из электронной и дырочной составляющих. Если нет приложенного напряжения, то быстро наступает равновесие, которое собственно и препятствует дальнейшему росту потенциального барьера.

В обедненном приконтактном слое полупроводника атомы, как и в диэлектрике, нейтральны и дипольно ориентированы, а потенциальный барьер препятствует дальнейшему движению основных носителей зарядов. Для того чтобы пересечь границу раздела, носители зарядов должны обладать энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера. Источником этой энергии может служить внешняя электродвижущая сила (ЭДС), приложенная к полупроводникам по обе стороны  $p$ — $n$ -перехода.

При прямом включении источника ЭДС, когда плюс подключается к полупроводнику  $p$ -типа, а минус к полупроводнику  $n$ -типа, электрический ток будет протекать только тогда, когда напряжение  $U_{\text{п.б}}$  превысит потенциальный барьер. Высота потенциального барьера зависит от типа применяемого полупроводника. Для германия она составляет 0,3 В, а для кремния — 0,6 В. Если внешнее напряжение превышает потенциальный барьер, области с электронной и дырочной проводимостями сближаются, обедненная область исчезает, электроны впрыскиваются (инжектируются) в  $p$ -область, объединяются с дырками (рекомбинируют) и, перемещаясь далее от атома к атому, создают электрический ток в цепи. Аналогично дырки инжектируются в  $n$ -область, где рекомбинируют, соединяясь с электронами.

Инжектированные носители зарядов рекомбинируют не сразу, а в течение некоторого времени (времени жизни носителей зарядов), пробегая при этом в среднем некоторое расстояние (диффузионную длину пробега).

При обратном включении источника напряжения электроны полупроводника с проводимостью  $n$ -типа ( $n$ -области) притягиваются положительным полюсом источника напряжения смещения, а дырки  $p$ -области притягиваются отрицательным полюсом. В результате обедненный слой расширяется и увеличивается потенциальный барьер, препятствующий проникновению электронов через границу раздела. Таким образом, через  $p$ — $n$ -переход, при обратном включе-



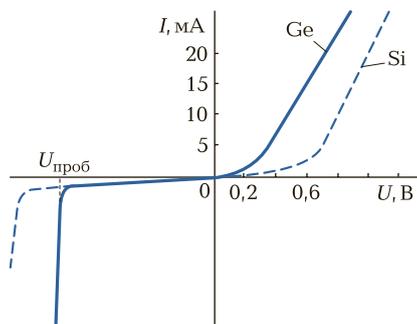
**Рис. 1.1.** Структура плоскостного полупроводникового диода [а], его УГО [б] и схемы снятия ВАХ при прямом [в] и обратном [г] включении источника внешней ЭДС

нии напряжения ток практически не будет проходить. Следовательно,  $p$ — $n$ -переход имеет одностороннюю проводимость, т.е. в одном направлении он пропускает ток, а в другом — не пропускает.

Структура полупроводникового диода с  $p$ — $n$ -переходом и его условное графическое обозначение (УГО) показаны на рис. 1.1, а, б. Кремниевый диод состоит из двух слоев. Первый (вплавленный) слой состоит из кремния, легированного фосфором ( $n$ -область). Примесь фосфора создает избыток электронов в зоне проводимости (электронную проводимость). Второй слой состоит из кремния, легированного бором ( $p$ -область), в котором имеется избыток атомов с недостатком электронов (т.е. дырок). В этом слое преобладает дырочная проводимость. В контактной области образуется  $p$ — $n$ -переход, создающий одностороннюю проводимость. В показанной на рис. 1.1 структуре  $p$ -область является более массивной и содержит большее количество примесей, чем  $n$ -область, поэтому ее называют **базой**.

Зависимость силы тока в диоде от подаваемого к его обкладкам напряжения называется **вольт-амперной характеристикой** (ВАХ). Схема для снятия ВАХ диодов при прямом включении внешнего источника напряжения, т.е. когда плюс подключается к полупроводнику  $p$ -типа, а минус — к полупроводнику  $n$ -типа, показана на рис. 1.1, в. Схема снятия ВАХ диодов при обратном включении внешнего источника ЭДС, т.е. когда плюс подключается к полупроводнику  $p$ -типа, а минус — к полупроводнику  $n$ -типа, показана на рис. 1.1, г.

Типичные вольт-амперные характеристики кремниевых и германиевых диодов показаны на рис. 1.2. Тангенс угла наклона кривой зависимости тока от напряжения определяет крутизну ВАХ, которая зависит от поперечного сечения  $p$ — $n$ -перехода диода. Обратное напряжение, при котором происходит пробой диода ( $U_{\text{проб}}$ ) зависит



**Рис. 1.2.** Вольт-амперные характеристики германиевого (Ge) и кремниевого (Si) диодов

от толщины слоев  $p$ - и  $n$ -типов и ширины запрещенной зоны полупроводника. У кремниевых диодов  $U_{\text{проб}}$  больше, чем у германиевых, и может достигать 1 000 В.

Пробой  $p$ — $n$ -перехода может быть электрическим (обратимым) или тепловым (необратимым). Электрические пробой в свою очередь подразделяются на лавинные и туннельные.

При лавинном пробое отдельные электроны  $p$ -области (неосновные носители зарядов) под действием высокого обратного напряжения  $p$ — $n$ -перехода вырываются из нее и, соударяясь с атомами перехода, вызывают лавинное размножение электронов, а следовательно, и резкое возрастание тока. Напряжение на диоде падает. При этом попытки его повышения приводят к усилению тока, перегреву диода и его разрушению.

Туннельный пробой наблюдается у некоторых диодов с высокими концентрациями легирующих присадок и узкой зоной  $p$ — $n$ -перехода, когда под действием обратного напряжения верхний уровень валентной зоны их  $p$ -области начинает превышать нижний уровень зоны проводимости  $n$ -области. В этом случае электроны могут переходить из  $p$ -области в  $n$ -область без затрат энергии на преодоление запрещенной зоны (т.е. могут туннелировать). При дальнейшем повышении обратного напряжения начинается линейное нарастание тока за счет туннелирования. После снятия напряжения свойства  $p$ — $n$ -перехода восстанавливаются.

Тепловой пробой  $p$ — $n$ -перехода наступает при нарушении теплового баланса, т.е. когда выделяемое количество теплоты превышает количество теплоты, рассеиваемое в  $p$ — $n$ -переходе. При этом температура перехода повышается, наступает разрушение кристаллической решетки и диода.

Емкость  $p$ — $n$ -перехода определяет быстродействие электронных приборов и называется **барьерной** (зарядной). Барьерная емкость зависит в основном от площади перехода и приложенного напряжения. При повышении прямого напряжения ширина перехода уменьшается, а число нескомпенсированных зарядов и емкость увеличиваются. При повышении обратного напряжения барьерная емкость снижается.

Барьерную емкость сплавного несимметричного  $p$ — $n$ -перехода, у которого концентрация акцепторов  $N_{ак}$  в  $p$ -области больше, чем концентрация доноров  $N_D$  в  $n$ -области, можно рассчитать по формуле:

$$C_{p-n} = S\sqrt{0,5\varepsilon_0\varepsilon N_{ак} / U},$$

где  $S$  — площадь перехода;  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon$  — диэлектрические проницаемости соответственно полупроводника и  $p$ — $n$ -перехода;  $U$  — обратное напряжение перехода.

Барьерная емкость ухудшает свойства полупроводниковых приборов на основе  $p$ — $n$ -перехода, используемых при выпрямлении токов высокой частоты, и снижает быстродействие этих приборов при выполнении с их помощью переключений в импульсных электронных ключах, поэтому ее стараются уменьшить путем уменьшения площади перехода.

Изменение емкости  $p$ — $n$ -перехода при изменении напряжения используют в схемах электронного изменения частоты генераторов с применением варикапов (диодов с изменяемой емкостью).

При прямом токе в базе диода с  $p$ — $n$ -переходом возникает диффузная емкость, связанная с появлением не успевших рекомбинировать неосновных носителей зарядов. При резком переключении полярности диода диффузная емкость вызывает появление скачка обратного тока, т. е. временное нарушение запирающего свойства перехода. Этот эффект, связанный с «рассасыванием» зарядов, также нежелателен и его устраняют специальными диодами Шоттки, созданными на основе контактного перехода металл—полупроводник.

Следует отметить, что работа многих электронных приборов основана на физических явлениях, происходящих в зоне контакта веществ с разными электропроводящими свойствами, поэтому рассмотрим эти явления подробнее.

**Контактные явления** — это общее название физических явлений, возникающих в области контакта двух материалов с различной электропроводностью. К числу важнейших контактных

явлений относится возникновение контактной разности потенциалов металлов, имеющих различную работу выхода электронов  $A_{\text{вых}}$ .

**Работой выхода** называется работа, которую затрачивает электрон для преодоления силы притяжения к атомам вещества, т. е. для выхода из вещества в вакуум.

При тесном соприкосновении металлов с разной работой выхода или соединении их в вакуумной диффузной печи на свободных концах этих металлов возникает контактная разность потенциалов, обусловленная перетеканием части электронов из одного металла в другой и появлением разной концентрации электронов в проводниках. В результате один из проводников оказывается заряженным положительно, а другой — отрицательно. Созданная при этом разность потенциалов, характерная для данной пары металлов, препятствует дальнейшему перетеканию электронов. В отличие от ЭДС источников тока при замыкании этой цепи контактная разность потенциалов не приводит к возникновению электрического тока, так как электроны находятся в равновесном состоянии по обеим сторонам соединения.

Если зону контакта (спай) металлов нагревать, то равновесие электронов нарушится и возникнет термоэлектродвижущая сила. Разность напряжений при термоЭДС мала, КПД преобразования теплоты в электричество незначителен вследствие высокой теплопроводности металлов, поэтому термоЭДС используют только в датчиках температуры. На основе контактной разности потенциалов работают термодпары из сплавов хромеля и алюмеля, имеющие линейную зависимость силы тока от температуры в диапазоне от 50 до 500 °С. Термодпары из платины и родия имеют линейную зависимость тока в температурном диапазоне от 50 до 1 200 °С.

Контактная разность потенциалов возникает и при соприкосновении полупроводников с различными типами проводимости. Контакт между полупроводниками с *p*- и *n*-проводимостями создает область *p*—*n*-перехода с обедненным (запорным) слоем, обладающим односторонней проводимостью. Возникающая при соединении таких полупроводников контактная разность потенциалов обладает теми же свойствами, что и при соединении разнородных металлов.

Возникновение при нагреве соединения разнородных полупроводников термоЭДС используется при создании источников питания для радиоприемников и маломощных радиопередатчиков. Благодаря тому, что теплопроводность полупроводников меньше, чем

металлов, КПД полупроводниковых термогенераторов выше, чем металлических, и они могут применяться там, где нет других источников тока. Для нагрева спаев термогенераторов применяются нагревательные устройства.

Как уже отмечалось ранее, металлы имеют свободные электроны проводимости. Следовательно, при контакте металла с легированным полупроводником может образоваться контактный переход, похожий на  $p-n$ -переход в полупроводниках.

Переходы металл—полупроводник впервые были исследованы немецким ученым Шоттки, поэтому и запирающий контакт называют барьером Шоттки. На основе таких контактов были созданы диоды Шоттки, обладающие высоким быстродействием вследствие того, что в них не происходит накопления диффузных зарядов. Эти диоды используются в СВЧ-схемах и ускоряющих цепях ключевых каскадов, которые будут рассмотрены далее.

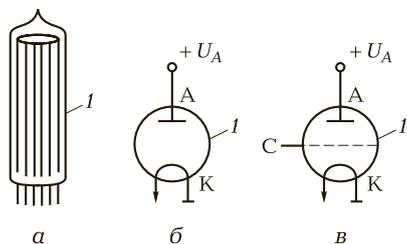
Особенности поведения электронов в полупроводниках и контактных зонах позволили создать новые уникальные электронные приборы, устройства и практически важные изделия современной электронной техники.

Свойства  $p-n$ -переходов используются в разных электронных полупроводниковых приборах: диодах, транзисторах, тиристорах, динисторах, светодиодах, фотодиодах и других приборах, составляющих современную элементную базу электронной техники. На основе полупроводников с  $p-n$ -переходами формируются также сложные микросхемы, имеющие сотни и тысячи электронных элементов на одном кристалле и выполняющие сложные цифровые или специальные аналоговые функции.

## 1.4. ЭЛЕКТРОННЫЕ ВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

**Электронные лампы.** Первыми в радиоэлектронной технике начали использовать вакуумные электронные приборы — электронные лампы (рис. 1.3).

Работа электронной лампы основана на создании потока электронов в вакууме и управлении им с помощью электрических полей, формируемых специальными электродами. Электронная лампа состоит из нескольких металлических электродов, заключенных в стеклянный, керамический или металлокерамический баллон, внутри которого создан высокий вакуум. Один из электродов (катод) нагревают спиралью до температуры 500...700 °С.



**Рис. 1.3.** Внешний вид (а), схемы диода (а) и триода (б):

1 — стеклянный баллон; К — катод; А — анод; С — управляющая сетка

Под действием высокой температуры электроны покидают металлическую поверхность катода и образуют вокруг него электронное облако.

В простейшей электронной лампе *guoge* второй электрод (анод) имеет форму цилиндра, охватывающего катод. Если к диоду подвести постоянное напряжение, как в полупроводниковом диоде (см. рис. 1.1, в), т. е. плюс — на анод и минус — на катод (прямое включение), электроны под действием электрического поля устремятся от катода к аноду, создавая электрический ток в цепи. Если в цепь включить резистор  $R$ , то при появлении тока в лампе на нем появится перепад напряжений.

При малом анодном напряжении только небольшая часть электронов притягивается анодом, а остальные электроны образуют пространственный заряд вокруг катода. По мере возрастания анодного напряжения увеличивается число электронов, достигающих катода, и ток в цепи растет, а плотность пространственного заряда уменьшается. Когда напряжение и ток возрастают настолько, что пространственный заряд полностью «рассасывается» и все электроны, испускаемые катодом, достигают анода, рост тока увеличением анодного напряжения замедляется и наступает режим насыщения.

Измеряя зависимость тока от напряжения, получают ВАХ диода, как в полупроводниковом диоде (см. рис. 1.2).

Если поменять полярность подключаемого к диоду напряжения, т. е. к аноду подвести минус, а к катоду — плюс (обратное включение), возникновения электрического тока в электронной лампе не произойдет, так как анод при этом остается «холодным» и не испускает электроны. Следовательно, электронная лампа диод обладает односторонней (вентильной) проводимостью.

Это свойство используется при применении электронных ламп в качестве детектора в радиоэлектронных устройствах и в качестве выпрямителя при преобразовании переменного напряжения в постоянное.

Электронная лампа *триод* имеет третий электрод, устанавливаемый между анодом и катодом. Он располагается ближе к катоду,

поэтому напряжение, подаваемое на электрод, сильнее влияет на поток электронов между анодом и катодом. Поскольку третий электрод выполняется действительно в виде сетки или спирали, окружающей катод, то сам он забирает мало электронов, а большая их часть проскакивает к аноду. Из-за близкого расположения сетки к катоду небольшие изменения напряжения на ней сильнее сказываются на потоке электронов к аноду и значении анодного тока. Именно это свойство триода используется для усиления электрических сигналов.

На основе триодов и других электронных ламп разработано множество электронных устройств, в частности электронных усилителей разнообразного назначения: резонансных, широкополосных, импульсных, силовых и т. п. Работа триодов во всех усилителях примерно одинаковая, а различие усилителей определяется внешними электрическими цепями.

**Ламповый генератор** — устройство, в котором при помощи электронной лампы создаются незатухающие электрические колебания. Основными элементами простейшего лампового генератора являются электронная лампа (триод) с источниками питания и колебательный контур (см. подразд. 2.2).

**Клистрон** — это электронный прибор, представляющий собой сочетание многоэлектродной лампы с объемными резонаторами и предназначенный для усиления и генерирования колебаний сверхвысоких частот (в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн). Отражательный клистрон — электронный прибор для генерации ультравысоких частот (свыше 100 ГГц), относящихся к миллиметровому диапазону длин волн.

**Магнетрон** — это многорезонаторный электронный прибор для генерации сверхвысоких частот большой мощности. Анод магнетрона представляет собой массивный цилиндр, в центральной полости которого расположен катод, а в стенках находятся цилиндрические резонаторные полости.

Для создания нужной траектории электронов, идущих от катода к аноду, применяется поперечное магнитное поле. Под действием этого поля искривляется путь в соответствии с законом Лоренца вылетающих из катода электронов. Приближаясь к аноду, электроны движутся почти по касательной к его цилиндрической поверхности с прорезями, направленными к резонаторным полостям. Под действием случайных изменений потока электронов в резонаторах возникают колебания, которые модулируют эти потоки электронов, создавая, таким образом, устойчивую генерацию СВЧ-колебаний. Часть энергии колебаний отбирается в рабочую

линию из одного резонатора коаксиальным волноводом с помощью петли связи.

**Лампа бегущей волны** (ЛБВ) — специальная электронная лампа для усиления и генерации колебаний сверхвысоких частот (дециметровых и сантиметровых волн). Внутри этой лампы, выполненной в виде цилиндра диаметром 3 см и длиной 15... 20 см, вдоль провода, свитого в длинную спираль, распространяется электромагнитная волна со скоростью света ( $c \approx 300\,000$  км/с). Вдоль оси спирали электрическое поле этой волны распространяется с меньшей скоростью (так как эта последняя скорость представляет собой проекцию скорости распространения волн вдоль спирали на направление оси спирали). Одновременно вдоль оси спирали движется пучок электронов приблизительно со скоростью перемещения поля. Взаимодействуя с электрическим полем волны, электроны отдают ему часть своей энергии и тем самым усиливают волну, распространяющуюся по спирали. При достаточно большом усилении в лампе наступает генерация колебаний. Основные достоинства лампы бегущей волны как усилителя: возможность прямого усиления СВЧ-сигналов в широкой полосе частот (до 10 % средней частоты) и сравнительно низкий шумовой фактор.

**Лампа обратной волны** (ЛОВ) — электронная лампа, в которой в отличие от лампы бегущей волны электроны, сконцентрированные в узкий пучок, движутся не в одном направлении с движущимся вдоль замедляющего устройства полем бегущей волны, а встречно. При этом так же, как и в ЛБВ, взаимодействие движущихся электронов с полем бегущей волны приводит к усилению этого поля. Основная область применения лампы обратной волны — генерация колебаний в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн.

**Электронно-лучевые трубки.** Модификациями электронных ламп являются такие электровакуумные приборы, как кинескопы телевизоров, электронно-лучевые трубки осциллографов, рентгеновские трубки, электронно-оптические преобразователи и т. п.

В основе действия электронно-лучевых трубок и кинескопов лежит принцип электронной пушки. Это нагреваемый спиралью катод и ряд электродов, формирующих направленный пучок электронов, интенсивность которых регулируется сеточным электродом.

Специальные генераторы в осциллографах и телевизорах формируют линейно изменяющееся напряжение, которое подается на отклоняющие электроды и создает развертку изображения по вертикали и горизонтали. В результате на экране получают двумерную картину изображения.

Электронно-лучевые устройства используются и в приборах (электронных микроскопах), и в промышленных установках (для высокоточной резки металлов электронным лучом). Также развивается новое направление микросхемотехники — нанотехнология. С помощью средств нанотехнологии (электронным лучом) резисторы, конденсаторы, проводники, диоды и транзисторы изображаются на слоистых полупроводниковых структурах. При этом размеры полученных отдельных элементов составляют десятки нанометров, т. е. они примерно в сто раз меньше аналогичных элементов, изготовленных фотолитографией.

**Газоразрядные приборы и газовые лазеры. Газовый разряд** (электрический разряд в газе) — процесс прохождения электрического тока через газ. В нормальном состоянии газ не является проводником электричества. Однако в достаточно сильном электрическом поле (напряжением 50 кВ/см) в газе может возникнуть электрический разряд, например, в виде искры (искровой разряд) или дуги (дуговой разряд). Если же газ разрежен (до 5 мм рт. ст.), то при довольно низких напряжениях (50 ... 100 В/см) возникает разряд, сопровождающийся умеренным током и свечением газа, так как под действием электрического поля имеющиеся в газе в небольшом количестве свободные электроны проходят большой путь до столкновения с молекулой газа, приобретая при этом высокую скорость и значительную кинетическую энергию. Этой энергии оказывается достаточно для того, чтобы вызвать ионизацию газа, вследствие чего будут появляться все новые и новые свободные электроны и положительные ионы, которые, передвигаясь от одного электрода к другому, будут переносить с собой электрические заряды.

Ионизованный газ является хорошим проводником и может пропускать большие токи. Образование ионов, а также соединение ионов и электронов в нейтральные атомы, происходящие все время в газовом разряде, обычно сопровождаются свечением, характер которого зависит от вида газа. Если напряжение источника питания разряда мало или если последовательно с прибором, в котором происходит газовый разряд, включено достаточно большое ограничивающее сопротивление, разряд будет иметь тлеющий характер, т. е. малую плотность тока.

**Газовый разрядник** (газоразрядник) — устройство, предназначенное для замыкания электрической цепи при возникновении тлеющего или дугового газового разряда под действием электрического напряжения. В этот момент промежуток между электродами газоразрядника становится проводящим и в цепи начинает протекать ток. После того как напряжение на газоразряднике падает

ниже значения, необходимого для поддержания разряда, ток в нем прекращается и цепь, в которую включен газоразрядник, разрывается. Газоразрядники применяют главным образом в тех случаях, когда замыкание или размыкание цепи необходимо выполнить за столь короткое время, за которое механические выключатели не успеют сработать. Например, газоразрядники устанавливают для защиты электросетей от больших скачков напряжений при ударе молнии.

К газоразрядным относятся следующие приборы:

- с несамостоятельным разрядом — газотроны, тиратроны;
- с тлеющим разрядом — газосветные лампы, газоразрядные ячейки газосветных индикаторных панелей, газовые лазеры, газовые стабилизаторы напряжения, декатроны и др.;
- с дуговым автоэлектронным разрядом — ртутные выпрямители, игнитроны и др.

Газоразрядник с подогреваемым катодом и сеткой называется тиратроном. Напряжение на сетке меняет только момент включения тиратрона и не влияет на ток, протекающий в нем во включенном состоянии.

**Газовый лазер** (квантовый оптический генератор) — прибор для генерации когерентного оптического излучения, использующий излучение тлеющего газового разряда.

В газовом лазере, как и в обычной лампе дневного света, имеется трубка из кварцевого стекла, заполненная определенным составом газа при низком давлении, и два электрода (анод и катод). На обоих торцах трубки находятся зеркала. При подаче на электроды высокого напряжения (5... 15 кВ) в трубке возникает тлеющий разряд со свечением, характерным для конкретного газа.

Свечение газа означает, что при соударении электронов с атомами возникают возбужденные электроны, которые, возвращаясь в исходное состояние, испускают свет. Некоторые атомы и молекулы газов имеют метастабильные энергетические уровни, на которых электроны задерживаются несколько микросекунд. При этом возникает значительное количество атомов с инверсной заселенностью электронов на метастабильном уровне. При переходе с этого уровня на устойчивый нижний энергетический уровень электроны испускают излучение определенной длины волны, которое, распространяясь в среде с инверсной заселенностью, «сбрасывает» электроны, находящиеся в метастабильном состоянии. Эти электроны, переходя на нижний уровень, добавляют свое излучение пришедшей волне и усиливают ее. Таким образом, газовая среда в раз-

ряде усиливает излучение, а установленные на торцах трубки зеркала заставляют это излучение повторно проходить активную (усиливающую) газовую среду, накапливая при этом энергию. Если в одном из зеркал сделать отверстие или установить полупрозрачное зеркало, то часть энергии будет излучаться из лазера в пространство.

Для получения лазерного излучения необходимо соблюдение следующих условий:

- в используемой для генерации среде должны присутствовать атомы, имеющие метастабильный энергетический уровень, на котором задерживаются электроны. Причем переход электронов с этого уровня должен сопровождаться излучением в требуемом диапазоне (в видимой или инфракрасной области);
- к области генерации должна подаваться энергия (электрический ток), должны быть созданы условия перевода электронов на более высокий метастабильный энергетический уровень («накачка» электронов);
- должны иметься зеркальные отражатели, образующие резонатор и обеспечивающие многократное прохождение луча в области генерации и усиления излучения.

Непрерывно излучающие лазеры имеют сравнительно низкую мощность излучения. Большая мощность излучения достигается в импульсе. Для получения импульсного излучения резонатор «включается» только на короткое время. В этом случае в промежутке между импульсами идет накопление электронов на метастабильных уровнях, а в момент «включения» резонатора происходит лавинообразный «сброс» электронов с этих уровней, сопровождающийся быстрым ростом энергии излучения. Благодаря этому удается получить импульсы с мощностью излучения несколько киловатт и длительностью несколько пикосекунд.

Излучение лазера обладает необычными свойствами — оно когерентно, т. е. стабильно по фазе, имеет узкую спектральную полосу, плоский фронт и очень малую расходимость. Излучение лазера обладает также сравнительно большой мощностью, позволяющей использовать его в технологических целях.

Наибольшее распространение в измерительной технике и медицине получили гелий-неоновые (HeNe) лазеры с длиной волны излучения 0,633 мкм (красного цвета, мощностью от 1 до 5 мВт). Используются также аргоновые (Ar) лазеры с длиной волны излучения 0,513 мкм (зеленого цвета, мощностью от 1 мВт до 5 Вт) и углекислотные лазеры (CO<sub>2</sub>-лазеры) с длиной волны излучения

10,6 мкм (инфракрасного диапазона, мощностью от 10 Вт до 5 кВт). Благодаря большой мощности излучения  $\text{CO}_2$ -лазер применяется для резки и сварки стальных листов, резки стеклянных строительных блоков и керамики, плавления тугоплавких и оптических стекол.

Благодаря своим особенностям лазеры находят широкое применение в научных исследованиях, приборостроении, различных технологических процессах, медицине, военной технике. Создание лазеров и когерентных оптических систем привело к появлению нового направления электронной техники — **квантовой электроники**.

## 1.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

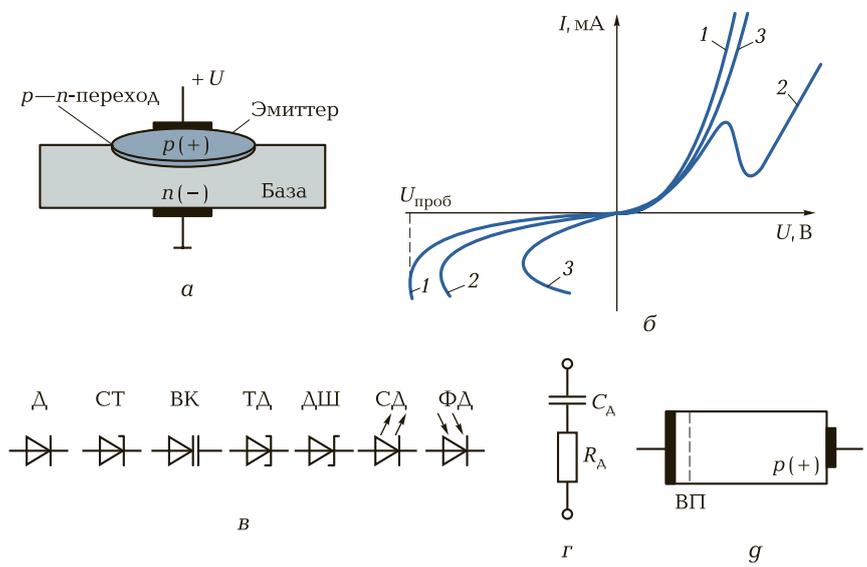
**Устройство, характеристики и виды диодов.** Свойства полупроводников, легированных присадками, создающими  $p$ - и  $n$ -проводимость, подробно рассматривались в подразд. 1.3. Там же были рассмотрены и свойства контактного слоя ( $p$ — $n$ -перехода), обладающего односторонней проводимостью (см. рис. 1.1) и характерной вольт-амперной характеристикой (см. рис. 1.2). На основе  $p$ — $n$ -перехода создан ряд полупроводниковых приборов с односторонней (вентильной) проводимостью (диоды).

**Полупроводниковый диод** — прибор с выпрямляющим электрическим переходом. Выпрямляющими могут быть электронно-дырочный переход ( $p$ — $n$ -переход полупроводника одного типа), гетеропереход (контакт разнотипных полупроводников) или контакт металл—полупроводник.

Полупроводниковые диоды широко используются в электронных устройствах. В зависимости от выполняемых функций они различаются исполнением и свойствами.

Структура сплавного полупроводникового диода на основе  $p$ — $n$ -перехода приведена на рис. 1.4, а. Электроны из области с проводимостью  $n$ -типа в нормальном состоянии под действием температурных колебаний и диффузии перетекают в область с проводимостью  $p$ -типа и заполняют притягивающие их дырки в этой области (рекомбинируют с дырками). Перетекание электронов продолжается до тех пор, пока по обе стороны  $p$ — $n$ -перехода не образуется нейтральная зона, т. е. обедненный слой.

В этом обедненном слое атомы, как в диэлектрике, нейтральны и дипольно ориентированы, что приводит к возникновению потенциального барьера, препятствующего дальнейшему движению



**Рис. 1.4.** Полупроводниковые диоды:

*а* — структура; *б* — ВАХ; *в* — УГО; *г* — эквивалентная схема; *д* — структура диода Шоттки; 1...3 — кривые, соответствующие лавинному, туннельному и тепловому пробоям; Д — диод; СТ — стабилитрон; ВК — варикап; ТД — туннельный диод; ДШ — диод Шоттки; СД — светодиод; ФД — фотодиод;  $C_A$  и  $R_A$  — дифференциальные емкость и сопротивление диода, проявляющиеся при высоких частотах

электронов через границу раздела. Для преодоления границы раздела электроны должны обладать энергией, превышающей потенциальный барьер. Источником этой энергии может служить напряжение, приложенное к полупроводникам по обе стороны  $p-n$  перехода. При прямом включении напряжения, т. е. когда плюс подключается к полупроводнику  $p$ -типа, а минус — к полупроводнику  $n$ -типа, электрический ток потечет только тогда, когда напряжение превысит потенциальный барьер. Высота потенциального барьера зависит от типа применяемого полупроводника. Если приложенное напряжение превышает потенциальный барьер, области с электронной и дырочной проводимостями сближаются, обедненный слой исчезает, электроны перетекают в  $p$ -область, а дырки — в  $n$ -область и, перемещаясь от атома к атому, создают электрический ток в цепи. При прямом включении на диоде существует постоянное падение напряжения, называемое прямым напряжением диода (0,3 В для германия и 0,6 В для кремния), после которого ток при увеличении напряжения начинает нарастать.

При обратном включении напряжения ток через  $p$ — $n$ -переход не проходит, т. е.  $p$ — $n$ -переход приобретает вентиляльные характеристики диода на основе электронной лампы (в одном направлении поток электронов проходит и ток протекает, в другом — потока электронов нет и ток не протекает).

Рассмотрим детально ВАХ сплавного диода в случае прямого и обратного включений напряжения, показанную на рис. 1.4, б.

Когда напряжение прямого включения  $U$  превысит потенциальный барьер диода, через него начинает протекать большой ток. При этом очень малое увеличение напряжения приводит к сильному увеличению тока, протекающего через диод (кривая 1). Характеристика диода при обратном включении напряжения имеет вид кривой 1, показанной в левом нижнем секторе рис. 1.4, б. При таком включении напряжения через диод протекает очень малый ток (ток утечки, составляет микроамперы), определяемый наличием малого количества неосновных носителей. Значение этого обратного тока практически постоянно вплоть до достижения напряжения пробоя  $p$ — $n$ -перехода ( $U_{\text{проб}}$ ), при котором обратный ток резко возрастает, что приводит к разрушению диода. Следовательно, при включении диода в схему следует убедиться, что обратное напряжение на нем не превысит напряжение пробоя, указанное изготовителем.

Германиевые диоды имеют более низкое сопротивление при обратном включении, чем кремниевые и, следовательно, больший ток утечки. У них также ниже напряжение пробоя.

Для наиболее распространенных полупроводников из кремния и германия (четырёхвалентных химических элементов) донорами являются фосфор, мышьяк, сурьма (пятивалентные вещества), а акцепторами — трехвалентные бор, алюминий, индий. Наиболее распространенные кремниевые диоды состоят из следующих слоев: кремния, легированного фосфором ( $n$ -область), который создает избыток электронов в зоне проводимости, т. е. электронную проводимость, и кремния, легированного бором ( $p$ -область), в котором имеется избыток атомов с недостатком электронов, т. е. преимущественно дырочная проводимость. При этом в контактной области образуется  $p$ — $n$ -переход (см. рис. 1.4, а), создающий одностороннюю проводимость и обеспечивающий характерную ВАХ диода, проводящего ток в одном направлении (в другом направлении ток близок к нулю).

При увеличении температуры прямой ток через диод увеличивается при том же приложенном напряжении. Диоды из полупроводниковых материалов с большей шириной запрещенной зоны

имеют более высокий потенциальный барьер для носителей зарядов, следовательно, и прямой ток у них будет меньше при прямом одинаковом напряжении. В зависимости от конструкции, состава полупроводников и технологии изготовления диоды имеют разные ВАХ при подаче прямого и обратного напряжений (см. кривые 1...3 на рис. 1.4, б).

При обратном включении диода, начиная с малых значений обратного напряжения, обратный ток достигает насыщения и практически не изменяется до лавинного пробоя (кривая 1).

**Лавинный пробой** — резкое увеличение тока через диод при обратном напряжении до критического значения  $U_{\text{проб}}$  — связан с образованием лавины носителей зарядов под действием сильного электрического поля, которое приводит к ускорению носителей до энергий, достаточных для обеспечения ударной ионизации с образованием новых электронно-дырочных пар. Напряжение, при котором происходит лавинный пробой, называется пробивным напряжением диода. Если подачу напряжения при пробое быстро прекратить, то диод восстановит свои функции. Однако обычно при пробое диод быстро разрушается, так как в канале пробоя резко увеличивается температура.

Туннельный и тепловой пробой характеризуют соответственно кривые 2 и 3.

**Туннельный пробой** возможен только в туннельных диодах, для которых характерны большая концентрация примесей, малая ширина  $p$ — $n$ -перехода и сравнительно малая ширина запрещенной зоны. При обратном включении диода на малой ширине перехода возникает большое напряжение, под действием которого электроны начинают проскакивать (туннелировать) через него. С увеличением температуры пробивное напряжение туннельного пробоя снижается. При большой ширине  $p$ — $n$ -перехода туннельный пробой приобретает лавинный характер.

**Тепловой пробой** обусловлен выделением теплоты, вызванной прямым или обратным током. Обычно при возникновении тока через некоторое время диод нагревается, но избыток теплоты рассеивается радиатором и устанавливается тепловое равновесие. Однако у некоторых диодов с большим обратным током (например, германиевых) при высокой температуре окружающей среды возникает тепловой пробой, и ток резко увеличивается. Кривая 3 имеет участок (в нижнем секторе рис. 1.4, б), определяющий отрицательное дифференциальное сопротивление. При длительном существовании теплового пробоя температура  $p$ — $n$ -перехода может повыситься до температуры плавления и диод разрушится.

На рис. 1.4, в приведены условные графические обозначения диодов различного типа.

В структуре типичного германиевого выпрямительного диода (аналогичной структуре, показанной на рис. 1.4, а) в пластинку  $n$ -германия вплавлена навеска  $p$ -германия. При этом в области их контакта формируется  $p$ — $n$ -переход с односторонней проводимостью.

Кроме того, существуют сплавные металлические контакты, не имеющие односторонней проводимости, например, в случае если в пластинку  $n$ -германия вплавлен индий, а в пластинку  $p$ -германия — алюминий, к которым приварены луженые медные выводы. Такие контактные выводы необходимы для соединения полупроводниковых приборов с другими устройствами методом пайки.

Обычно полупроводниковые диоды имеют несимметричные электронно-дырочные переходы, поэтому при прямом их включении количество неосновных носителей, перетекающих из сильно легированной области, превосходит количество носителей в противоположном направлении. Область, в которую инжектируются неосновные для нее носители (база диода), слабо легирована.

В зависимости от соотношения толщины базы, ее площади и площади  $p$ — $n$ -перехода диоды разделяют на плоскостные и точечные.

**Точечные диоды** имеют малую площадь, малую емкость ( $C_{p-n}$ )  $p$ — $n$ -перехода и высокое быстродействие. В связи с малыми размерами  $p$ — $n$ -перехода они имеют малую допустимую рассеиваемую мощность, а также малые прямое и обратное напряжения. Точечные диоды используются в высокочастотных каскадах приемных устройств и слаботочных импульсных устройствах с очень короткими импульсами или высокой частотой их следования. Их применяют в основном для детектирования высокочастотных сигналов или в качестве смесителей радиосигнала с сигналом гетеродина для выделения промежуточной частоты.

**Плоскостные сплавные диоды** имеют большую площадь  $p$ — $n$ -перехода и могут пропускать большие токи. Они используются в качестве выпрямителей в блоках питания (см. гл. 2) и сильноточных импульсных цепях. Недостатками диодов являются большая емкость  $p$ — $n$ -перехода, малое быстродействие и большой обратный ток ( $I_{обр}$ ).

**Плоскостные диффузные диоды**, сочетающие в себе достоинства плоскостных и точечных диодов, формируются путем плотного соединения кристаллов с  $p$ - и  $n$ -проводимостью в вакуумной высокотемпературной диффузной печи. Созданный таким образом

кристалл режут на отдельные кристаллы нужного размера, на которые с двух сторон наносят металлические покрытия и припаивают к ним контактные электроды. Диффузные диоды с малой площадью  $p-n$ -перехода имеют довольно высокое быстродействие, зависящее от площади поверхности используемого  $p-n$ -перехода, и применяются в качестве детекторов звуковых и видеосигналов. Диффузные диоды с большой площадью  $p-n$ -перехода используются в качестве выпрямителей в блоках питания.

Выпускаемые промышленностью германиевые плоскостные диоды классифицируются по допустимому прямому току: малой мощности — до 0,3 А; средней мощности — до 10 А; большой мощности — свыше 10 А. Эти диоды могут использоваться для выпрямления тока с частотой не более 50 кГц. Их допустимое обратное напряжение не превышает 400 В. Рабочий температурный диапазон от  $-60$  до  $+85$  °С.

Верхний предел диапазона рабочих температур диодов связан с резким увеличением обратного тока и наступлением теплового пробоя. Нижний предел обусловлен различием коэффициентов температурного расширения германия и индия, которым припаиваются контактные выводы.

Кремниевые плоскостные диоды подразделяются по допустимым токам (от 0,5 до 1 600 А) и допустимому обратному напряжению до 1 600 В. Верхний предел рабочих температур у кремниевых плоскостных диодов 125 °С. Для улучшения частотных характеристик этих диодов используется диффузия в кремний золота, создающего рекомбинационные ловушки и уменьшающего время жизни неосновных носителей. Такие кремниевые диоды называют частотными, так как они способны выпрямлять токи с частотой до 100 кГц. Срок службы кремниевых диодов превышает 100 тыс. ч.

Для увеличения допустимого обратного напряжения кремниевые диоды соединяют последовательно в выпрямительные столбы с допустимым обратным напряжением до 10 кВ. Выпускаются также выпрямительные блоки, соединенные по мостовой схеме или схеме с удвоением напряжения (см. гл. 4).

**Селеновые выпрямители с использованием диодных сборок** основаны на выпрямляющем переходе полупроводников с разными составами: селена с акцепторной примесью хлора и селенида кадмия. Особенностью селеновых выпрямителей является то, что прохождение электрического тока вызывает локальный прогрев и более интенсивное соединение кадмия с селеном, что способствует созданию равномерного по толщине гетероперехода. Другой особенностью этих выпрямителей является самозалечивание мест

пробоя, так как в месте пробоя кристаллический селен переходит в аморфный с более высоким сопротивлением. В селеновых выпрямителях допустимая плотность тока составляет  $0,1 \text{ А/см}^2$ , допустимое обратное напряжение — 60 В, допустимая предельная температура —  $75^\circ\text{С}$ . Срок их службы — 10 000 ч.

Переходные процессы, характеризующие быстродействие диодов, определяются не только их емкостью, но и физическими процессами, происходящими в полупроводниковой структуре. В частности, большую роль играют процессы накопления и рассасывания неосновных носителей в базе диода, а также разряд и заряд барьерной емкости. Поскольку электрическое поле в базе диода невелико, то движение носителей в ней подчиняется законам диффузии, а их накопление и рассасывание зависят также от количества ловушек и задержки рекомбинации, связанной с этим.

При малых плотностях тока переходные процессы в диодах определяются зарядом и разрядом их барьерной емкости. При сравнительно больших плотностях тока существенным является накопление неосновных носителей зарядов в базе диода. На частотные характеристики и длительность переходных процессов влияет также внутреннее сопротивление диода.

Эквивалентная схема для расчета частотных характеристик диодов показана на рис. 1.4, г.

Сопротивление  $p$ — $n$ -перехода, определяемое с помощью ВАХ, составит  $R = U_A/I_A$ .

Длительности переходных процессов в диодах при подаче и снятии напряжения пропорциональны произведению  $RC$ .

Характеристики и рабочие частоты приводятся в паспортных данных диодов и специальной справочной литературе.

Переходные процессы и частотные характеристики диода в электрической цепи зависят также от сопротивления внешней цепи (нагрузки), в которую он включен. При увеличении сопротивления нагрузки длительность переходных процессов в диодах увеличивается.

На рис. 1.4, г приведена структура диода Шоттки, работающего на основе выпрямляющего перехода металл—полупроводник. При этом металл играет роль материала с  $n$ -проводимостью, а полупроводник имеет  $n$ - или  $p$ -проводимость. На границе их раздела формируется выпрямляющий переход (ВП). Как и в обычном полупроводниковом диоде, кроме выпрямляющего перехода, в диоде Шоттки имеются невыпрямляющие контактные переходы в местах соединения  $p$ - или  $n$ -областей полупроводника с металлическими выводами. Эти диоды имеют высокое быстродействие за счет использо-

вания быстрых носителей зарядов (электронов), короткой стадии накопления и рассасывания неосновных носителей зарядов.

**Области применения полупроводниковых диодов.** В зависимости от типа используемых полупроводников и степени их легирования можно создать диоды, обладающие характерными особенностями и имеющие определенное функциональное назначение.

Рассмотрим особенности различных типов диодов, их параметры и области применения.

**Выпрямительные диоды**, предназначенные для выпрямления низкочастотного переменного тока, используются в устройствах питания. Существуют кремниевые, германиевые и селеновые плоскостные диоды (сплавные и диффузные). Условия применения выпрямительных диодов определяют предельные значения их параметров:

- максимальный средний прямой ток  $I_{\text{пр max}}$ ;
- максимальный импульсный прямой ток  $I_{\text{и.пр max}}$ ;
- максимальное обратное напряжение  $U_{\text{обр max}}$ ;
- среднее за период значение обратного тока  $I_{\text{обр}}$  при заданном обратном напряжении  $U_{\text{обр}}$ .

Мощные выпрямительные диоды пропускают прямой ток значением до 1 500 А, а высоковольтные кремниевые диоды выдерживают обратное напряжение до 1 600 В. Для отвода теплоты мощные диоды монтируются на металлических радиаторах с большой поверхностью и высокой теплопроводностью.

**Высокочастотные диоды** (детекторные, смесительные и модуляторные) применяют для детектирования маломощных ВЧ-сигналов. В этом случае существенное значение имеет собственная емкость диода, для уменьшения которой используется контактная технология, позволяющая формировать небольшую базовую область  $p$ — $n$ -перехода в месте контакта острия вольфрамовой иглы с полупроводником. Эта технология заключается в следующем: мощный импульс тока разогревает место контакта, возникает диффузия вольфрама в полупроводник и после его охлаждения образуется небольшая область перехода. Емкость такого диода, составляющая десятые доли пикофарад (пФ), обеспечивает диапазон рабочих частот 300 ... 600 МГц. Точечные диоды на более высокие частоты изготавливают с использованием прижимного контакта металл—полупроводник без разогревания. Такие диоды могут работать при частотах до 20 ГГц.

Основными характеристиками ВЧ-диодов являются предельная частота, дифференциальное прямое сопротивление переменному

току  $R_A = \Delta U_{\text{пр}} / \Delta I_{\text{пр}}$  (где  $\Delta U_{\text{пр}}$  и  $\Delta I_{\text{пр}}$  — изменения прямых напряжения и тока) и емкость диода  $C_A$ . Остальные их параметры аналогичны параметрам низкочастотных выпрямительных диодов.

**Импульсные диоды** (мезодиоды, диоды с накоплением зарядов, диоды Шоттки) работают в режиме электронного ключа в импульсных схемах, т. е. у них имеются два состояния: открыто—закрыто. При этом в открытом состоянии диод должен иметь малое сопротивление, а в закрытом — большое. Быстродействие импульсных схем определяется временем перехода диода из одного состояния в другое. Условия применения импульсных диодов определяют предельные значения их параметров:

- максимальный выпрямленный ток  $I_{\text{пр max}i}$ ;
- максимальный импульсный прямой ток  $I_{\text{и.пр max}i}$ ;
- максимальное обратное напряжение  $U_{\text{обр max}i}$ ;
- максимальный обратный ток  $I_{\text{обр max}i}$ ;
- прямое импульсное напряжение на диоде при заданном импульсе прямого тока;
- емкость  $C_A$ ;
- время включения  $\tau_{\text{вкл}i}$ ;
- время восстановления обратного сопротивления  $\tau_{\text{вос}}$ .

В мезодиодах  $p$ — $n$ -переход формируется путем травления полупроводника.

В диодах с накоплением зарядов  $p$ — $n$ -переход формируется методом диффузии, благодаря чему в приповерхностном слое создается большой градиент концентрации примеси. В результате возникает электрическое поле, направленное в сторону возрастания концентрации примеси, обеспечивающее накопление зарядов вблизи границы  $p$ - и  $n$ -областей, что ускоряет переходные процессы.

Диоды с накоплением зарядов способны накапливать и удерживать заряды в потенциальных ямах. Диоды используются как элементы задержки включения тока за счет рассасывания зарядов, а также как элементы памяти. С помощью этих диодов формируют задержку импульсов в слаботочных приборах. На основе диодов с накоплением зарядов созданы приборы с зарядовой связью: ПЗС-линейки и ПЗС-матрицы. Последние используются как быстродействующие запоминающие устройства.

Диоды Шоттки работают на основе перехода металл— $n$ -полупроводник. При этом металл имеет работу выхода больше, чем полупроводник с  $n$ -проводимостью. На границе раздела формируется контактный выпрямляющий переход.

Прямой ток возникает за счет основных носителей зарядов металла (электронов). В отличие от обычных диодов накопления зарядов в переходе диода Шоттки не происходит, т. е. эти диоды имеют малую емкость  $p-n$ -перехода ( $C_{p-n} < 1$  пФ) и у них нет стадии рассасывания зарядов. Благодаря этому диоды Шоттки обладают высоким быстродействием и могут работать на частотах до 10 ГГц. Вместе с тем они характеризуются малыми токами и малым обратным напряжением пробоя.

Диоды Шоттки широко применяют в транзисторных ключевых схемах. Транзисторный ключ в сочетании с диодом Шоттки имеет повышенное быстродействие и называется транзистором Шоттки. Это сочетание часто применяют в логических микросхемах.

**Стабилитрон** — полупроводниковый плоскостной диод из сильнолегированного кремния. ВАХ стабилитрона имеет вид кривой 1 (см. рис. 1.4, б). На участке электрического пробоя дифференциальное сопротивление  $R_{\Delta} = dU/dI$  очень мало. Резкий рост обратного тока наблюдается вблизи значения обратного напряжения, равного  $U_{\text{проб}}$ . Поскольку вблизи  $U_{\text{проб}}$  малое изменение обратного напряжения соответствует большому изменению обратного тока, напряжение пробоя называют напряжением стабилизации  $U_{\text{ст}}$ .

Основные параметры стабилитронов:

- напряжение стабилизации  $U_{\text{ст}}$ ;
- дифференциальное сопротивление  $R_{\Delta}$  при напряжении  $U_{\text{ст}}$ ;
- температурный коэффициент напряжения стабилизации

$$\alpha = (\Delta U_{\text{ст}}/U_{\text{ст}})/\Delta T,$$

где  $\Delta U_{\text{ст}}$  — изменение напряжения стабилизации при изменении температуры  $\Delta T$ ;

- минимально допустимый ток стабилизации  $I_{\text{min}}$ , при котором  $U_{\text{ст}}$  находится в заданных пределах;
- максимально допустимый ток стабилизации  $I_{\text{max}}$ ;
- максимально допустимая рассеиваемая мощность  $P_{\text{р max}}$ .

Стабилитроны применяют в устройствах питания для стабилизации напряжения (см. гл. 4). В зависимости от структуры, состава и конструкции стабилитроны имеют разные значения напряжения стабилизации. Имея разные номиналы, они обеспечивают диапазон стабилизации напряжения в блоках питания от 3 до 200 В. Стабилизация осуществляется при обратном напряжении на стабилитроне. Она идет тем лучше, чем круче кривая зависимости тока от

напряжения и соответственно, чем меньше дифференциальное сопротивление.

**Варикап** — полупроводниковый диод, действие которого основано на использовании зависимости емкости протяженного и слаболегированного  $p$ — $n$ -перехода от обратного напряжения. Емкость варикапа уменьшается с увеличением обратного напряжения примерно от 500 до 50 пФ. Варикапы — это диоды с низколегированной областью между  $n$ - и  $p$ -областями. При обратном включении такого диода его емкость изменяется пропорционально напряжению. Варикапы используются в колебательных контурах с управляемой резонансной частотой в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн СВЧ (от 300 МГц до 30 ГГц). Наиболее часто варикап используется для формирования радиосигналов с линейной частотной модуляцией.

**Туннельные диоды** — диоды с высокой концентрацией легирующих примесей и узкими  $p$ — $n$ -переходом и запрещенной зоной. В  $p$ — $n$ -переходе такого диода при прямом включении возникают высокие напряжения, и электроны туннелируют в  $p$ -область. Туннельный эффект состоит в способности заряженной частицы проникнуть за потенциальный барьер даже в том случае, если ее энергия ниже потенциального барьера.

В сильных электрических полях вблизи границы раздела  $p$ - и  $n$ -областей туннельных диодов может образоваться тонкий потенциальный барьер, через который с определенной вероятностью электроны проходят без изменения собственной энергии благодаря туннельному эффекту. Формируемая в результате  $N$ -образная ВАХ с ниспадающим участком и отрицательной дифференциальной проводимостью позволяет использовать туннельные диоды в качестве генераторов СВЧ-колебаний на частотах от 10 до 100 ГГц.

**Светодиод** излучает свет при прохождении прямого инжекционного тока. Этот ток называется инжекционным, так как при нем происходит впрыскивание электронов из  $n$ -области в  $p$ — $n$ -переход. Излучение света связано с рекомбинацией носителей зарядов (электронов и дырок), а также с возбуждением валентных электронов атомов  $p$ -области электронами, проникающими через  $p$ — $n$ -переход. Основными характеристиками светодиодов являются предельные ток и напряжение питания, крутизна ВАХ и квантовый выход (отношение потребляемой мощности к мощности излучения).

**Фотодиоды** создаются на основе использования эффекта возбуждения электронов полупроводника квантами света. Если  $p$ — $n$ -

переход осветить светом, то в нем возникают носители зарядов (электроны и дырки), создающие прямую и обратную проводимости. Наиболее чувствительными являются фотодиоды, основанные на изменении собственной проводимости полупроводниковых структур, и лавинные фотодиоды. В средней части  $p-i-n$ -структуры фотодиода находится полупроводник без примесей, обладающий слабой собственной проводимостью. Однако его проводимость резко возрастает под действием света, и при подаче прямого или обратного напряжения на фотодиод возникает ток, пропорциональный интенсивности поданного света. В лавинных фотодиодах используются более сложные полупроводниковые структуры и более высокие напряжения (около 100 В). Возникающие под действием света возбужденные электроны ускоряются электрическим полем и, соударяясь с атомами полупроводника, вызывают лавинный поток вторичных электронов.

Основными характеристиками фотодиодов являются пороговая чувствительность (минимальная мощность излучения, регистрируемая фотоприемником), чувствительность (отношение изменения тока или напряжения на выходе фотоприемника к мощности на входе) и время срабатывания или предельная частота воспроизведения входного сигнала.

Полупроводниковые диоды широко используются в электронной технике. Их применяют как смесители частот сигнала и гетеродина в супергетеродинных схемах, для детектирования радиосигналов, выпрямления переменного напряжения (выпрямители), селекции импульсов определенной полярности (импульсные диоды), стабилизации напряжения (стабилитроны), в качестве управляемой напряжением емкости (варикапы) и т. п.

**Туннельные диоды** с  $N$ -образной с  $S$ -образной ВАХ используются для генерации СВЧ-колебаний.

Существуют и специализированные диоды — диоды Гана и обращенные диоды, используемые в СВЧ-генераторах и усилителях. Используют и такие специализированные полупроводниковые устройства — варисторы и термисторы. В термисторах, в отличие от резисторов, сопротивление при нагреве падает. Поэтому их используют в качестве компенсаторов температурного изменения в резисторах.

В импульсной технике широкое распространение получили диодные электронные ключи, работающие по принципу включено — выключено (ток есть — тока нет). Применяются последовательные и параллельные схемы диодных ключей. В схемах последовательных диодных ключей диод пропускает ток только в одном направлении

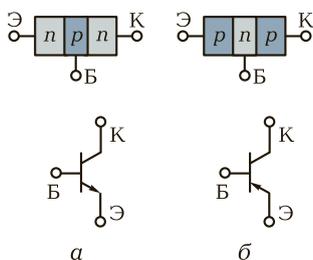
(от плюса к минусу), как в выпрямителях (см. гл. 4). При параллельном соединении используются стабилитроны.

## 1.6. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

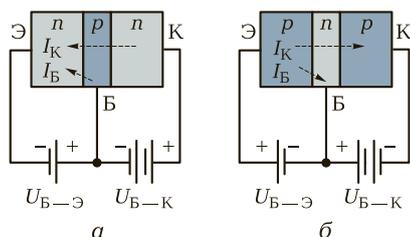
**Транзисторы** — это полупроводниковые приборы с тремя электродами, подобные электровакуумному триоду, предназначенные для усиления тока или напряжения. Различают биполярные транзисторы, обычно называемые просто транзисторами, полевые транзисторы и фототранзисторы.

**Биполярный транзистор** — это прибор, составленный из полупроводников с двумя  $p$ — $n$ -переходами и имеющий три вывода: эмиттер Э, базу Б и коллектор К. Существуют два типа биполярных транзисторов:  $n$ — $p$ — $n$ -транзисторы (рис. 1.5, а) и  $p$ — $n$ — $p$ -транзисторы (рис. 1.5, б). Принципы их работы аналогичны, различаются они количеством и порядком расположения полупроводников с  $p$ - и  $n$ -проводимостями, а также полярностью подаваемого постоянного напряжения смещения.

Рассмотрим работу транзистора  $n$ — $p$ — $n$ -типа (рис. 1.6, а) при подаче напряжения смещения на базу. Переход база—эмиттер (или просто эмиттерный переход) такого транзистора смещен в прямом направлении напряжением  $U_{Б-Э}$ , поэтому электроны из области эмиттера перетекают через этот переход в область базы, создавая ток  $I_B$ . Это обычный прямой ток  $p$ — $n$ -перехода, смещенного в прямом направлении. Как только электроны попадают в область базы, они начинают испытывать притяжение положительного потенциала коллектора. Если область базы сделать очень узкой, то почти все



**Рис. 1.5.** Структуры и УГО биполярных транзисторов типов  $n$ — $p$ — $n$  (а) и  $p$ — $n$ — $p$  (б)



**Рис. 1.6.** Схемы протекания тока в транзисторах типов  $n$ — $p$ — $n$  (а) и  $p$ — $n$ — $p$  (б) при подаче напряжения смещения на базу

эти электроны пройдут через нее к коллектору, и только очень малая их часть соберется базой, формируя базовый ток  $I_B$ . Фактически более 95 % всех электронов эмиттерного тока  $I_E$  собирается коллектором, формируя коллекторный ток  $I_K$  транзистора. Таким образом,  $I_E = I_B + I_K$ .

Так как базовый ток  $I_B$  очень мал (чаще всего он измеряется микроамперами), то им обычно пренебрегают. Тем самым предполагают, что токи эмиттера и коллектора равны, и каждый из них называют током транзистора.

Отметим, что переход база—коллектор (или просто коллекторный переход) смещен в обратном направлении напряжением  $U_{B-K}$ . Это необходимое условие работы транзистора, поскольку в противном случае электроны не притягивались бы к коллектору. При этом в соответствии с правилом выбора направления тока (от положительного потенциала к отрицательному) считается, что ток транзистора течет от коллектора к эмиттеру.

В  $p-n-p$ -транзисторах полярность подаваемого напряжения смещения должна быть обратной (рис. 1.6, б). В этом случае ток транзистора будет представлять собой перемещение дырок от эмиттера к коллектору или электронов от коллектора к эмиттеру.

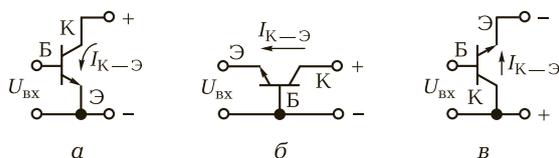
**Схемы включения транзисторов.** Существуют три основные схемы включения транзисторов в электронные цепи.

1. Схема с общим эмиттером (ОЭ). Общим выводом в ней является эмиттер: входной сигнал подается между базой и эмиттером, а выходной сигнал снимается между коллектором и эмиттером (рис. 1.7, а). Эта схема получила наиболее широкое распространение вследствие своей надежности и высокого коэффициента усиления по току.

2. Схема с общей базой (ОБ). Базовый вывод транзистора в ней является общим выводом для входного и выходного сигналов (рис. 1.7, б). Входной сигнал подают на эмиттер, а выходной — снимают с коллектора.

3. Схема с общим коллектором (ОК). В этой схеме общим выводом для входного и выходного сигналов является коллектор. Входной сигнал подают и на базу. Такую схему называют также эмиттерным повторителем (рис. 1.7, в), так как в ней сигнал на выходе повторяет входной сигнал по напряжению.

Следует заметить, что на внутреннем уровне транзистор работает во всех схемах включения совершенно одинаково, тогда как его поведение в цепях в каждом случае различно и определяется внешними элементами. Каждая схема включения транзистора характеризуется своим собственным набором следующих основных



**Рис. 1.7.** Схемы включения транзисторов в усилительных каскадах: а — с общим эмиттером; б — с общей базой; в — с общим коллектором

параметров: коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления и АЧХ.

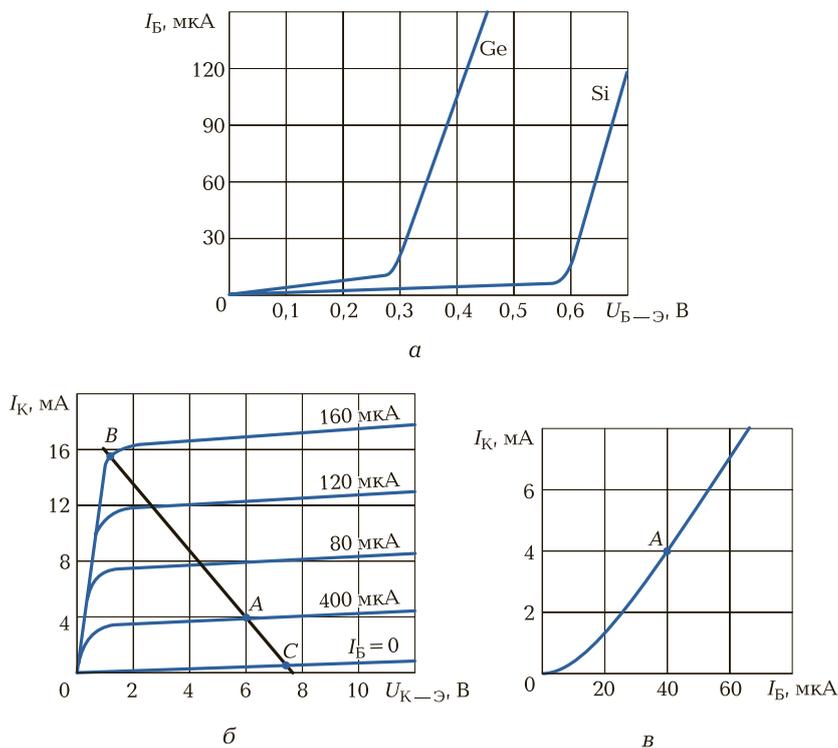
**Характеристики транзисторов в схеме с общим эмиттером.** Поведение транзистора в статических условиях, т. е. в отсутствие входного сигнала, определяют:

- входные характеристики, или зависимости входного тока  $I_B$  от входного напряжения  $U_{B-Э}$ ;
- выходные характеристики, или зависимости выходного тока  $I_K$  от выходного напряжения  $U_{K-Э}$ ;
- передаточные характеристики, или зависимости выходного тока  $I_K$  от входного тока  $I_B$  или входного напряжения  $U_{B-Э}$ .

Рассмотрим характеристики, относящиеся к  $n-p-n$ -транзисторам. Для  $p-n-p$ -транзисторов нужно изменить полярность напряжения постоянного тока. В общем случае для описания  $n-p-n$ -транзистора используют три характеристики: входную, выходную и проходную.

Входные характеристики  $n-p-n$ -транзисторов на основе кремния и германия представлены на рис. 1.8, а. Они ничем не отличаются от вольт-амперных характеристик  $p-n$ -перехода диодов, смещенных в прямом направлении, поскольку в этом случае вход (переход база—эмиттер) как раз и является таким переходом. Заметим, что, как и в диоде, входной ток  $I_B$  начинает протекать через эмиттерный переход только тогда, когда на этом переходе устанавливается требуемое значение прямого напряжения (0,3 В для германия и 0,6 В для кремния). Если это напряжение установлено, то в дальнейшем слабое изменение напряжения между базой и эмиттером  $U_{B-Э}$  приводит к сильному увеличению тока базы.

Таким образом, транзистор можно рассматривать как элемент, управляемый током, а не напряжением. При малых напряжениях  $U_{B-Э}$  и токах базы  $I_B$  используют понятие дифференциального входного сопротивления  $R_{B-Э} = dU_{B-Э}/dI_{B-Э}$ , которое можно определить по наклону входной характеристики. Входное сопротивление



**Рис. 1.8.** Входная (а), выходные (б) и передаточная (в) характеристики транзистора

транзистора важно учитывать при расчете переходных процессов и в качестве нагрузки предшествующего источника напряжения или усилительного каскада.

Выходные характеристики транзистора, которые устанавливают связь тока коллектора (выходного тока)  $I_K$  с напряжением на коллекторе (выходным напряжением)  $U_{K-\text{Э}}$  для определенных значений тока базы (входного тока)  $I_B$  показаны на рис. 1.8, б. Эти кривые устанавливают также взаимосвязь входного тока  $I_B$  и с выходным током  $I_K$  и выходным напряжением  $U_{K-\text{Э}}$ . Например, для транзистора с выходными характеристиками (см. рис. 1.8, б) при  $I_B = 40 \mu\text{A}$  и  $U_{K-\text{Э}} = 6$  В ток коллектора  $I_K = 4$  mA (точка А). Напряжение  $U_{K-\text{Э}}$  легко определяется по выходной характеристике, соответствующей выбранным токам базы и коллектора. Точка С соответствует состоянию полностью закрытого транзистора, а точка В — полностью открытого.

Передаточные характеристики транзистора (их еще называют проходными) устанавливают взаимосвязь между входным и выходным токами транзистора. На рис. 1.8, в показан график зависимости тока коллектора  $I_K$  транзистора от тока базы  $I_B$ . С помощью этой характеристики можно рассчитать статический коэффициент усиления тока. Например, если точка  $A$  — рабочая точка транзистора, то по графику определяем  $I_B = 40$  мкА и  $I_K = 4$  мА, следовательно,  $\beta = 4 \cdot 1000/40 = 100$ , т. е. получаем тот же результат, что и в предыдущем случае.

Очень важным параметром любого транзистора является его коэффициент усиления по постоянному току — статический коэффициент усиления тока. Этот коэффициент характерен для транзистора, находящегося в статическом режиме, т. е. в отсутствие входного сигнала.

Статический коэффициент усиления тока является безразмерной величиной, так как определяется отношением выходного тока к входному току базы:

$$\beta = I_K/I_B. \quad (1.1)$$

Коэффициент  $\beta$  можно рассчитать с помощью выходных характеристик транзистора. Например, если транзистор работает в режиме, определяемом рабочей точкой  $A$  (при  $I_B = 40$  мкА и  $I_K = 4$  мА), то  $\beta = 4 \cdot 1000/40 = 100$ , т. е. коэффициент усиления по току равен 100.

Если в цепи коллектора установлен резистор, то изменение тока в транзисторе будет приводить к падению напряжения на этом резисторе, которое будет пропорционально силе тока, протекающего через него. В то же время управляющий ток базы транзистора пропорционален подаваемому на базу напряжению. Следовательно, при правильно подобранном коллекторном резисторе коэффициент усиления по напряжению будет близок коэффициенту усиления по току.

Кривая при  $I_B = 0$  соответствует транзистору в непроводящем состоянии, т. е. в состоянии отсечки, когда значение напряжения  $U_{K-Э}$  меньше требуемого значения прямого напряжения на эмиттерном переходе. Теоретически ток транзистора равен нулю при  $I_B = 0$ , однако реально очень слабый ток утечки всегда протекает через коллекторный переход.

В более общем случае на нелинейных участках характеристики определяют дифференциальный коэффициент усиления тока  $\beta_{\text{диф}} = dI_K/dI_B$  при данном  $U_K$  (здесь и далее  $d$  означает дифференциал или приращение).

Вместо зависимости тока коллектора  $I_K$  транзистора от тока базы  $I_B$  можно построить зависимость  $I_K$  от напряжения на базе  $U_{B-Э}$ , которая будет очень похожа на кривую, показанную на рис. 1.8, в. Наклон такой кривой на линейном участке характеризует крутизну выходной характеристики:

$$S = dI_K/dU_{B-Э}. \quad (1.2)$$

Учитывая, что напряжение на базе связано с током базы через дифференциальное входное сопротивление, т. е.  $dU_{B-Э} = R_{B-Э}dI_{B-Э}$ , получим:

$$S = dI_K/(R_{B-Э}dI_{B-Э}) = (dI_K/dI_{B-Э})/R_{B-Э} = \beta/R_{B-Э},$$

или

$$\beta = SR_{B-Э}. \quad (1.3)$$

Согласно формуле (1.3), последние три параметра взаимосвязаны и, зная два из них, можно определить третий. Эти параметры называют малосигнальными, т. е. характеризующими работу транзистора при малых токах и напряжениях. При больших токах и напряжениях в транзисторе приведенные зависимости искажаются и приобретают нелинейный характер. Кроме того, в  $p-n$ -переходах транзистора, как и в диодах, при подаче больших обратных напряжений могут происходить пробой лавинного, теплового и туннельного типов.

В общем случае изменение входных и выходных токов транзистора в зависимости от изменения входных и выходных напряжений можно записать в виде

$$\begin{aligned} dI_B &= y_{11}dU_{B-Э} + y_{12}dU_{K-Э}; \\ dI_K &= y_{21}dU_{B-Э} + y_{22}dU_{K-Э}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где  $y_{11} = 1/R_{B-Э}$  — входная проводимость транзистора;  $y_{12} = S_B$  — крутизна характеристики обратной передачи тока на базу (малая величина);  $y_{21} = S$  — крутизна проходной характеристики;  $y_{22} = 1/R_{K-Э}$  — выходная проводимость транзистора.

Если в качестве рабочих (управляющих) величин взять входной ток  $I_B$  и коллекторное напряжение  $U_{K-Э}$ , то изменения напряжения базы и тока коллектора можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} dU_{B-Э} &= h_{11}dI_B + h_{12}dU_{K-Э}; \\ dI_K &= h_{21}dI_B + h_{22}dU_{K-Э}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где  $h_{11} = R_{B-Э}$  — входное сопротивление;  $h_{12} = A_B$  — коэффициент обратной передачи (малая величина);  $h_{21} = \beta$  — коэффициент усиления по току;  $h_{22} = 1/R_{K-Э}$  — выходная проводимость.

Так же, как и диоды, транзисторы различают по применению, исполнению и конструкции. Высокочастотные транзисторы, предназначенные для работы в цепях высокочастотных усилителей, генераторов и смесителей, имеют малые размеры, характеризуются малыми емкостями переходов, низким уровнем шумов. Для входных каскадов усилителей разработаны транзисторы с высоким коэффициентом усиления по току (до 100) и низким уровнем шума.

Для мощных усилительных каскадов разработаны транзисторы, пропускающие токи до 10 А. Еще более мощные транзисторы разработаны для управления силовыми установками и электродвигателями.

В ключевых и усилительных каскадах применяют также составные транзисторы, выполненные по схемам Дарлингтона (см. рис. 2.21, в) и каскадной (см. рис. 2.21, г) и работающие как один транзистор с более высоким коэффициентом усиления.

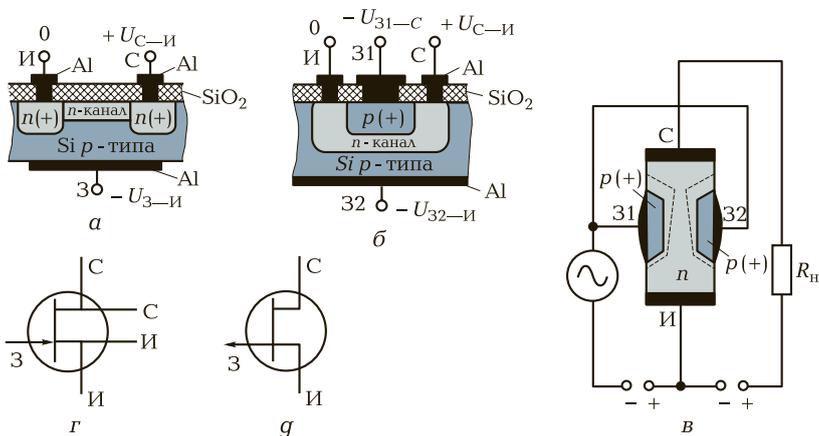
## 1.7. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

**Полевые транзисторы** — это полупроводниковые приборы для усиления тока или напряжения, в которых проходящий через них ток управляется электрическим полем.

Различают полевые транзисторы с управляющим  $p-n$ -переходом и с диэлектрическим затвором.

**Полевые транзисторы с управляющим  $p-n$ -переходом.** На рис. 1.9, а, б приведены полупроводниковые структуры полевых транзисторов соответственно с одним и двумя управляющими  $p-n$ -переходами. Полевые транзисторы имеют три электрода: исток И, сток С и затвор З. Электрод, аналогичный катоду в лампе, называется истоком, роль анода выполняет сток. Ток основных носителей проходит в  $n$ -канале проводимости и управляется напряжением на затворе (рис. 1.9, в). Подавая напряжение на затвор, можно управлять шириной  $p-n$ -перехода, регулировать поперечное сечение канала и таким образом менять его проводимость. Ширина  $p-n$ -перехода меняется обратным смещением (подключением минуса к истоку и плюса к затвору). При этом увеличивается потенциальный барьер и расширяется область, обедненная носителями, за счет чего изменяются сопротивление и ток в проводящем канале.

УГО транзисторов с  $n$ - и  $p$ -каналами показаны на рис. 1.9, г, г, соответственно.



**Рис. 1.9.** Структуры полевых транзисторов с одним (а) и двумя (б) управляющими переходами; схема их включения (в) и УГО для транзисторов с каналами типов *n* (г) и *p* (д)

Полевые транзисторы управляются напряжением на затворе, имеют высокоомный вход (большое входное сопротивление  $R_{3-И}$ ), малые управляющие токи и большие коэффициенты усиления по напряжению. Выходные и передаточные статические характеристики полевых транзисторов похожи на характеристики биполярных транзисторов, но имеют некоторые особенности.

В частности, при подаче отрицательного напряжения на затвор ток в транзисторе уменьшается. Если напряжение между затвором и стоком равно нулю, то при повышении напряжения сток—исток ( $U_{C-И}$ ) ток в транзисторе нарастает и быстро достигает значений, соответствующих состоянию насыщения. Этот ток называется начальным током стока  $I_{нач\ C-И}$ . Напряжение, при котором ток стока достигает предельно низкого значения, называется напряжением отсечки транзистора ( $U_{отс\ 3-И}$ ). Усилительные свойства полевых транзисторов лучше всего характеризуются дифференциальной крутизной передаточной характеристики аналогичной (1.2):

$$S = dI_C/dU_{3-И},$$

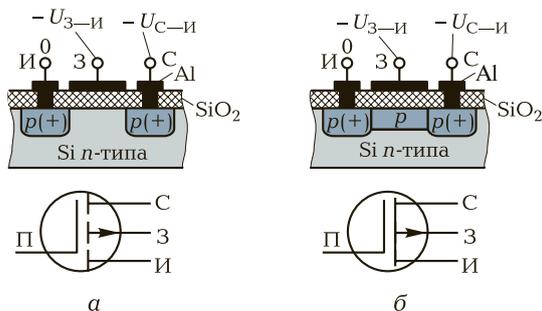
где  $I_C$  — ток стока;  $U_{3-И}$  — напряжение между затвором и истоком при заданном напряжении исток—сток.

При больших напряжениях на стоке происходит пробой *p*—*n*-перехода затвора, и чем больше напряжение на затворе, тем ниже напряжение пробоя.

Частотные характеристики полевых транзисторов определяются временем заряда и временем разряда барьерной емкости. На низких частотах входное сопротивление полевых транзисторов полностью определяется высоким входным статическим сопротивлением  $R_{з-и}$ . С ростом частоты входное сопротивление уменьшается, поэтому на больших частотах требуется более мощный входной сигнал. Кроме того, из-за обратной связи, обусловленной наличием проходной емкости, на высоких частотах падает коэффициент усиления.

**Полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП-транзисторы).** Полевые транзисторы, изготавливаемые по технологии металл—оксид—полупроводник (МОП) имеют металлический затвор, отделенный оксидом кремния (диэлектриком) от полупроводникового канала проводимости. Они называются МОП-транзисторами (рис. 1.10). Поскольку оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) — диэлектрик, их называют также МДП-транзисторами (металл—диэлектрик—полупроводник). Подложка П создается из полупроводника с  $p$ -проводимостью, а встроенный канал — из полупроводника с  $n$ -проводимостью. Канал проводимости полупроводника покрыт диэлектрическим слоем, на который нанесен металлический слой затвора. При подаче на затвор отрицательного потенциала напряжения электроны вытесняются из канала проводимости, повышая его сопротивление. При подаче на затвор положительного потенциала напряжения число электронов в канале проводимости увеличивается и сопротивление в нем падает, а ток возрастает.

Некоторые МДП-транзисторы имеют невстраиваемый канал проводимости (см. рис. 1.10, а). Проводимость в них возникает при подаче на затвор отрицательного напряжения. При этом в подлож-



**Рис. 1.10.** Структуры и УГО полевых МОП (МДП)-транзисторов с индуцируемым (а) и встроенным (б)  $p$ -каналом

ке под затвором возникает индуцируемый канал проводимости за счет увеличения ее собственных носителей зарядов (дырок). Сила тока в таком транзисторе управляется затвором только при отрицательном его потенциале. При положительном потенциале число носителей зарядов резко падает и транзистор запирается. Такие транзисторы хорошо работают как ключевые каскады.

Характеристики МДП-транзисторов примерно такие же, как и у полевых транзисторов, управляемых  $p-n$ -переходом. Быстродействие МДП-транзисторов определяется временем перезарядки емкости между затвором и каналом. При малом внешнем сопротивлении входной цепи рабочий диапазон их частот может достигать 10 ГГц, однако при этом сильно ослабевает выходной сигнал. Если использовать МДП-транзистор, управляемый напряжением при собственном высоком входном сопротивлении, то постоянная времени перезарядки емкости затвора резко возрастает и рабочий диапазон его частот снижается до нескольких мегагерц.

Ключевые каскады на полевых транзисторах упрощают схемы и повышают их надежность. Важно помнить, что полевые транзисторы обладают высоким входным сопротивлением и управляются напряжением, подаваемым на затвор, а не током, как в обычных биполярных транзисторах.

Преимущества полевых транзисторов над биполярными:

- высокое входное сопротивление;
- управление осуществляется только напряжением (без тока) без потери мощности в цепи управления;
- у МОП транзисторов малая емкость затвора, что позволяет создавать высокочастотные транзисторы с предельной частотой до 40 ГГц.

**Фототранзисторы.** Фототранзисторы имеют примерно такую структуру, как и МДП-транзисторы. Вместо управляющего электрода в них имеется окно для подачи света в канал проводимости, который выполнен из полупроводника с низкой собственной проводимостью. При подаче света в полупроводнике возникают электронно-дырочные пары, при этом между истоком и стоком появляется электрический ток (см. подразд. 1.9).

**Полупроводниковые приборы с зарядовой связью.** В полупроводниковых приборах с зарядовой связью (ПЗС) накапливаются неосновные носители зарядов под электродами МДП-структур и перемещаются затем от одного электрода к другому. Под действием электрического поля под затворами ПЗС в полупроводнике образуются потенциальные ямы, в которых накапливаются и могут

сохраняться носители зарядов. Если затворов несколько и они последовательно располагаются на линии, то подавая напряжение на соседний с потенциальной ямой затвор, можно переместить заряд в другую потенциальную яму. По своей структуре ПЗС подобны полевым МДП-транзисторам. Они имеют подложку, исток, сток и несколько затворов, расположенных последовательно.

Существующие различные типы ПЗС используются в следующих направлениях:

- оперативные запоминающие устройства электронных вычислительных машин (ЭВМ);
- устройства запоминания и преобразования изображений в электрические сигналы;
- устройства обработки аналоговой информации.

Более подробную информацию о ПЗС и их использовании можно найти в специальной литературе.

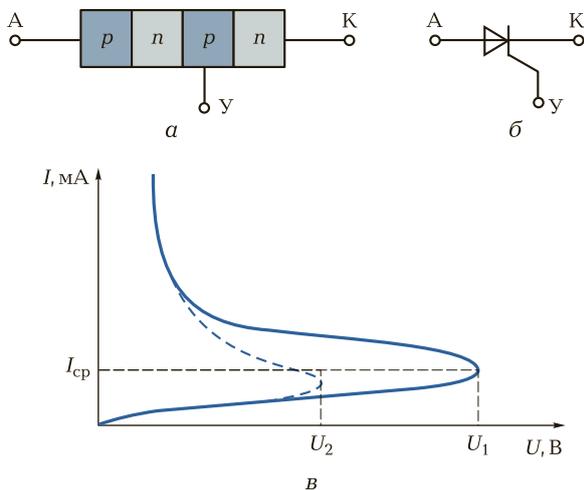
## 1.8. ТИРИСТОРЫ, ДИНИСТОРЫ И СИМИСТОРЫ

**Тиристор** — это полупроводниковый прибор, имеющий четырехслойную  $p-n-p-n$ -структуру, которая обеспечивает переключающие свойства прибора.

Полупроводниковая четырехслойная  $p-n-p-n$ -структура тиристора представлена на рис. 1.11, а. Она имеет два  $p-n$ -перехода, смещенных в прямом направлении, и один — в обратном. Условное графическое обозначение управляемого тиристора приведено на рис. 1.11, б.

Вольт-амперная характеристика тиристора приведена на рис. 1.11, в. Тиристор может находиться в одном из двух устойчивых состояний, соответствующих положению рабочей точки на его ВАХ: либо ниже прямой, характеризующей среднее значение тока  $I_{cp}$  (тиристор закрыт), либо выше нее (тиристор открыт). Переход из одного устойчивого состояния в другое происходит скачком, когда напряжение анод—катод превышает некоторое пороговое значение  $U_1$ . На отрицательном участке ВАХ состояние прибора неустойчивое.

Если на управляющий электрод (У) подать положительное напряжение, на нем появляется ток срабатывания и тиристор переходит в проводящее состояние при более низком напряжении анод—катод ( $U_2$ ). При этом переходе сопротивление тиристора и ток, проходящий через него, изменяются в  $10^6$ — $10^7$  раз. При со-



**Рис. 1.11.** Структура  $p-n-p-n$ -тиристора с управляющим электродом (а), его УГО (б) и ВАХ (в)

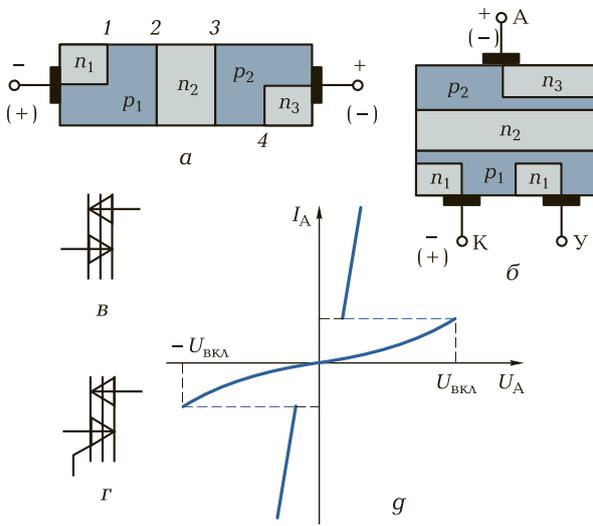
противлении тиристора в закрытом состоянии примерно от  $10^7$  Ом ток в нем составляет около  $10^{-6}$  А (микроампер). В открытом состоянии ток в тиристоре составляет от 0,1 до 1,0 А. Таким образом, тиристор, имеющий очень высокий коэффициент усиления по току и мощности, может быть хорошим ключевым устройством.

**Динистор** — это тиристор без управляющего электрода. Динисторы используются как электронные ключи, срабатывающие при превышении определенного напряжения.

В электронной аппаратуре используются также симметричные диодные динисторы и триодные тиристоры (симисторы), переключающиеся при прямом и обратном включениях.

Структура симметричного диодного тиристора — **симистора** (рис. 1.12, а, в) состоит из пяти областей полупроводника с чередованием типов проводимостей, которые формируют четыре  $p-n$ -перехода.

При подаче положительного напряжения на правый электрод, отрицательного — на левый на переходах полупроводника 1 и 3 будет прямое напряжение, а на переходах 2 и 4 — обратное. Напряжение на переходах 1 и 4 зависит от тока, проходящего через структуру: с ростом тока падение напряжения на них увеличивается и достигает значения, достаточного для смещения перехода 1 в прямом направлении, а перехода 4 — в обратном. В результате начинается инжекция электронов из  $n_1$ -области в  $p_1$ -область с по-



**Рис. 1.12.** Структуры симметричных диодного (а) и триодного (б) тиристоров, УГО диодного и триодного тиристоров (в, г) и ВАХ диодного тиристора (д):

1...4 — переходы полупроводника

следующим накоплением их в  $n_2$ -области. Происходит и встречная инжекция дырок из  $p_2$ -области через  $n_2$ -область и накопление их в области  $p_1$ . При этом область  $n_3$  не участвует в формировании тока, так как переход 4 смещен в обратном направлении.

Таким образом, работа  $n_1-p_1-n_2-p_2$ -структуры аналогична работе тиристора. При смене полярности подаваемого напряжения работает  $p_1-n_2-p_2-n_3$ -структура и протекающие в ней процессы также соответствуют тиристорным. Симметрия физических процессов при прямом и обратном включениях напряжения определяет симметрию ВАХ диодных тиристорov (рис. 1.12, г).

У симметричного триодного тиристора (рис. 1.12, б, г) основные электроды А и К соприкасаются одновременно с  $n$ - и  $p$ -областями. Электрод У, также соединенный с  $n$ - и  $p$ -областями, управляет током любого направления посредством напряжения соответствующей полярности. Это свойство симисторов используется для регулирования тока в мощных установках переменного напряжения, например в электромоторах.

Управление тиристором, т. е. его включение, может осуществляться путем освещения  $n-p-n-p$ -структуры светом. В этом случае прибор называется **фототиристором**. При освещении

светом светодиода полупроводниковой структуры, прозрачной в инфракрасном диапазоне, в ней образуются электронно-дырочные пары, способствующие возникновению тока и включению тиристора.

**Маркировка полупроводниковых приборов.** В настоящее время маркировка полупроводниковых приборов производится в соответствии с ГОСТ 10862—94, предусматривающим условное обозначение, состоящее из четырех элементов.

Первый элемент — буква или цифра, обозначающая исходный материал (Г или 1 — германий; К или 2 — кремний; А или 3 — арсенид галлия).

Второй элемент — буква, указывающая класс полупроводникового прибора: Д — диоды; Т — транзисторы; Ф — фотоприборы; С — стабилитроны; В — варикапы; И — туннельные диоды; Н — неуправляемые многослойные переключающие приборы; У — управляемые многослойные переключающие приборы (тиристоры, симисторы); А — сверхвысокочастотные диоды; Ц — выпрямительные столбы и блоки.

Третий элемент — трехзначное число, уточняющее принадлежность прибора определенной группе внутри данного класса.

Диоды: 101...399 — выпрямительные; 401...499 — универсальные; 501...599 — импульсные.

Транзисторы: 101...399 — малой мощности (101...199 — низкочастотные, 201...299 — среднечастотные; 301...399 — высокочастотные); 401...699 — средней мощности (401...499 — низкочастотные; 501...599 — среднечастотные, 601...699 — высокочастотные); 701...999 — большой мощности (701...799 — низкочастотные, 801...899 — среднечастотные, 901...999 — высокочастотные).

Фотоприборы: 101...199 — фотодиоды; 201...299 — фототранзисторы.

Стабилитроны: 101...399 — малой мощности (101...199 — от 0,1 до 9,9 В; 201...299 — от 10 до 99 В; 301...399 — от 100 до 199 В); 401...699 — средней мощности (401...499 — от 0,1 до 9,9 В; 501...599 — от 10 до 99 В; 601...699 — от 100 до 199 В); 701...999 — большой мощности (701...799 — от 0,1 до 9,9 В; 801...899 — от 10 до 99 В; 901...999 — от 100 до 199 В).

Туннельные диоды: 101...199 — усилительные; 201...299 — генераторные; 301...399 — переключающие.

Переключающие многослойные приборы (управляемые и неуправляемые), к которым относятся тиристоры и симисторы: 101...199 — малой мощности; 201...299 — средней мощности; 301...399 — большой мощности.

Сверхвысокочастотные диоды: 101...199 — смесительные; 201...299 — видеодетекторы; 301...399 — модуляторные; 401...499 — параметрические; 501...599 — переключающие; 601...699 — умножительные.

Выпрямительные столбы: 101...199 — малой мощности; 201...299 — средней мощности; 301...399 — большой мощности.

Выпрямительные блоки: 301...399 — малой мощности; 401...499 — средней мощности; 501...599 — большой мощности.

Четвертый элемент обозначения (необязательный) — буква, отличающая приборы одного типа с различными параметрами или конструктивным исполнением.

**Например:** КД202Б — кремниевый выпрямительный диод типа 202, разновидность Б; КС147А — кремниевый стабилитрон малой мощности с напряжением стабилизации 4,7 В, разновидность А; 1Т403Ж — германиевый транзистор средней мощности, высокочастотный, типа 403, разновидность Ж.

Выпускаемые с 1989 г. тиристоры имеют классификацию и систему обозначений, установленные ГОСТ 20859.1—89.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Что такое электронная техника?
2. Какие устройства относятся к вакуумной и твердотельной электронике?
3. Каковы области применения электронной техники?
4. На каких устройствах создается современная электронная техника?
5. Какие материалы используются в электронной технике и как они подразделяются по электропроводности?
6. Какими свойствами и характерными особенностями обладают полупроводники?
7. Что такое собственная проводимость и от чего она зависит?
8. От чего зависят электронная и дырочная проводимости?
9. Что такое  $p$ — $n$ -переход и какими свойствами он обладает?
10. Какие электровакуумные приборы вы знаете и для чего они нужны?
11. Что такое электронная лампа?
12. Какие электронно-лучевые приборы вы знаете и для чего они нужны?
13. Какие газоразрядные приборы вы знаете и для чего они нужны?
14. Что такое газовый лазер и как он используется?

15. Какие виды диодов вы знаете и как они используются?
16. Что такое варикап и как он используется?
17. Как связаны мощности и рабочие частоты диодов?
18. Каковы структура и УГО  $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -транзисторов?
19. Какие характеристики имеют транзисторы и каково их назначение?
20. Назовите входные и выходные характеристики транзистора. Как определяется коэффициент усиления по току?
21. Как определяется крутизна выходной характеристики транзистора?
22. Как определяются параметры ( $u$  и  $h$ ) транзистора и что они означают?
23. Каковы структура и УГО полевого транзистора управляемого  $p-n$ -переходом?
24. Какова структура полевых МОП (МДП)-транзисторов с встроенным и индуцируемым каналами?
25. Каковы преимущества МОП транзисторов по сравнению с биполярными?
26. Каковы структура ВАХ и УГО тиристора?
27. Какова структура ВАХ и УГО симистора?

# АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

## 2.1. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Большую часть информации человек воспринимает в аналоговой (непрерывной) форме, т. е. в виде плавно изменяющихся сигналов. Это звуковые сигналы в виде речи и музыки, визуальные телевизионные изображения. **Аналоговыми электронными устройствами** называют устройства, обрабатывающие сигналы в виде непрерывно изменяющихся во времени напряжений или токов. К ним относятся электронные усилители, генераторы, импульсные устройства, модуляторы, преобразователи частоты сигналов, аналоговые вычислители (сумматоры, умножители, интеграторы, дифференциаторы).

### 2.1.1. Виды, параметры и области применения электронных усилителей

Главное требование, предъявляемое к работе электронных усилителей — их способность сохранить форму сигналов при усилении. Это условие трудно выполнить как для сигналов с медленно меняющимися токами или напряжениями, так и для сигналов с быстро меняющимися токами и напряжениями. Поэтому выделяют усилители постоянного тока и высокочастотные усилители.

Электронные усилители делятся в соответствии с назначением и схемотехническим решением:

- усилители постоянного тока;
- низкочастотные усилители (звуковые);
- высокочастотные усилители (радиотехнические);
- импульсные (широкополосные) усилители;

- резонансные (узкополосные) усилители;
- операционные усилители.

Кроме того, по назначению различают также мощные усилители напряжения, тока и мощности, которые используются в оконечных каскадах.

В настоящее время электронные усилители выполняются в виде специализированных микросхем. Специальные широкополосные усилители нужны для очень коротких импульсов с короткими фронтами и срезами, так как они содержат много высокочастотных составляющих (гармоник). Специальные широкополосные усилители выполняют в виде микросхем с несколькими каскадами и выводными электродами для подключения массивных внешних элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей).

Наиболее универсальными микросхемами являются операционные усилители с высокими коэффициентами усиления. Они могут усиливать постоянные токи, включают в себя дифференциальный входной усилитель и могут использоваться с различными внешними элементами. При этом их функции резко меняются.

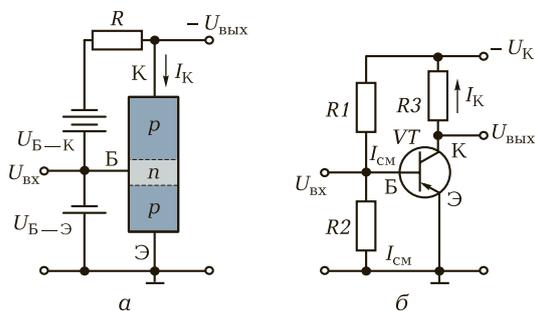
Несмотря на большие возможности микросхем в некоторых случаях целесообразно строить усилители на полевых транзисторах с низкими шумовыми характеристиками, большим входным сопротивлением, высоким коэффициентом усиления по напряжению. Знание особенностей усилительных каскадов на различных электронных элементах позволяет получить наиболее рациональное схемотехническое решение.

## 2.1.2. Транзисторный усилительный каскад

Рассмотрим наиболее распространенную схему усилительного каскада на  $p-n-p$ -транзисторе с общим эмиттером. Схема включения  $p-n-p$ -транзистора в усилительном каскаде с общим эмиттером показана на рис. 2.1, а.

Для работы транзистора на линейном участке выходной характеристики на его базу подают необходимое напряжение смещения с помощью делителя напряжения на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$ . Это позволяет обойтись одним источником питания постоянного тока с напряжением  $U_{к-э} \approx 10$  В.

Протекание тока через цепь смещения с резисторами  $R_1$ ,  $R_2$  связано с потреблением дополнительной мощности от источника питания. Для уменьшения этого тока применяются высокоомные резисторы сопротивлением  $R_1 = 50$  кОм и  $R_2 = 10$  кОм.



**Рис. 2.1.** Схемы, используемые для базового смещения напряжения  $p-n-p$ -транзистора:

*а* — с источниками ЭДС; *б* — с делителем напряжения

Меняя номиналы резисторов  $R1$  и  $R2$ , можно изменять напряжение на базе около  $0,625$  В. В некоторых случаях базовое смещение создают только через большое сопротивление резистора  $R1$ .

Те же самые способы смещения перехода применяются и для  $p-n-p$ -транзистора, только в этом случае используется источник питания с напряжением отрицательной полярности  $-U_{К-Э}$ .

Для получения прямого смещения эмиттерного перехода потенциал базы должен быть «выше» потенциала эмиттера, т. е. более положительным по отношению к эмиттеру в  $n-p-n$ -транзисторе и более отрицательным к эмиттеру в  $p-n-p$ -транзисторе. Независимо от типа используемого транзистора потенциал базы всегда выше потенциала эмиттера, но ниже потенциала коллектора.

Для того чтобы снять выходное напряжение с коллектора, в его цепь включается нагрузочный резистор  $R3$ , также называемый коллекторным (рис. 2.1, б). Коллекторный ток  $I_K$ , протекая через коллекторный резистор с сопротивлением  $R_K = R_3$ , создает на нем падение напряжения  $U_{R3}$ . Следовательно, по закону Ома,  $U_{R3} = I_K R_3$ .

Поскольку все напряжения измеряются относительно корпуса или потенциала земли, то коллекторное напряжение  $U_{К-Э}$  есть разность потенциалов между коллектором и корпусом. Как видно из схемы, напряжение источника питания  $U_E = U_{R3} + U_{К-Э}$ , и, следовательно,  $U_{К-Э} = U_E - U_{R3}$ .

Для типичного резистора с сопротивлением  $R_3 = 3,3$  кОм, показанного на схеме, принимая  $I_K = 1,2$  мА и  $U_E = 10$  В, получим  $U_{R3} = I_K R_3 = 1,2 \cdot 3,3 = 4$  В. Тогда  $U_{К-Э} = U_E - U_{R3} = 10 - 4 = 6$  В. Т.е. напряжение на коллекторе может меняться от  $10$  до  $6$  В.

Аналогичную роль выполняет коллекторный резистор в схеме с  $n-p-n$ -транзистором.

Коэффициент усиления по напряжению транзисторного каскада с коллекторным резистором  $R_K$  определяется по формуле

$$K = -dU_{K-\text{Э}}/dU_{Б-\text{Э}} = -dI_K R_K / dU_{Б-\text{Э}} = -R_K dI_K / dU_{Б-\text{Э}}.$$

С учетом формулы для крутизны транзистора  $S$  (1.2) получим

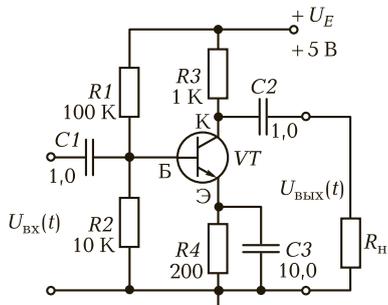
$$K = -R_K S. \quad (2.1)$$

Последнее выражение показывает, что при подаче на вход положительного импульса — на выходе каскада (на коллекторе) происходит спад напряжения, т. е. приведенный каскад является инвертирующим (переворачивающим входной импульс).

### 2.1.3. Транзисторный усилительный каскад переменного напряжения

В транзисторном усилительном каскаде переменного напряжения (рис. 2.2) на основе  $n-p-n$ -транзистора важно создать разделение по постоянному току между предыдущими и последующими каскадами, сохранив хорошую связь по переменному току. Для этого используют разделительные конденсаторы  $C1$  на входе и  $C2$  на выходе транзистора. Параметры этих конденсаторов зависят от частоты усиливаемых сигналов и входного сопротивления каскада. Электронные компоненты, обеспечивающие связь по переменному току (например, конденсаторы или трансформаторы), обычно устанавливаются на входе и выходе усилителя.

Входной разделительный конденсатор  $C1$  необходим для того, чтобы предотвратить протекание постоянного тока между входными цепями и базой транзистора, обеспечив при этом свободное прохождение переменного тока. Таким образом, заданный режим



**Рис. 2.2.** Транзисторный RC-усилительный каскад переменного напряжения с резисторами в коллекторной и эмиттерной цепях

покоя (статический режим) транзистора не будет влиять на статические режимы предыдущего и последующего каскадов.

Для постоянного тока конденсатор  $C1$  обеспечивает разрыв цепи, полностью блокируя его протекание между входными точками и базой транзистора, поэтому этот конденсатор называют разделительным.

Хорошее качество связи по переменному току достигается только в том случае, когда реактивное сопротивление  $X_C$  конденсатора (сопротивление переменному току) на рабочей частоте намного меньше сопротивления нагрузочного резистора  $R2$ , при этом сопротивление  $R_1 > 2R_2$ . Тогда на этом конденсаторе падает (и теряется) очень малая часть напряжения входного сигнала. Например, если  $U_{вх} = 100$  мВ, то связь по переменному току можно считать удовлетворительной, когда выходное напряжение  $U_{вых} = 95$  мВ, т. е. на разделительном конденсаторе падает 5 мВ (5 %, или 1/20 часть входного напряжения).

Требуемую емкость разделительного конденсатора определяют два фактора.

1. *Сопротивление входной нагрузки*  $R = R_2 + R_{Б-К}$ . Считая, что удовлетворительная связь по переменному току достигается, когда  $X_C = R/20$ , для  $R = 1$  кОм получаем  $X_C = R/20 = 1\ 000/20 = 50$  Ом.

Предположим, что рабочая частота входного сигнала  $f = 300$  Гц.

Поскольку  $X_C = 1/(2\pi f C_1)$ , то  $C_1 = 1/(2\pi f X_C) = 1/(2\pi \cdot 300 \cdot 50) = 10$  мкФ.

Если сопротивление нагрузочного резистора  $R2$  увеличить до 100 кОм, получим  $X_C = R/20 = 100/20 = 5$  кОм;  $C_1 = 1/(2\pi f X_C) = 1/(2\pi \cdot 300 \cdot 5 \cdot 10^3) \approx 0,1$  мкФ.

Таким образом, если сопротивление нагрузочного резистора увеличить в 100 раз (с 1 до 100 кОм), то емкость разделительного конденсатора можно уменьшить в той же пропорции (с 10 до 0,1 мкФ). Чем больше сопротивление входного нагрузочного резистора, тем меньше требуемая емкость разделительного конденсатора. Однако необходимо учитывать еще и сопротивление база—коллектор  $R_{Б-К}$ , которое для разных транзисторов может изменяться от 0,1 до 10 кОм.

2. *Рабочая частота*. Возьмем в качестве исходных данные из предыдущего примера, т. е. будем считать, что удовлетворительная связь по переменному току достигается при  $C_1 = 10$  мкФ и  $R = 1$  кОм для  $f = 300$  Гц.

Если теперь рабочую частоту увеличить до 300 кГц, то с учетом того, что  $X_C = R/20 = 1\ 000/20 = 50$  Ом получаем  $C_1 = 1/(2\pi f X_C) = 1/(2\pi \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 50) \approx 0,01$  мкФ.

Таким образом, если рабочую частоту увеличить в 1 000 раз (с 300 Гц до 300 кГц), то емкость разделительного конденсатора можно уменьшить в 1 000 раз (с 10 до 0,01 мкФ). В общем случае при заданном сопротивлении нагрузочного резистора для низких рабочих частот необходимо использовать разделительные конденсаторы большой емкости, и наоборот, при высоких частотах — конденсаторы малой емкости.

Когда необходимо пропустить определенный диапазон частот, емкость разделительного конденсатора определяется наименьшей частотой из этого диапазона. Из рассмотренных примеров видно, что, с одной стороны, конденсатор емкостью 10 мкФ обеспечивает адекватную связь по переменному току при частоте 300 Гц и тем более при частоте 300 кГц. С другой стороны, конденсатор емкостью 0,1 мкФ обеспечивает адекватную связь при частоте 300 кГц, но непригоден для реализации связи по переменному току при частоте 300 Гц.

Все сказанное можно отнести и к выходному разделительному конденсатору  $C_2$ , передающему колебания усиленного переменного напряжения на следующий каскад. Типичные значения емкостей разделительных конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  следующие: для звуковых частот — 10...50 мкФ, для радиочастот — 0,01...0,1 мкФ.

**Тепловой пробой и его устранение.** Как уже отмечалось, неосновные носители образуют так называемый ток утечки обратно смещенного перехода. Ток утечки (часто называемый обратным коллекторным током) протекает через обратно смещенный коллекторный переход транзистора (см. рис. 2.1). Этот ток усиливается точно так же, как входной (базовый) ток с коэффициентом усиления  $\beta$ . При увеличении температуры транзистора ток утечки возрастает. Он усиливается транзистором и увеличивает коллекторный ток, что приводит к дальнейшему повышению температуры транзистора и, следовательно, тока утечки и т. д.

Этот процесс, называемый тепловым пробоем, носит лавинообразный характер и, если его оставить без контроля, может привести к разрушению транзистора. Для защиты от теплового пробоя используют резистор  $R_4$  в эмиттерной цепи (см. рис. 2.2). Падение напряжения на этом резисторе приводит к увеличению потенциала эмиттера и уменьшению разности потенциалов между эмиттером и базой, что обеспечивает резкое уменьшение тока базы и коллектора.

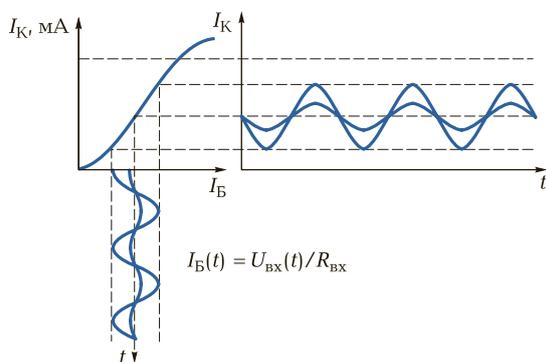
**Стабилизация рабочего режима по постоянному току.** Кроме теплового пробоя в усилителе с общим эмиттером наличие тока утечки коллекторного перехода вызывает и нестабильность режима

работы транзистора по постоянному току (статического режима). Эту нестабильность можно устранить, включив резистор  $R_4$  в эмиттерную цепь транзистора, как показано на рис. 2.2. Потенциал эмиттера в этом случае становится равным падению напряжения на резисторе  $R_4$ , которое создается при протекании эмиттерного тока  $i_3$  через этот резистор. Таким образом,  $U_3 = I_3 R_4$ . Это напряжение с обратным знаком подается на базу через резистор  $R_2$  и приводит к уменьшению входного напряжения и ограничению коллекторного тока в транзисторе.

Конденсатор развязки  $C_3$  шунтирует резистор  $R_4$  по переменному току. В отсутствие этого конденсатора на эмиттере транзистора будет постоянный потенциал, обеспечивающий отрицательное смещение на базе по постоянному току. Конденсатор  $C_3$ , не пропускающий постоянный ток, не влияет на постоянный потенциал эмиттера. Если емкость этого конденсатора такова, что на рабочей частоте его реактивное сопротивление существенно меньше сопротивления резистора  $R_4$ , то он будет эффективно осуществлять короткое замыкание сигнала переменного тока на землю. Таким образом, потенциал точки эмиттера по переменному току будет равен нулю. Емкость конденсатора  $C_3$ , обеспечивающая удовлетворительную развязку, определяется сопротивлением резистора  $R_4$  и рабочей частотой сигнала. Расчет емкости конденсатора можно выполнять по тем же самым формулам, которые использовали для расчета емкости разделительного конденсатора. При этом чем больше емкость конденсатора  $C_3$ , тем лучше он будет шунтировать резистор  $R_4$ .

Обратная связь эмиттера с базой, осуществляемая через резисторы  $R_2$ ,  $R_4$ , возникает за счет падения напряжения на резисторе  $R_4$  и является отрицательной, т. е. действует на входной сигнал в противофазе (усиление тока транзистора приводит к увеличению запирающего напряжения на его базе). Эта связь обеспечивает необходимую стабильность усиления каскада. Для устранения отрицательной обратной связи по переменному току и одновременного сохранения стабильности обратной связи по постоянному току применяется эмиттерный развязывающий конденсатор  $C_3$ , типичные значения емкости которого примерно в два раза выше, чем разделительного конденсатора  $C_2$ .

Схема, приведенная на рис. 2.2, является законченной схемой однокаскадного усилителя с общим эмиттером. Принцип усиления тока в этом каскаде поясняет рис. 2.3. Сигнал синусоидальной формы  $U_{вх}(t)$ , поданный на вход усилителя, передается через конденсатор на базу транзистора. В начале положительного полупе-

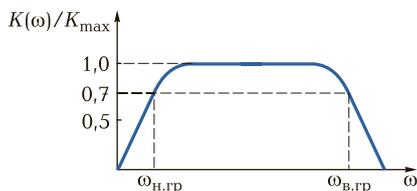


**Рис. 2.3.** Графики, поясняющие усиление синусоидального напряжения в транзисторном каскаде

риода входного сигнала потенциал базы возрастает относительно потенциала эмиттера, напряжение  $U_{Б-Э}$  увеличивается, токи эмиттера  $I_Э$ , а следовательно, и коллектора  $I_K$  возрастают; в результате напряжение на коллекторе  $U_K$  уменьшается. Это означает, что, с одной стороны, положительному полупериоду входного сигнала соответствует отрицательный полупериод выходного сигнала. С другой стороны, отрицательному полупериоду входного сигнала соответствует положительный полупериод изменения коллекторного напряжения. Таким образом, сигналы на входе и выходе усилителя противофазны. Усиление сигнала происходит в силу того, что очень малый размах напряжения  $U_{Б-Э}$  приводит к большому размаху тока транзистора, который, проходя через резистор  $R_3$ , вызывает большой размах коллекторного напряжения  $U_{вых} = I_K R_3$ .

Работу усилительного каскада в конкретной схеме необходимо рассматривать с учетом нагрузки. Для этого необходимо определять нагрузочные прямые транзистора в зависимости от выходного сопротивления.

Амплитудно-частотная характеристика усилителя на высоких частотах имеет вид кривой, показанной на рис. 2.4. Верхние граничные значения круговой частоты  $\omega_{в.гр}$  и временной частоты  $f_{в.гр}$  усилителя определяются соответствующей постоянной времени  $\tau_в = C_2 R_н$ . Причем  $\omega_{в.гр} = 1/(2\pi\tau_в)$ ,  $f_{в.гр} = 1/\tau_в$  (чем меньше  $\tau_в$ , тем больше верхняя граничная частота усилителя). Экспериментально значения этих частот определяются по величине, соответствующей нормированному уровню коэффициента усиления каскада  $K = 0,7K_{max}$  на АЧХ усилителя.



**Рис. 2.4.** Результирующая АЧХ транзисторного усилительного RC-каскада

Для расширения частотной характеристики можно уменьшить нагрузочное сопротивление, но это приведет к уменьшению.

Полоса пропускания от частоты нижней границы  $\omega_{н.гр}$  до частоты верхней границы  $\omega_{в.гр}$  определяется через постоянные времени  $\tau_n$  и  $\tau_v$ , т.е.  $\omega_{н.гр} = 1/(2\pi\tau_n)$ ;  $\tau_n = C_1R_2$ . Для звуковых усилителей  $\omega_n = 50$  Гц,  $\omega_v = 20$  кГц.

Если ширина полосы пропускания обычного усилителя недостаточна, то используют цепи коррекции и широкополосные импульсные усилители. Как уже отмечалось ранее, импульсные усилители должны хорошо усиливать импульс без потери формы, т.е. импульс должен равномерно усиливаться как в низкочастотном (для сохранения его вершины), так и высокочастотном (для сохранения формы его фронта и среза) диапазоне.

На высоких частотах применяются эмиттерные цепи коррекции в виде генераторов тока на составных транзисторах.

## 2.1.4. Резонансные усилители

**Резонансные усилители** — усилители, в которых в качестве сопротивления нагрузки транзистора или операционного усилителя используется последовательный или параллельный колебательный LC-контур, настроенный в резонанс с частотой усиливаемых колебаний.

Резонансный усилитель имеет ряд преимуществ по сравнению с RC-усилителем:

- входная и выходная емкости, а также емкость монтажа компенсируются настройкой контура в резонанс, поэтому сопротивление нагрузки, равное эквивалентному сопротивлению контура, может быть большим и обеспечивать большое усиление;
- на сопротивлении нагрузки нет падения постоянного напряжения, поэтому сопротивление нагрузки может быть очень большим;
- усилитель обладает частотной избирательностью, определяемой АЧХ контура нагрузки.

Электрическая схема одноконтурного транзисторного резонансного усилителя с автотрансформаторной связью контура с транзистором следующего каскада приведена на рис. 2.5. Частичное включение транзистора в контур используется в целях уменьшения шунтирующего влияния его выходного сопротивления и сопротивления нагрузки на эквивалентное сопротивление контура, а также для согласования входного и выходного сопротивлений транзистора и нагрузки.

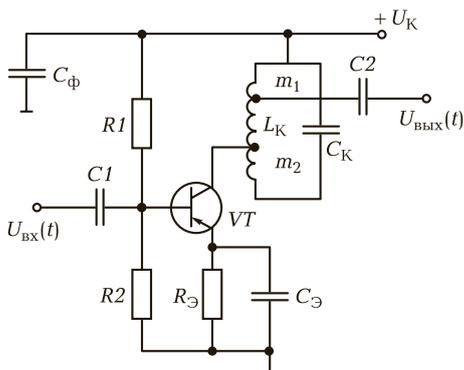
При анализе работы усилителя необходимо выполнить следующее:

- определить зависимость выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  от частоты входного сигнала и параметров схемы, откуда затем можно найти коэффициент усиления, амплитудно-частотную, фазочастотную (ФЧХ) характеристики и полосу пропускания усилителя;
- выяснить условия устойчивой работы усилителя при наличии паразитных обратных связей и выбрать оптимальные коэффициенты связи для обеспечения требуемой полосы пропускания.

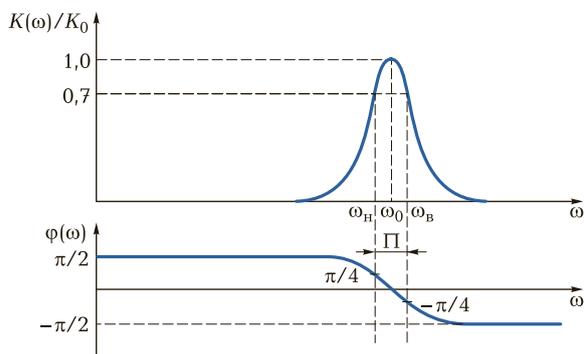
Для резонансного контура важны резонансная частота, характеристическое или волновое сопротивление, собственная добротность  $Q_{\text{к}}$ , эквивалентное затухание контура  $d_{\text{ЭКВ}} = 1/Q_{\text{ЭКВ}}$ .

При резонансе коэффициент усиления становится чисто действительным, так как в этом случае  $Z_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{ЭКВ}}$  представляет собой чисто активное сопротивление.

АЧХ и ФЧХ резонансного усилителя приведены на рис. 2.6. АЧХ имеет колоколообразную форму с максимумом  $K_0$  на резонансной частоте  $\omega_0$ , а ФЧХ изменяется от  $\pi/2$  до  $-\pi/2$ .



**Рис. 2.5.** Электрическая схема одноконтурного транзисторного резонансного усилителя



**Рис. 2.6.** АЧХ и ФЧХ резонансного усилителя

Полоса пропускания контура определяется по формуле

$$\Pi = 2\Delta\omega = \omega_0 / Q_{\text{экв}},$$

где  $\Delta\omega$  — разность частот;  $\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{\text{H}} \approx \omega_{\text{B}} - \omega_0$ .

Согласно формуле полоса уменьшается при увеличении добротности и уменьшении резонансной частоты контура.

## 2.1.5. Обратная связь в усилителях

**Обратная связь** (ОС) в усилителях — это такая связь между его цепями, при которой часть энергии усиленных сигналов выходной цепи передается во входные цепи. Если сигнал ОС приводит к дополнительному усилению в усилителе, ОС называется положительной (ПОС). Если же сигнал ОС приводит к ослаблению входного сигнала, то такую ОС называют отрицательной (ООС).

Положительная ОС приводит к самовозбуждению усилителя и применяется только в генераторах синусоидальных и импульсных напряжений. Отрицательная ОС приводит к ослаблению коэффициента усиления и одновременно улучшению его частотных и динамических характеристик.

Обычно ОС выполняется с помощью пассивных элементов ( $RC$ - или  $LC$ -цепочек). Обратная связь может быть по напряжению и по току. Во втором случае напряжение, пропорциональное току в цепи нагрузки, снимается с вспомогательного резистора связи  $R_{\text{св}}$  и подается в цепь ОС.

Обратную связь в усилителях разделяют на внутреннюю, паразитную и внешнюю:

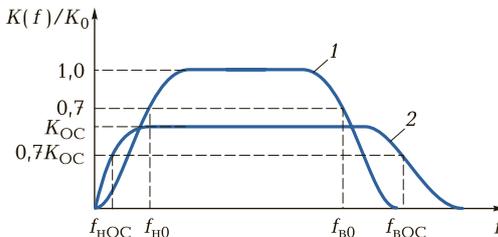
- внутренняя ОС имеется во всех активных электронных приборах и зависит от их физических свойств и устройства;
- паразитная ОС появляется из-за возникновения произвольных (паразитных) емкостных и индуктивных связей между входом и выходом усилителя или его отдельных каскадов;
- внешняя (наведенная) ОС определяется специально введенными цепями для получения заданных характеристик усилителя.

Внутреннюю и паразитную ОС стремятся сделать как можно меньше, так как они приводят к нежелательным изменениям свойств усилителя (например, самовозбуждению). Внешнюю ООС создают для повышения стабильности сигнала (т.е. для исключения самовозбуждения из-за паразитных ОС), расширения полосы пропускания, автоматической регулировки усиления, уменьшения нелинейных искажений сигналов, увеличения входного и уменьшения выходного сопротивлений.

При положительной ОС напряжение ОС находится в одной фазе с напряжением входного сигнала, следовательно, выходное напряжение увеличивается, усилитель самовозбуждается и превращается в генератор.

При отрицательной ОС напряжение ОС находится в противофазе с напряжением входного сигнала. Следовательно, уменьшаются входное и выходное напряжения усилителя. Коэффициент усиления усилителя с ООС падает, но расширяется полоса равномерного усиления.

АЧХ усилителей без ООС и с ООС приведены на рис. 2.7. На рисунке видно, что у усилителя с ООС коэффициент усиления в области средних частот меньше, чем у усилителя без ООС. Вместе с тем его нижняя граничная частота  $f_{\text{НОС}}$  сдвинута в область низких частот, а верхняя граничная частота  $f_{\text{ВОС}}$  — в область более высоких частот. Таким образом, полоса пропускания усилителя с ООС су-



**Рис. 2.7.** АЧХ двухкаскадного транзисторного усилителя без ООС (1) и с ООС (2)

щественно расширяется. Поскольку коэффициенты усиления современных транзисторов довольно велики, получить высокий коэффициент многокаскадного усилителя нетрудно. Используя ООС, получают импульсные и звуковые усилители с требуемой широкополосностью при минимальном количестве катушек индуктивности и конденсаторов.

Коэффициент усиления может изменяться вследствие изменения параметров активных элементов ООС. Комбинируя разные типы ООС, можно получить усилители с различными характеристиками.

**Влияние ООС на устойчивость усилителя.** В некоторых случаях усилители обладают склонностью к самовозбуждению. Это происходит из-за того, что на некоторой частоте фаза напряжения ОС меняется на  $180^\circ$ , и отрицательная ОС превращается в положительную. Обычно такое явление происходит на краях полосы пропускания. Для устранения этого явления используют частотно-зависимую ОС с  $RC$ -цепями.

**Влияние ООС на линейные искажения.** Отрицательная ОС уменьшает коэффициент усиления. При больших амплитудах входного сигнала ток в активных элементах усилителя без ООС может достигать предельных значений, при которых начинаются нелинейные искажения. В усилителе с ООС сильные сигналы подавляются больше и динамический диапазон входных сигналов расширяется. Такой эффект ООС наиболее часто применяют в радиотехнических устройствах, где сигналы могут изменяться по амплитуде на 30...40 дБ. Использование ООС в этих целях называется **автоматической регулировкой усиления** (АРУ).

ООС обеспечивает выравнивание АЧХ в широком спектральном диапазоне, что приводит к улучшению воспроизведения сигналов с широким спектром и уменьшению частотных искажений. В частности, при наличии ООС в видеоусилителях лучше воспроизводятся фронты и срезы импульсов.

Если цепь ООС частотно-зависимая (т.е. имеет  $LC$ - или  $RLC$ -цепи), то с ее помощью можно вести избирательное усиление определенных частот (например, коррекцию в области высоких или низких частот).

## 2.1.6. Усилители постоянного тока

В усилителях постоянного тока (или усилителях медленно меняющихся сигналов) коэффициент усиления при уменьшении частоты сигнала до нуля остается таким же, как и на средних частотах,

т. е. эти усилители равномерно усиливают его переменную и постоянную составляющие.

Усилители постоянного тока (УПТ) обычно используются в контрольно-измерительных приборах, непрерывно измеряющих и регистрирующих изменения физических или технических параметров.

Электрическая схема УПТ прямого усиления на трех транзисторах приведена на рис. 2.8. Связь между каскадами этого усилителя непосредственная гальваническая через резисторы, сопротивление которых не зависит от частоты сигнала.

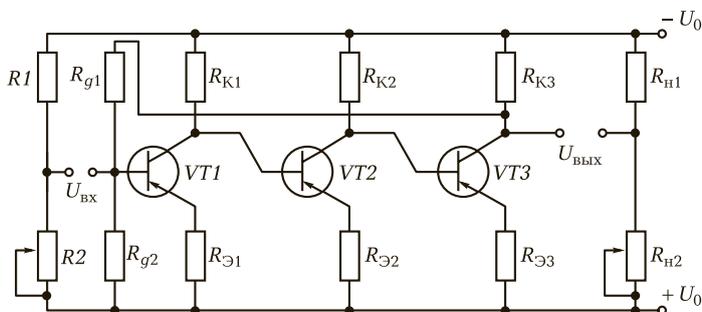
Необходимое напряжение смещения на базе первого транзистора  $VT1$  обеспечивается с помощью резистивного мостика  $R_{g1}$ ,  $R_{g2}$  и падения напряжения на резисторе  $R_{Э1}$ . Здесь можно отметить первую цепь отрицательной обратной связи на резисторах  $R_{g2}$  и  $R_{Э1}$ .

Необходимое напряжение смещения на базе второго транзистора  $VT2$  относительно его эмиттера создается подбором сопротивления на  $R_{Э2}$ .

В схеме резисторы эмиттерных цепей всех транзисторов подбираются таким образом, чтобы выполнялось условие  $R_{Э1} > R_{Э2} > > R_{Э3}$ . В этом случае напряжение на эмиттере каждого последующего каскада будет нарастать, а коэффициент усиления каждого последующего каскада будет меньше предыдущего.

Вход первого каскада и выход последнего охвачены отрицательной обратной связью с помощью резистора  $R_{g1}$ , подключенного к коллектору транзистора  $VT3$ .

Делители  $R1$ ,  $R2$  компенсируют напряжение, поступающее на вход источника сигнала с базы транзистора  $VT1$ , сохраняя посто-



**Рис. 2.8.** Электрическая схема усилителя постоянного тока на трех транзисторах с резистивной связью

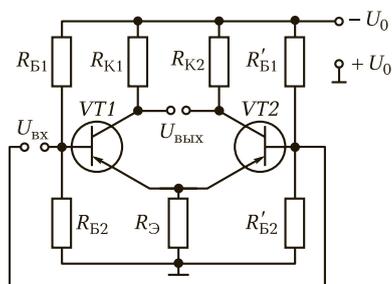
янное смещение напряжения на ней при изменении внутреннего сопротивления источника сигнала.

Делители  $R_{н1}$ ,  $R_{н2}$  компенсируют постоянную составляющую напряжения, поступающего на нагрузку с коллектора транзистора  $VT3$  при отсутствии сигнала на входе усилителя.

АЧХ усилителя постоянного тока равномерна от нулевой частоты до предельной. Искажения сигнала на низких и средних частотах усилителя с прямыми резистивными связями практически отсутствуют. Верхняя частота АЧХ (частота среза), определяемая паразитными емкостями электрических цепей и переходов база—эмиттер, в зависимости от типа транзисторов может достигать 1 МГц.

Недостатком УПТ с резистивными связями является нестабильность усиления, обусловленная колебаниями питающего напряжения, температурной нестабильностью резисторов и параметров транзисторов. Этот недостаток вызывает так называемый дрейф нуля, который ограничивает чувствительность приборов, использующих УПТ, и приводит к систематической приборной ошибке. Для уменьшения дрейфа нуля требуется использовать высокостабильные детали и источники питания, термостатирование, специальные схемы компенсации. В некоторых случаях для компенсации дрейфа нуля применяют модуляцию входного сигнала синусоидальным сигналом определенной частоты с последующей демодуляцией на выходе усилителя. Однако такие схемы усложняют и повышают стоимость аппаратуры. Более дешевым и простым способом устранения дрейфа нуля оказалось применение специальных схем, например дифференциальных каскадов.

Электрическая схема дифференциального каскада УПТ приведена на рис. 2.9. Схема полностью симметрична. Входное напряжение подается на базы транзисторов в противофазе. При  $U_{вх} = 0$  коллекторные токи и напряжения транзисторов одинаковы, поэтому выходное напряжение равно нулю. Любая нестабильность температуры, напряжения питания,



номиналов элементов схемы вызывает одинаковые изменения на коллекторах транзисторов, и выходное напряжение остается без изменения.

**Рис. 2.9.** Электрическая схема дифференциального каскада УПТ

При изменении входного напряжения один из транзисторов начинает открываться, а другой закрываться. При этом напряжение на первом коллекторе падает, а на втором нарастает. На выходе появляется разность напряжений, строго пропорциональная входному сигналу. Это разностное напряжение называют дифференциальным.

Следует отметить, что полной компенсации дрейфа нуля трудно достичь в схемах, выполненных на дискретных элементах, так как параметры однотипных транзисторов и резисторов неодинаковы.

Гораздо лучше компенсация дрейфа нуля обеспечивается в интегральных микросхемах, выполняемых на одном кристалле при строгой подгонке параметров активных элементов. На основе дифференциальных каскадов были созданы микросхемы операционных усилителей, которые и являются УПТ с малым дрейфом нуля и широкой полосой пропускания.

## 2.1.7. Операционные усилители

**Операционный усилитель** — это дифференциальный усилитель постоянного тока с очень большим (до  $10^8$  раз) коэффициентом усиления и несимметричным или симметричным выходом.

Первоначально операционные усилители применяли в аналоговой вычислительной технике для выполнения различных математических операций (суммирования, умножения, интегрирования и т. д.), т. е. операционным называли решающий усилитель.

Создание дифференциальных усилительных каскадов в интегральном исполнении позволило решить задачу построения универсальных интегральных микросхем операционных усилителей. Сейчас выпускается широкая номенклатура ОУ, в том числе предназначенных для усиления сигналов различных датчиков, радиоэлектронных и технических устройств, а также фотоприборов, включая фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы. Применение ОУ существенно упрощает построение радиоэлектронных устройств и использование фотоприборов для решения задач импульсной техники.

Интегральная микросхема операционного усилителя (ИМС ОУ) — это высококачественный универсальный усилитель напряжения, предназначенный для решения разнообразных задач: усиления, преобразования, обработки, детектирования, формирования сигналов, фильтрации и т. д. ИМС ОУ, обеспечивающий качественное усиление по постоянному току, часто называют усилителем постоянного тока с дифференциальным входом и однофазным вы-

ходом. Постепенное совершенствование и рост выпуска ОУ в виде микросхем сделали их универсальными элементами разнообразных электронных устройств. Обычно в одной ИМС содержится два ОУ для двухкаскадного усилителя.

Операционный усилитель никогда не включают без отрицательной обратной связи. При этом уменьшается коэффициент усиления каскада, но расширяется его спектральный диапазон с равномерной АЧХ, снижаются нелинейные искажения, улучшаются функциональные характеристики. Можно считать, что характеристики усилительного каскада на ИМС ОУ в основном определяются свойствами цепи отрицательной обратной связи.

Иногда ИМС ОУ называют операционным усилителем без обратной связи, а собственно усилитель на основе ОУ — операционным усилителем с обратной связью, т. е. операционным усилителем называют как интегральную схему, так и сам усилитель с использованием ИМС ОУ. (Далее, в некоторых случаях для упрощения под ОУ будем подразумевать ИМС ОУ или усилитель с ИМС ОУ, что легко различить по контексту.)

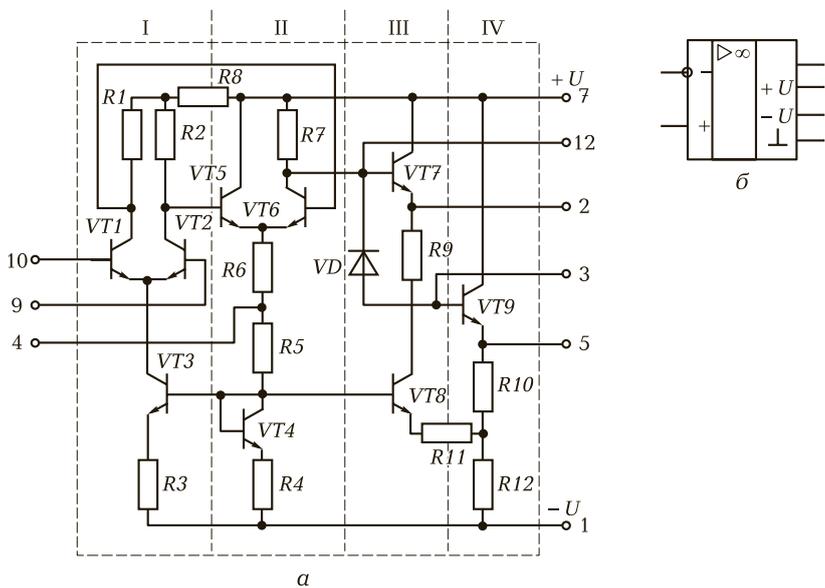
К выводам ИМС ОУ, кроме цепи обратной связи, присоединяются питание, нагрузка, источники сигналов и другие цепи. Операционный усилитель является усилителем постоянного напряжения, т. е. его АЧХ не имеет завала в области низких частот, поскольку ИМС ОУ не содержит разделительных конденсаторов. При этом, чтобы в отсутствие входных сигналов потенциал выхода можно было привести к нулю (потенциалу земли), для питания ОУ используют двуполярный источник (обычно симметричный, например,  $\pm 15$  В).

Электрическая схема ИМС операционного усилителя 140УД1 с разделением на каскады и ее УГО приведены на рис. 2.10.

ИМС ОУ имеет два входных вывода: инвертирующий (обозначаемый на схемах кружком) и неинвертирующий. Обычно инвертирующий вход называют отрицательным входом ( $-$ ), а неинвертирующий — положительным ( $+$ ), соответственно их обозначают  $U_{\text{инв}}$  и  $U_{\text{неинв}}$ . При этом напряжение на выходе ОУ является инвертированным по отношению к сигналу, поданному на отрицательный вход, и неинвертированным по отношению к сигналу, поданному на положительный вход.

Если на входные выводы ИМС ОУ поступают напряжения  $U_{\text{инв}}$  и  $U_{\text{неинв}}$ , то из них можно выделить синфазный ( $U_{\text{сф}}$ ) и дифференциальный ( $U_{\text{диф}}$ ) сигналы.

Синфазный сигнал соответствует среднему значению напряжений двух одинаковых по знаку сигналов, приложенных к обоим входным выводам:



**Рис. 2.10.** Электрическая схема интегральной микросхемы операционного усилителя 140УД1 (а) и его УГО (б)

$$U_{\text{сф}} = (U_{\text{инв}} + U_{\text{неинв}})/2.$$

Дифференциальный (разностный) сигнал соответствует разности напряжений двух сигналов одинаковых по знаку:

$$U_{\text{диф}} = (U_{\text{неинв}} - U_{\text{инв}}).$$

Например, если  $U_{\text{неинв}} = 1,4$  В и  $U_{\text{инв}} = 1,0$  В, то  $U_{\text{сф}} = 1,2$  В, а  $U_{\text{диф}} = 0,4$  В.

**Структура микросхемы операционного усилителя.** Микросхема ОУ 140УД1 (см. рис. 2.10) состоит из четырех усилительных каскадов.

I — входной каскад. Представляет собой высокочувствительный дифференциальный усилитель на транзисторах VT1 и VT2 с одинаковыми коллекторными резисторами. В общей эмиттерной цепи этих транзисторов находится генератор стабилизации тока  $I_{01}$  (тока коллектора транзистора VT3), выполненный на транзисторах VT3 и VT4. Благодаря такой схеме ОУ имеет большое входное сопротивление, малый уровень дрейфа нуля, большой линейный участок АЧХ и широкую полосу пропускания. Различные варианты дифференциальных каскадов работают в широкой полосе частот

(от 0 до  $10^6$  Гц), с большим коэффициентом усиления (несколько десятков или сотен) и входным сопротивлением не менее 50 кОм.

Дифференциальный каскад предназначен для усиления дифференциального сигнала, т. е. разности напряжений, приложенных к входам. При полной идентичности параметров составляющих элементов ветвей каскада усилителя напряжение между коллекторами транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  в отсутствие сигналов на входах равно нулю. При идентичных ветвях усилителя коллекторные напряжения равны и при синфазном сигнале не изменяются.

II — усилитель напряжения. Выполнен по схеме дифференциального усилителя на транзисторах  $VT5$  и  $VT6$ . Его эмиттерный ток не стабилизирован, и он имеет одиночный выход с коллектора транзистора  $VT6$ . Этот промежуточный каскад обеспечивает основное усиление по напряжению и осуществляет необходимый сдвиг уровня постоянного напряжения для получения его нулевого значения на выходе ОУ при отсутствии входного сигнала. В качестве дополнительных промежуточных каскадов усилителя напряжений обычно используются дифференциальные каскады на биполярных транзисторах или простейшие усилители, за которыми следуют каскады сдвига уровня на повторителях напряжения.

В некоторых ИМС ОУ для обеспечения симметрии плеч дифференциального усилителя напряжения к коллектору его второго плеча присоединяется нагрузка, эквивалентная по значению нагрузке первого плеча.

III — цепь сдвига уровня постоянного напряжения. Она необходима ввиду отсутствия в схеме разделительных конденсаторов для выделения постоянных составляющих напряжений. В схеме рис. 2.10 относительно высокий уровень потенциала на коллекторе транзистора  $VT6$  уменьшается на сумму напряжений базы и падения напряжения на резисторе  $R6$ . Стабильность тока транзистора  $VT7$  обеспечивается генератором стабильного тока, собранным на транзисторах  $VT8$  и  $VT9$  (в диодном включении).

IV — выходной каскад. Усилитель напряжения на транзисторе  $VT9$  выполнен по схеме эмиттерного повторителя для усиления мощности. Он также осуществляет увеличение постоянного уровня напряжения на значение, равное напряжению между коллектором и базой. Результирующий сдвиг уровня напряжения на выходе ОУ (вывод 5) равен постоянному напряжению на коллекторе  $VT6$ .

Выходной каскад имеет малое выходное сопротивление, широкую полосу пропускания, большое входное сопротивление. В каче-

стве выходного каскада часто применяют повторители напряжения (эмиттерный или истоковый).

Основные параметры серийных ИМС ОУ следующие:

1) коэффициент усиления  $K_y$  — отношение изменения выходного напряжения  $\Delta U_{\text{вых}}$  к вызвавшему его изменению дифференциального входного напряжения  $\Delta U_{\text{вх}}$ . ИМС ОУ имеют коэффициенты усиления от тысяч до нескольких миллионов;

2) входное сопротивление ОУ. Входное дифференциальное сопротивление биполярных ОУ находится в пределах от 10 кОм до 10 МОм, а синфазное сопротивление составляет более 100 МОм;

3) коэффициент ослабления синфазного сигнала  $K_{\text{ос.сф}}$  — отношение коэффициента усиления дифференциального сигнала  $K_{\text{диф}}$  к коэффициенту усиления синфазного сигнала  $K_{\text{сф}}$ . Обычно  $K_{\text{ос.сф}} = 60 \dots 80$  дБ;

4) выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  — сопротивление, определяемое выходным каскадом и обычно составляющее 100...500 Ом;

5) частота единичного усиления  $f_1$  — частота, на которой ИМС имеет коэффициент усиления  $K = 1$ . Обычно  $f_1 = 1 \dots 10$  МГц;

6) частота среза  $f_{\text{ср}}$  — частота, на которой коэффициент усиления ОУ составляет 0,7 коэффициента усиления  $K$  постоянного напряжения. Обычно  $f_1 = 1 \dots 10$  МГц.

Предельный выходной ток ОУ определяет минимальное сопротивление нагрузки при номинальном выходном напряжении. Для того чтобы избежать выхода ОУ из строя при превышении предельного тока, современные ОУ оснащают узлами защиты. Обычно предельный выходной ток не превышает 25 мА.

Выходное сопротивление ОУ в зависимости от его схемы и назначения находится в пределах от 20 до 2 000 Ом. При наличии узла защиты это значение не оговаривают.

**Серийные ИМС ОУ.** Отечественной промышленностью выпускаются интегральные микросхемы операционных усилителей серий К140, К153, К284, К544, К553, К710, К740. Интегральные микросхемы ОУ позволяют осуществлять до сотни различных схем включения и использовать одну и ту же микросхему для создания усилителей высокой, промежуточной и низкой частот, а также преобразователей, генераторов, детекторов, компараторов, активных фильтров и других устройств.

Микросхемы К140УД1 выпускают двух модификаций: К140УД1А и К140УД1Б.

Усовершенствованные ИМС операционного усилителя К153УД6, выполняемые на основе  $p-n-p$  и  $n-p-n$ -транзисторов, изготовляемых по технологии вакуумной молекулярно-лучевой эпитаксии,

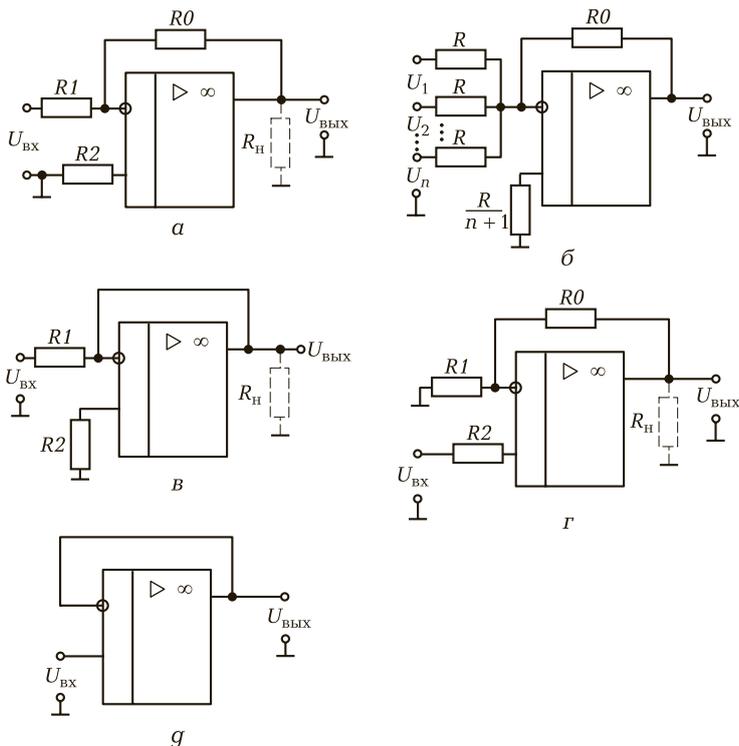
имеют более высокое качество и повышенный коэффициент усиления по току. В этих ИМС создаются высокоомные высокостабильные резисторы, а дифференциальный усилитель на входе собран по каскодной схеме, которая обеспечивает большое входное сопротивление и высокий коэффициент усиления.

Микросхемы серий К544, К553, К710, К740 выполнены по технологии полевых МОП-транзисторов.

## 2.1.8. Усилительные каскады с ИМС ОУ

Общая особенность всех типов усилителей с ИМС ОУ — наличие цепи отрицательной обратной связи с выхода ИМС на ее инвертирующий вход, образованной резисторами.

Схемы включения ИМС ОУ с подачей входного напряжения на разные входы показаны на рис. 2.11.



**Рис. 2.11.** Схемы инвертирующего усилителя (а), сумматора (б), инвертора (в), неинвертирующего усилителя (г) и повторителя (д) с ИМС ОУ

В инвертирующем операционном усилителе напряжение  $U_{\text{вх}}$  подается на отрицательный вход (рис. 2.11, а), из-за чего выходное напряжение будет инвертировано относительно входного. Резисторы  $R_0$ ,  $R_2$ ,  $R_1$  осуществляют в этой схеме параллельную обратную связь по напряжению.

Коэффициент усиления инвертирующего ОУ можно определить, используя еще один признак идеальности ИМС:  $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$ . Из этого условия следует, что на входные выводы ИМС ток не поступает, т. е. через резисторы  $R_1$  и  $R_0$  проходит один и тот же ток  $I_{\text{вх}}$ .

Резистор  $R_0$  находится под напряжением  $U_{\text{вых}}$ , так как на схеме его левый вывод имеет потенциал  $U_0 = 0$ . Тогда с учетом выражения  $I_{\text{с}} = U_{\text{вх}}/R_1$  получим  $U_{\text{вых}} = -I_{\text{с}}R_0 = -U_{\text{вх}}R_0/R_1$ , откуда коэффициент усиления ОУ при инвертирующем включении  $K_{\text{ин}} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = -R_0/R_1$ , т. е.  $K_{\text{ин}}$  определяется отношением сопротивлений резисторов в цепи обратной связи.

Сопротивления в цепях входов ИМС ОУ должны быть равными, т. е. в схеме на рис. 2.11, а сопротивление  $R_1 = R_2$ .

Схема инвертирующего сумматора напряжений показана на рис. 2.11, б.

При подключении к инвертирующему входу ИМС ОУ нескольких резисторов с одинаковыми сопротивлениями  $R$  по ним притекают токи от источников входных сигналов  $U_1, U_2, \dots, U_n$  (где  $n$  — число входных сигналов). Напряжение на выходе суммирующего усилителя:

$$U_{\text{вых}} = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n)R_0/R.$$

Инвертор (рис. 2.11, в) можно получить, выбрав в схеме на рис. 2.11, а сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  равными, при  $R_0 = 0$ .

В неинвертирующем операционном усилителе (см. рис. 2.11, г) сигнал  $U_{\text{вх}}$  поступает на положительный вход, благодаря чему  $U_{\text{вых}}$  синфазно  $U_{\text{вх}}$ . Так как вследствие идеальности ИМС  $U_0 = 0$ , напряжение на резисторе  $R_1$  равно  $U_{\text{вх}}$ , а ток, проходящий через этот резистор,  $I_1 = U_{\text{вх}}/R_1$ .

Полагая, что через входы ИМС ток не проходит вследствие большого ее входного сопротивления, можно считать ток, проходящий через резистор  $R_0$ , равным  $I_1$ . Напряжение на выходе ОУ равно сумме напряжений на резисторах  $R_0$  и  $R_1$ .

С учетом тока  $I_1$ , можно записать

$$U_{\text{вых}} = I_1(R_1 + R_0) = U_{\text{вх}}(R_1 + R_0)/R_1,$$

откуда коэффициент усиления неинвертирующего ОУ

$$K_{\text{неинв}} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = (R_1 + R_0)/R_1 = 1/\chi,$$

где  $\chi = R_1/(R_0 + R_1)$  — коэффициент передачи цепи обратной связи.

Входное сопротивление в таком усилителе велико, так как между входами ИМС приложено напряжение  $U_0 = 0$  и через схему проходит весьма незначительный входной ток, т. е.

$$R_{\text{вх.неинв}} = R_{\text{вых}}(1 + \chi K).$$

Выходное сопротивление ОУ, наоборот, незначительно. Как и в инвертирующем ОУ,

$$R_{\text{вых.неинв}} = R_{\text{вых}}/(1 + \chi K),$$

где  $R_{\text{вых}}$  — выходное сопротивление ИМС.

## 2.1.9. Компараторы на основе ИМС ОУ

**Компаратор** — устройство для сравнения двух аналоговых сигналов: опорного  $U_{\text{оп}}$  и измеряемого, или входного,  $U_{\text{вх}}$ . В момент равенства этих сигналов напряжение на выходе компаратора резко изменяется от напряжения, соответствующего логическому нулю, до напряжения, соответствующего логической единице.

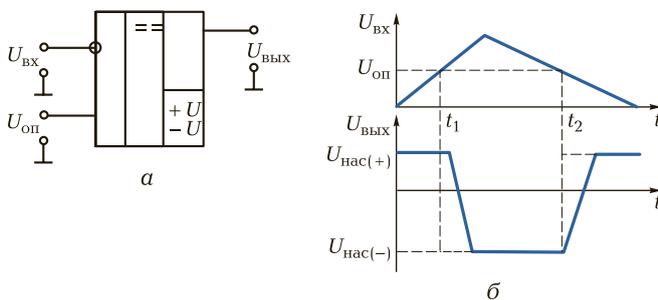
Обычно после компаратора включают цифровой логический элемент или триггер, на вход которого следует подавать напряжения только двух уровней: соответствующие логическому нулю или логической единице, поэтому и напряжения на выходе компаратора должны принимать эти значения.

Наличие двух входов и дифференциального усилителя с большим коэффициентом усиления у ИМС ОУ позволяет построить компаратор на ее основе.

На рис. 2.12 приведено УГО компаратора для сравнения однополярных сигналов, а также эпюры напряжений на его входе и выходе. Полярность выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$  определяется наибольшим из напряжений  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{оп}}$ , т. е.  $U_{\text{вых}} = K(U_{\text{оп}} - U_{\text{вх}})$ .

За счет большого коэффициента усиления  $K$  при отсутствии обратной связи напряжение  $U_{\text{вых}}$  компаратора достигает больших значений и превышает напряжение насыщения микросхемы  $U_{\text{нас}(+)}$  или  $U_{\text{нас}(-)}$  при весьма незначительной разности напряжений  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{оп}}$ .

При нарастании напряжения на входе компаратора до момента времени  $t_1$  (см. рис. 2.12, б)  $U_{\text{оп}} > U_{\text{вх}}$ , т. е. полярность напряжения  $U_{\text{нас}(+)}$  совпадает с полярностью напряжения  $U_{\text{оп}}$  и  $U_{\text{вых}} = U_{\text{нас}(+)}$ . Когда  $U_{\text{вх}}$  станет больше  $U_{\text{оп}}$  (после момента времени  $t_1$ ), полярность  $U_{\text{вых}}$ , определяемая напряжением на инвертирующем входе, будет



**Рис. 2.12.** УГО компаратора (а) и эюры напряжений компаратора (б)

противоположна полярности  $U_{\text{ВХ}}$  (так как вход инвертирован). Следовательно, при весьма незначительном превышении  $U_{\text{ВХ}}$  над  $U_{\text{ОП}}$ , т.е. практически в момент  $t_1$ , напряжение на выходе  $U_{\text{ВЫХ}}$  установится равным напряжению  $U_{\text{нас(-)}}$ .

В момент времени  $t_2$  вновь наступает равенство сигналов  $U_{\text{ВХ}}$  и  $U_{\text{ОП}}$ , вслед за которым  $U_{\text{ВХ}}$  становится меньше  $U_{\text{ОП}}$ , и напряжение на выходе скачком переходит от  $U_{\text{нас(-)}}$  к  $U_{\text{нас(+)}}$ .

Статическая характеристика, показанная пунктиром на рис. 2.12, б, соответствует идеальной, т.е. предполагается, что переключение  $U_{\text{ВЫХ}}$  компаратора происходит мгновенно в моменты  $t_1$  и  $t_2$ , когда  $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ОП}}$ . Сплошной линией на рисунке показана характеристика реального компаратора, у которого переключение начинается с некоторым запаздыванием относительно  $t_1$  и  $t_2$  и длится определенное время.

Если в схеме на рис. 2.12, а опорное напряжение равно нулю, то компаратор переключится при  $U_{\text{ВХ}} = 0$ , т.е. имеет место детектирование нулевого уровня. Соответственно эту схему при  $U_{\text{ОП}} = 0$  называют детектором нулевого уровня.

Для получения на выходе компаратора цифровых уровней, соответствующих логической единице и логическому нулю, в схему вводят ограничитель, состоящий из диодов и резистора.

Специализированные ИМС компараторов позволяют производить сравнение сигналов с высокой точностью (до десятков микровольт) и обладают относительно высоким быстродействием. В структурном отношении они отличаются от ИМС ОУ наличием узла ограничения выходного напряжения на уровнях логических нуля и единицы.

На специализированных ИМС компараторов может быть реализовано сравнение однополярных и разнополярных напряжений аналогично тому, как это делается на ИМС ОУ.

## 2.1.10. Усилители мощности

**Усилители мощности**, используемые в оконечных (выходных) и предоконечных каскадах усилителей, предназначены для обеспечения требуемого уровня тока или напряжения сигнала на заданном сопротивлении нагрузки. Если нагрузка активная (резистор), оконечный каскад должен быть усилителем мощности, а если реактивная (емкость, индуктивность) — усилителем напряжения. В оконечных каскадах используются мощные усилительные элементы с большими рабочими токами и большим потреблением энергии. Следовательно, при проектировании оконечных каскадов необходимо стремиться к достижению высокого КПД, так как чем выше КПД, тем меньше тепловые потери и выше экономичность усилителя.

Ввиду того, что полностью устранить тепловые потери невозможно, необходимо предусматривать в оконечных каскадах усилителей мощности теплоотводы, радиаторы и холодильники.

Особенностью оконечных каскадов является высокий уровень их входных сигналов, в связи с чем параметры усилительных элементов могут резко меняться. Наибольшее усиление по мощности получают при включении транзисторов по схеме с общим эмиттером. Включение транзисторов по схеме с общим коллектором обеспечивает хорошее согласование выходного сопротивления каскада с низкоомной нагрузкой.

**Характеристика оконечных и предоконечных каскадов.** Оконечные каскады разделяют на одноктактные и двухтактные: в первых транзистор работает на линейном участке ВАХ в неэкономичном режиме, а вторые обеспечивают большое усиление по мощности и экономичный режим работы.

По принципу межкаскадных связей различают трансформаторные и бестрансформаторные оконечные каскады. Трансформаторные оконечные каскады более экономичны, но имеют большие массу и габаритные размеры.

Рассмотрим основные принципы работы и характеристики оконечных каскадов, позволяющие выбрать схему и рассчитать их основные параметры. При этом в качестве усилительных элементов примем транзисторы, наиболее широко применяемые в оконечных каскадах.

В связи с тем, что оконечные каскады усиливают переменные напряжения, а входные и выходные цепи содержат индуктивности и емкости, их сопротивления характеризуются комплексными величинами, включающими в себя активную и реактивную состав-

ляющие. Поэтому динамические характеристики иногда разделяют на характеристики постоянного и переменного тока.

Схемы предоконечных и выходных усилительных каскадов на биполярных транзисторах с емкостными связями аналогичны схемам обычных усилительных каскадов, только в них используются более мощные транзисторы. Коллекторный резистор каскада должен быть рассчитан на пропускание больших токов, а конденсаторы иметь емкость в 3—4 раза большую, чем у обычных каскадов.

Входные и выходные характеристики предоконечных и оконечных каскадов определяются так же, как и обычного усилительного каскада. Проходную динамическую характеристику транзистора получают, используя его входные и выходные характеристики. На основе семейства кривых зависимостей  $I_K = f_1(U_{K-Э}, U_{Б-Э})$  строят нагрузочную прямую — зависимость  $I_K = f_2(U_{K-Э})$  и выбирают один из следующих режимов работы транзистора.

**Режим А.** Определяет работу транзистора на линейном участке выходной характеристики. В этом режиме точка покоя (соответствующая нулевому напряжению на входе) находится в центральной части входной характеристики. Следовательно, в транзисторе проходит довольно сильный ток даже в отсутствие сигнала на входе, потери такого усилительного каскада велики.

**Режим В.** В этом режиме точку покоя выбирают при токе покоя транзистора, равном нулю. Линейный участок выходной характеристики используется, только если напряжение на базе относительно эмиттера положительное (для  $n-p-n$ -транзисторов). Точка покоя находится на начальном участке входной характеристики. Следовательно, в этом случае при отсутствии сигнала на входе в транзисторе не проходит ток и КПД усилительного каскада высокий. Недостатком данного режима является нелинейность соответствующей рабочей характеристики, обусловленная тем, что усилитель не работает при отрицательных полупериодах сигнала на входе (т. е. на базе транзистора).

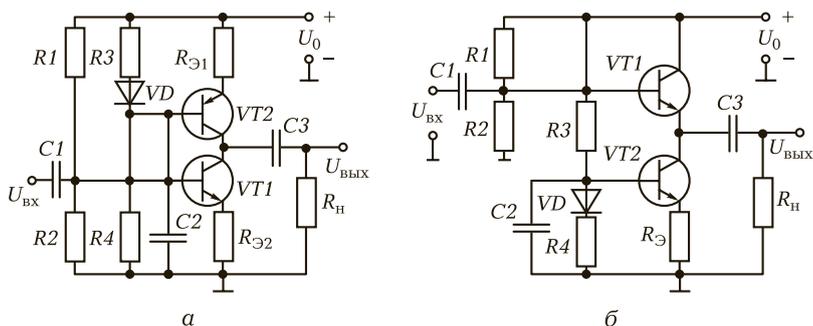
**Режим С.** В этом режиме точку покоя выбирается левее точки  $B$  входной характеристики, т. е. в этом случае ток покоя транзистора должен быть равен нулю даже при небольших положительных напряжениях. Данный режим очень экономичный и используется в мощных звуковых усилителях. Недостатком этого режима является сильная нелинейность соответствующей рабочей характеристики, связанная с тем, что усилитель не работает при отрицательных полупериодах сигнала на входе (на базе транзистора). Сигнал на выходе имеет нечетные гармоники, которые можно устранить избирательными фильтрами на выходе усилительного каскада.

**Однотактные усилительные каскады.** К однотактным относятся обычные транзисторные усилительные каскады, рассмотренные в начале настоящей главы. Это усилители, работающие на линейном участке выходной характеристики, т. е. в режиме А. Поэтому сигналы в них усиливаются без нелинейных искажений. Недостатком таких усилителей является малый КПД; в зависимости от конструкции и режима работы он составляет 5...8%. Такие каскады используются только для предварительного усиления при малой входной мощности сигнала и называются предоконечными каскадами.

При конструировании однотактных предоконечных усилителей стремятся получить как можно более высокие коэффициенты усиления по мощности, току или напряжению, что хорошо обеспечивают каскадные усилители на двух транзисторах. Электрические схемы таких усилителей приведены на рис. 2.13. В этих схемах один из транзисторов  $VT1$  является активным, а второй  $VT2$  — нагрузочным.

Коэффициент усиления таких усилителей определяется коэффициентом усиления по току транзистора  $VT2$ , выходным сопротивлением нагрузочного транзистора и сопротивлением нагрузки. Поскольку две первые из этих величин сравнительно велики, то коэффициент усиления таких усилителей высокий.

В рассматриваемых усилителях имеется отрицательная обратная связь (ООС), возникающая при падении напряжения на резисторе  $R_{Э2} = 200$  Ом. Это обеспечивает увеличение их выходного сопротивления, расширение динамического диапазона и полосы пропускания. Установка рабочей точки транзистора  $VT1$  и режима работы А осуществляется подбором резистивного мостика  $R_1 = 50$  кОм,



**Рис. 2.13.** Электрические схемы однотактных предоконечных усилителей:

а — с нагрузочным транзистором и общим эмиттером; б — с общим коллектором

$R_2 = 10$  кОм. Стабилизация работы нагрузочного транзистора обеспечивается резисторами  $R_3 = 50$  кОм,  $R_4 = 10$  кОм,  $R_{Э2}$  и диодом  $VD$ .

Следует отметить, что все однотактные предоконечные усилители могут иметь большие рабочие токи, при этом на их активных усилительных элементах и резисторах будут выделяться большие рассеиваемые мощности. При перегреве сопротивление транзистора падает и при обратном напряжении может быть пробой. Средняя рассеиваемая мощность  $P_{\text{рас}} \approx 1,5P_{\text{вых}}$ . Для устранения перегрева транзисторы снабжаются алюминиевыми или медными радиаторами с большой поверхностью, которые передают рассеиваемую мощность в результате конвекции в окружающую воздушную среду внутри корпуса используемой аппаратуры. Корпус аппаратуры имеет специальные щели для обеспечения естественной вентиляции, в нем также дополнительно устанавливаются вентиляторы.

**Двухтактные усилительные каскады.** Двухтактными называются каскады, содержащие два усилительных элемента, работающих на общую нагрузку, выходные токи которых сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ .

Усилительные элементы (обычно транзисторы, работающие в режиме  $B$  или  $C$ ), каждый со своими электрическими цепями, образуют две ветви двухтактного усилительного каскада.

Различают три вида двухтактных транзисторных каскадов.

1) каскады с параллельным управлением однофазным входным напряжением. В таких усилительных каскадах входной сигнал подается в одной фазе сразу на обе ветви схемы от одного источника. При этом в ветвях используются транзисторы разного типа: в одной  $n-p-n$ , а в другой  $p-n-p$  (комплементарная пара), которые работают поочередно в полупериодах сигнала с разной полярностью;

2) каскады с параллельным управлением противофазным напряжением обеих ветвей от одного источника сигналов. В таких каскадах используются однотипные транзисторы в разных ветвях и фазоинвертирующие электрические  $RLC$ -цепи или трехточечные трансформаторы для смещения фаз работы транзисторов на  $180^\circ$ ;

3) каскады с последовательным управлением однофазным входным напряжением. В этих каскадах используются два транзистора с одинаковым типом проводимости, работающие в режиме  $A$ . Напряжение от источника сигналов подается на вход транзистора первой ведущей ветви, с выхода которой усиленный сигнал затем поступает на вход транзистора второй ведомой ветви.

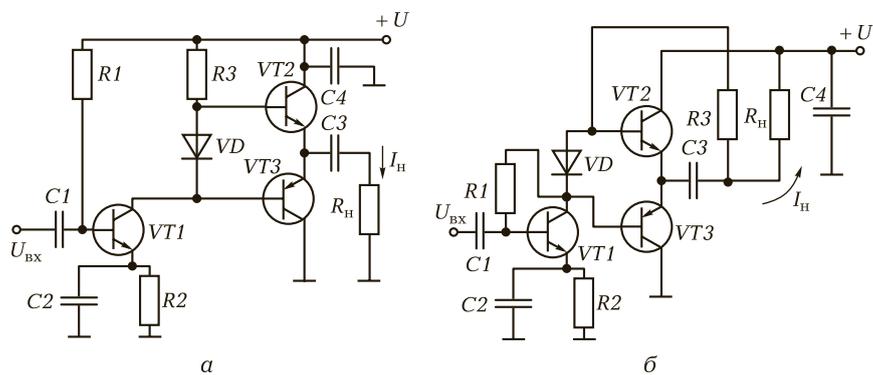
**Двухтактные бестрансформаторные выходные каскады.** Поскольку трансформаторы имеют большую массу, габаритные размеры и в них теряется часть мощности сигнала, широкое распространение получили более экономичные и малогабаритные двухтактные бестрансформаторные выходные каскады, которые могут реализовываться и по интегральной технологии в виде микросхем.

Двухтактные бестрансформаторные выходные каскады на комбинированных транзисторных парах ( $n-p-n$ - и  $p-n-p$ -типа) хорошо согласуют выходные сопротивления предыдущих каскадов с входными сопротивлениями мощных выходных транзисторов, работающих в экономичном режиме на низкоомную нагрузку.

Простая схема выходного каскада на комплементарной паре транзисторов  $VT2$  и  $VT3$  приведена на рис. 2.14, а. Здесь на транзисторе  $VT1$  собран предоконечный каскад по схеме усилителя с нагрузкой  $R3$ . Напряжение смещения на  $VT1$  подается через резистор  $R1$ . Транзисторы  $VT2$  и  $VT3$  по постоянному току соединены последовательно, и напряжение между ними делится примерно поровну:  $U_{K1} = U_{K2} = U/2$ . Нагрузка  $R_n$  подключена через конденсатор большой емкости  $C3$ . Смещение на базах выходных транзисторов мало, и они работают в режиме  $B$ .

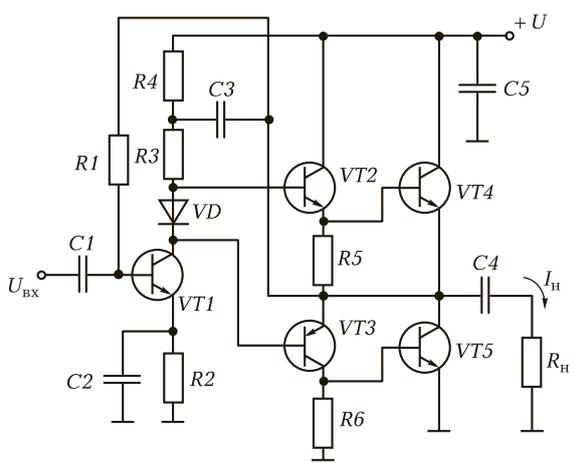
Диод  $VD$  обеспечивает температурную стабилизацию токов покоя транзисторов. При появлении на выходе транзистора  $VT1$  переменного напряжения с положительным полупериодом открывается транзистор  $VT2$  ( $n-p-n$ -типа) и подзаряжается конденсатор  $C3$ . В следующий полупериод (отрицательной полярности) закрывается транзистор  $VT2$  и открывается транзистор  $VT3$ , через который разряжается конденсатор  $C3$ . Таким образом, оба транзистора по переменному току работают параллельно и имеют малое выходное сопротивление, хорошо согласованное с низкоомной нагрузкой. Высокий КПД усилителя обусловлен работой транзисторов  $VT2$  и  $VT3$  в режиме  $B$ .

Недостатком приведенной схемы является низкое выходное напряжение на нагрузке  $R_n$ , так как  $U_{\text{вых}}$  предоконечного каскада равно примерно  $(0,2 \dots 0,3)U$ . Для повышения выходного напряжения применяют схему, приведенную на рис. 2.14, б, в которой нагрузка подключена к положительному полюсу источника напряжения, а резистор  $R3$  — к нагрузке и конденсатору  $C3$ . В момент перезарядки конденсатора напряжение питания транзистора  $VT1$  повышается до  $1,5U$  и выходное напряжение (управляющее) достигает  $0,5U$ . Одновременно повышаются выходное напряжение усилителя и его КПД.



**Рис. 2.14.** Схемы бестрансформаторных выходных каскадов на комплементарных парах: простая (а) и с повышением выходного напряжения (б)

В схемах бестрансформаторных усилителей большой мощности трудно подобрать комплементарную пару мощных транзисторов с одинаковыми параметрами. Эта проблема решается путем применения в ветвях двухтактной комплементарной пары составных транзисторов (рис. 2.15). В этой схеме к выходным мощным транзисторам  $VT4$  и  $VT5$  с одинаковой проводимостью подключаются управляющие маломощные транзисторы  $VT2$  и  $VT3$  с близкими параметрами, представляющие собой комплементарную пару. Через  $C3$  параллельно нагрузке подключается резистор  $R4$  для повы-



**Рис. 2.15.** Бестрансформаторная схема мощного выходного усилителя на комплементарной паре с составными транзисторами

шения стабильности режима работы выходных транзисторов при изменении сопротивления нагрузки  $R_n$ . Следовательно, даже при обрыве цепи нагрузки транзисторы будут иметь нагрузку в виде резистора  $R_4$ .

В настоящее время бестрансформаторные схемы на комплементарных парах наиболее предпочтительны благодаря меньшим габаритным размерам и лучшим качественным показателям. Их также легче реализовать в микросхемах усилителей.

В настоящее время аналоговые усилители и устройства реализуются в виде универсальных микросхем широкого применения и имеют большую номенклатуру. Выпускаются также и микросхемы мощных звуковых усилителей с комплементарными парами на радиаторе.

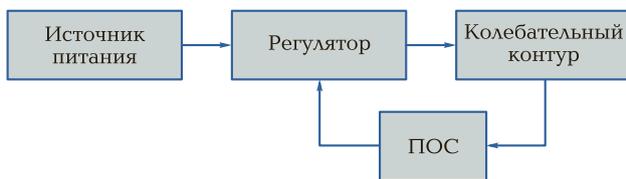
## 2.2. ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

### 2.2.1. Принципы автогенерации

**Автогенератор** — устройство, преобразующее энергию постоянного тока в переменное напряжение высокой частоты без подведения к нему переменного напряжения извне.

Рассмотрим сначала генераторы гармонических колебаний, в которых частота колебаний задается с помощью колебательного контура. Их также называют генераторами синусоидальных колебаний.

Известно, что при подключении колебательного контура к источнику питания в нем возникают электрические колебания, которые с течением времени затухают вследствие наличия потерь, как в самом контуре, так и в нагрузке, подключенной к нему. Для поддержания колебаний, т. е. для превращения их в незатухающие, необходимо пополнять запас энергии в колебательном контуре, периодически подключая его к источнику питания. Следовательно, в состав автогенератора кроме колебательного контура должны входить источник энергии и элемент, управляющий ее поступлением в контур, который называют регулятором. Регулятор должен быть согласован по амплитуде, фазе и частоте колебаний с колебаниями контура, т. е. должен им управляться. Механизм такого управления будем называть обратной связью, которая в этом случае должна быть положительной. Структурная схема автогенератора приведена на рис. 2.16.



**Рис. 2.16.** Структурная схема автогенератора:

ПОС — положительная обратная связь

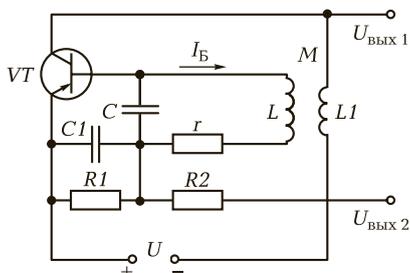
Обычно в качестве регулятора используются электронные лампы и транзисторы.

## 2.2.2. Транзисторный генератор гармонических колебаний

Электрическая схема автогенератора на транзисторе приведена на рис. 2.17.

Транзистор  $VT$  включен по схеме с общим эмиттером. В его коллекторную цепь включена катушка индуктивности  $L1$ , имеющая трансформаторную связь с катушкой  $L$ , которая подсоединена к базе и через конденсатор  $C1$  — к эмиттеру. Резонансный колебательный контур состоит из катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$ . На схеме внутреннее сопротивление контура обозначено эквивалентным резистором  $r$ . Резисторы  $R1$  и  $R2$  служат для развязки генератора и балансировки выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}2}$ .

Колебания напряжения в резонансном  $LC$ -контуре приводят к колебаниям тока базы  $I_B$  и изменению тока коллектора в катушке  $L1$ , которые наводят индукционные токи в катушке  $L$  резонансного контура. Таким образом, обратная связь резонансного контура с регулятором осуществляется с помощью трансформаторной связи. Если колебания в резонансном контуре и катушке связи  $L1$  совпадают по фазе, то возникает положительная ОС регулятора



**Рис. 2.17.** Электрическая схема автогенератора на транзисторе

(транзистора) и резонансного колебательного контура, а следовательно, и резонансная генерация синусоидального напряжения.

Изменения тока базы, связанные с колебаниями контура, приводят к изменениям коллекторного тока, которые, в свою очередь, наводят ЭДС индукции в первичной цепи трансформатора. Если колебания в резонансном контуре и катушке связи  $L1$  происходят в соответствующей фазе, то в автогенераторе поддерживаются периодические колебания.

Колебания в резонансном  $LC$ -контуре можно описать дифференциальным уравнением второго порядка, решение которого имеет следующий вид:

$$U(t) = U_0 e^{-\delta t} \sin \omega_0 t; \delta = (2\alpha \pm \omega_0^2 M S_0 / 2),$$

где  $U_0$  — напряжение питания;  $\omega_0$  — резонансная частота;  $t$  — время;  $\delta$  — декремент автоколебаний;  $\alpha$  — коэффициент диссипации (рассеяния энергии),  $\alpha = r / (2L)$ ;  $M$  — коэффициент трансформаторной связи;  $S_0$  — крутизна характеристики транзистора.

Величины  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $M$ ,  $S_0$  определяют три вида возможных колебаний:

- 1) при  $\delta > 0$  колебания автогенератора быстро затухают;
- 2) при  $\delta = 0$  колебания в автогенераторе незатухающие;
- 3) при  $\delta < 0$  колебания в автогенераторе нарастают.

Условие самовозбуждения генератора следующее:

$$M S_0 / r < C \text{ или } M S_0 / r - C = r + r_- < 0,$$

где  $r_- = -M S_0 / C$  — условно введенное отрицательное сопротивление.

Отрицательное сопротивление появляется благодаря положительной ОС в колебательном  $LC$ -контуре. При этом если результирующее сопротивление в колебательном контуре отрицательное, то оно не поглощает, а выделяет энергию, т. е. при этом возникают колебания.

**Стационарный режим работы автогенератора.** В режиме самовозбуждения амплитуда колебаний напряжения на выходе генератора должна неограниченно возрастать, однако в реальных схемах она достигает некоторого уровня и в дальнейшем не меняется. Это объясняется тем, что усредненная крутизна характеристики транзистора уменьшается с ростом амплитуды напряжения базы.

**Режим самовозбуждения автогенератора.** Для изучения режима самовозбуждения автогенератора рассмотрим две характеристики: зависимость выходного тока (тока колебательного контура) от входного напряжения транзистора и зависимость входного напряжения

транзистора от тока колебательного контура, т. е. глубину обратной связи. При использовании лишь 1-й гармоники тока в колебательном контуре зависимость амплитуды выходного тока от напряжения на входе транзистора называют колебательной характеристикой.

На рис. 2.18 показаны три схемы автогенераторов синусоидальных колебаний: на биполярном транзисторе, полевом транзисторе и электронной лампе.

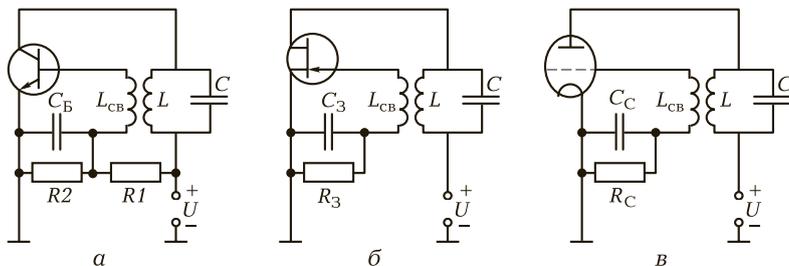
Амплитуда входного напряжения транзистора пропорциональна току в колебательном контуре или амплитуде 1-й гармоники, т. е. зависимость напряжения от тока линейная:  $U_{вх} = \omega MI_{max1}$ .

Отсюда можно найти и обратную зависимость:  $I_{max1} = U_{вх}/(\omega M)$ .

Эта зависимость, изображенная графически, называется линией обратной связи.

Таким образом, имеем две зависимости амплитуды 1-й гармоники тока в колебательном контуре от входного напряжения транзистора, одна из которых определяется без учета ОС, а другая определяется ОС. На практике встречаются два режима возбуждения автогенератора.

1. Амплитуда 1-й гармоники тока в колебательном контуре больше значения, определяемого положительной ОС при одном и том же значении входного напряжения. Следовательно, напряжение на входе транзистора будет возрастать и соответственно будет возрастать ток коллектора. Если входное напряжение транзистора станет больше предельного, то крутизна его характеристики уменьшится, амплитуда колебаний генератора окажется меньше значения, необходимого для поддержания напряжения  $U_{вх}$  на базе транзистора с помощью ОС, и оно начнет падать. В некоторый момент времени опять начнется рост напряжения, и генератор автоматически найдет точку устойчивого равновесия. Этот режим возбуждения автогенератора называют мягким. Подбором коэффициента трансфор-



**Рис. 2.18.** Схемы автогенераторов на биполярном (а) и полевом (б) транзисторах и на электронной лампе (в)

маторной связи  $M$  можно регулировать амплитуду генерируемых колебаний без внешнего воздействия на автогенератор.

2. При напряжениях  $U_{\text{вх}}$  меньше порогового значения  $U_1$  колебания могут затухать. Однако при  $U_{\text{вх}} > U_1$  колебания нарастают и достигают максимальной амплитуды при  $U_{\text{max}}$ . В этом режиме, называемом жестким, необходимо наличие начального внешнего возбуждения автогенератора — толчка. Можно также изменять условия возбуждения генератора с помощью коэффициента трансформаторной связи  $M$ . Генерация колебаний в этом случае возникает при критическом значении  $M_{\text{кр}1}$ , когда связь достаточно сильна.

Если коэффициент связи уменьшится ( $M < M_{\text{кр}1}$ ), автогенератор будет работать устойчиво до значения  $M_{\text{кр}2}$ , при котором происходит снижение амплитуды колебаний генератора и срыв процесса генерации. Для обеспечения мягкого режима возникновения генерации колебаний используется цепь  $C_B R_2$  в схеме на биполярном транзисторе и цепочка  $C3, R3$  в схеме на полевом транзисторе (см. рис. 2.18, б).

Конкретные схемы автогенераторов (в том числе мощных) приведены в специальной литературе по радиоэлектронике.

### 2.2.3. Кварцевые резонаторы

Для повышения стабильности частоты генераторов в качестве колебательного контура используют кварцевые пластины. Смещение частоты хорошего колебательного контура с термокомпенсацией составляет  $(0,5 \dots 1) \cdot 10^{-4}$ , а кварцевого —  $10^{-7} \dots 10^{-6}$ .

Кварцевые пластины вырезают из монокристалла кварца под определенным углом к его оптическим осям. Кварцевая пластинка, введенная в кварцедержатель, замыкает электрическую цепь переменного тока, так как обладает пьезоэлектрическим эффектом: электрические колебания преобразуются в ней в механические, и наоборот. Эквивалентная электрическая схема кварцевой пластины может быть представлена  $LRC$ -контуром. Она имеет значения  $L, R, C$ , которые определяются геометрическими размерами кварцевой пластины и типом механических (продольных и поперечных) колебаний. Кварцы имеют две резонансные частоты: последовательного резонанса  $f_{01}$  и параллельного резонанса  $f_{02}$ . Добротность кварца  $Q = 500 \dots 10\,000$  превышает добротность обычного контура на три порядка.

Кварцевые резонаторы получили широкое распространение в самой разнообразной электронной технике. Они серийно выпу-

скаются промышленностью в герметизированном и вакуумном исполнениях, пластмассовых, стеклянных и керамических корпусах, с частотами от десятков килогерц до сотен мегагерц. При этом лазерной подгонкой добиваются высокой точности выполнения заданной частоты, например для часов.

Кварцевые резонаторы используются в качестве тактовых генераторов в часах, компьютерах и бытовой технике. Также они применяются в радиотехнике в качестве резонаторов, стабилизаторов частоты, фильтров, телевизионных приемниках, измерительных приборах и других устройствах.

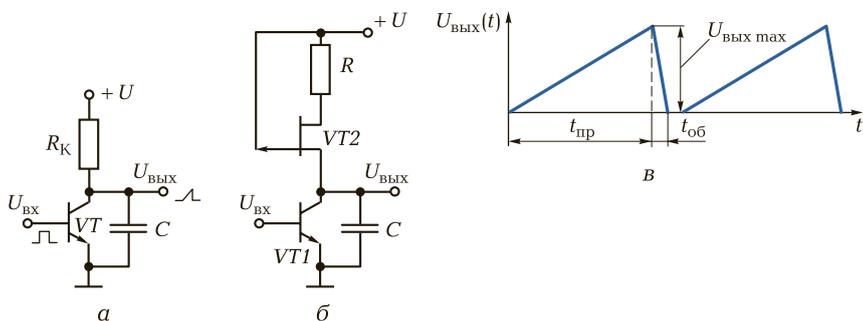
## 2.2.4. Генераторы линейно изменяющихся напряжений

Генераторы линейно изменяющихся напряжений (ГЛИН), или генераторы пилообразных напряжений, предназначены для формирования импульсов симметричного или несимметричного вида. Симметричное линейно изменяющееся напряжение используется в радиовысотомерах, а несимметричное — в развертках осциллографов и электронно-лучевых трубках. Линейно изменяющуюся, как правило, более пологую (более продолжительную) часть импульса принято называть прямым (рабочим) ходом с временем  $t_{sr}$ , а его короткую часть — обратным ходом (стадией восстановления) с длительностью  $t_{обр}$ . Амплитуда пилообразного импульса  $U_{вых\ max}$  определяется разностью напряжений в начале и конце его прямого хода.

Соотношения длительностей прямого и обратного ходов импульса могут быть самыми разными. Формы импульсов также могут быть разными, т. е. представлять собой сложные геометрические фигуры (например, трапецию) с разной полярностью. Рассмотрим наиболее широко распространенные генераторы пилообразного напряжения, с помощью которых можно получить трапециевидные импульсы, применяя диодные схемы ограничителей.

Получить линейно изменяющееся напряжение можно на обкладках конденсатора, заряжающегося через большое сопротивление, например на интегрирующей цепи, на которую подано постоянное напряжение.

Схема формирователя линейно нарастающего напряжения на основе инвертора и конденсатора  $C$ , заряжающегося через резистор  $R_K$  от напряжения источника питания  $U_{п}$  до напряжения  $U_{вых\ max}$  с относительно большой постоянной времени  $\theta = R_K C$  приведена на рис. 2.19, а. При открытом транзисторе конденсатор  $C$  разряжен



**Рис. 2.19.** Схема простейшего ГЛИН (а), схема генератора с токостабилизирующим полевым транзистором (б) и эпюры их напряжений (в)

практически до нуля. После закрытия транзистора конденсатор начинает медленно заряжаться через резистор  $R_K$ . При этом сначала напряжение на обкладках конденсатора нарастает по линейному закону, но по мере его насыщения рост напряжения замедляется и начинает больше соответствовать нелинейной экспоненциальной зависимости от времени.

Если на вход формирователя поступают последовательно положительные импульсы с большой скважностью, то каждый импульс, открывая транзистор и разряжая конденсатор, будет формировать обратный ход. При этом в промежутках между импульсами будет формироваться линейно нарастающее напряжение.

Для создания линейной зависимости нарастания напряжения постоянная времени заряда конденсатора должна быть довольно большой, поэтому для этого, как правило, используют электролитический конденсатор большой емкости (10...20 мкФ) и резистор с сопротивлением 5...10 кОм.

Нелинейность изменения напряжения на конденсаторе является главным недостатком подобных формирователей. Для устранения нелинейности применяют различные методы. В частности, используют только ограниченный начальный участок времени заряда конденсатора, нелинейное усиление сигнала или электронный интегратор на основе операционного усилителя. Однако в случаях, когда не предъявляются высокие требования к линейности изменения напряжения, используют простые схемы ГЛИН.

Кроме временных характеристик к основным параметрам ГЛИН относятся коэффициент использования напряжения питания  $K_{и} = U_{\text{ВЫХ max}}/U$  и коэффициент нелинейности  $K_{нл}$ . Обычно  $K_{и} < 1$ , и его всегда стремятся увеличить. К высокоточным относятся ГЛИН

с  $K_{нл} < 1\%$ . При  $K_{нл}$  от 1 до 10% считают, что ГЛИН имеет среднюю линейность, а при  $K_{нл} > 10\%$  — низкую.

В схеме простейшего ГЛИН, представленной на рис. 2.19, а, содержится интегрирующая  $RC$ -цепь ( $R_K C$ ), работающая при формировании прямого хода. Из анализа интегрирующих  $RC$ -цепей следует, что при  $U_{вых} \ll U$  скорость нарастания напряжения максимальна и почти постоянна, а  $K_{нл} \rightarrow 0$ . Таким образом, можно заключить, что использовать рассматриваемый вариант ГЛИН желательно лишь при небольших значениях времени прямого хода  $t_{пр}$ , т. е. при  $t_{пр} \ll R_K C$ . Время обратного хода  $t_{обр}$  определяется внутренним сопротивлением  $R_c$  открытого транзистора ( $t_{обр} \approx C \cdot R_c$ ).

Из анализа данной схемы следует также, что в ГЛИН необходимо осуществлять стабилизацию тока заряда, т. е. снижать зависимость  $I(t) = (U - U_{вых(t)})/R_K$ . В качестве стабилизаторов тока можно использовать биполярные и полевые транзисторы, работающие на пологих участках ВАХ.

Стабилизация тока осуществляется тем лучше, чем больше дифференциальное сопротивление токостабилизирующего элемента (в данной схеме резистора цепи заряда конденсатора  $R_K$ ).

Схема ГЛИН с токостабилизирующим полевым транзистором приведена на рис. 2.19, б. Полевой транзистор здесь включен последовательно с резистором  $R$  и создает эквивалентное сопротивление  $R_3 = R_c(1 + SR)$ , где  $S$  — крутизна его характеристики. На практике удается получить  $R_3 = 11,5$  МОм с хорошей стабилизацией тока. Такой ГЛИН прост и экономичен, поэтому применяется довольно часто, когда допустим  $K_{нл} = 1 \dots 2\%$ .

В заключение следует отметить, что элементы импульсной техники получили наибольшее распространение в импульсных логических и цифровых устройствах, вычислительной технике и системах передачи информации.

## 2.3. ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА

В настоящее время в электронике широко используются импульсные устройства как для обеспечения работы специальных устройств электронной техники, так и в цифровой электронике. В импульсной электронике применяют электронные ключи — устройства, резко изменяющие внутреннее сопротивление под воздействием управляющего сигнала, и импульсные генераторы, формирующие потоки импульсов.

## 2.3.1. Представление информации в импульсном цифровом виде

Цифровые логические и арифметические устройства оперируют с импульсами напряжения, воспринимая положительное напряжение как логическую единицу (1), а отсутствие напряжения — как логический ноль (0). Ввиду наличия в цепях наводок и колебаний напряжения важно определить, какому уровню напряжения соответствуют логические 0 и 1. Критерием для принятия решения является пороговое напряжение  $U_{\text{пор}}$ , если уровень напряжения  $U$  выше порогового, то оно воспринимается как 1, если  $U < U_{\text{пор}}$ , то оно воспринимается как 0. Сигнал, имеющий два уровня (0 и 1), называется цифровым. Для транзисторно-транзисторных логических элементов  $U_{\text{пор}} = 2 \text{ В}$ ,  $U_0 = (0 \pm 2) \text{ В}$ ,  $U_1 = (5 \pm 2) \text{ В}$ .

Целое положительное число  $N$  можно представить в следующем двоичном виде:

$$N = a_{n-1}2^{n-1} + s + a_i2^i + s + a_12^1 + a_02^0,$$

где  $i$  — номер разряда;  $a_i$  — коэффициенты, принимающие значения логического 0 или 1;  $n$  — высший разряд.

Запишем число 5 в десятичном и двоичном виде:  $N_{10} = 5$ ;  $N_2 = 101$ .

Таким образом, для записи числа 5 в двоичной системе потребовалось три разряда. Всего в трехразрядном коде можно записать восемь чисел от 0 до 7. Цифровые трехразрядные двоичные коды, соответствующие десятичным числам, приведены в таблице.

**Соответствие десятичных чисел двоичным**

$N_{10}$	0	1	2	3	4	5	6	7
$N_2$	000	001	010	011	100	101	110	111

Если нужно записать число 8, то необходим четвертый разряд. В двоичной форме число 8 будет 1000, число 9 — 1001, 10 — 1010 и т.д.

Для отображения двоичных чисел необходим набор устройств, имеющих два значения 0 или 1. Такими устройствами являются логические элементы и триггеры, рассмотренные далее в гл. 3. С помощью логических элементов можно осуществлять логические и математические операции над двоичными числами. Триггеры являются бистабильными элементами, сохраняющими двоичные

коды. Устройство для выражения числа  $N$  в двоичном виде, состоящее из триггеров, называется **регистром**. Информация в регистре, построенном на триггерах, может храниться сколь угодно долго, т. е. регистр является элементом памяти (устройством хранения информации).

Представление информации в двоичных цифровых кодах используется в микропроцессорной технике и цифровых ЭВМ для проведения логических и арифметических операций. Передача информации в двоичных кодах повышает помехоустойчивость каналов связи и потому используется в спутниковых, сотовых, радиорелейных и волоконно-оптических системах связи.

В настоящее время в импульсных и цифровых устройствах часто используются очень короткие импульсы близкие к прямоугольным. У таких импульсов возникают отклонения от прямоугольной формы, связанные с влиянием индуктивностей и емкостей соединительных цепей. Обычно форма одиночного импульса хорошо просматривается на экране осциллографа.

Прямоугольные импульсы характеризуют следующими параметрами:  $U_{\max}$  — амплитуда импульса,  $\Delta U_m \approx 0,1U_{\max}$  — спад вершины импульса,  $\tau$  — длительность импульса,  $\tau_f$  — длительность фронта,  $\tau_c$  — длительность среза.

**Амплитудой импульса** называют максимальное отклонение импульса или тока от начального уровня.

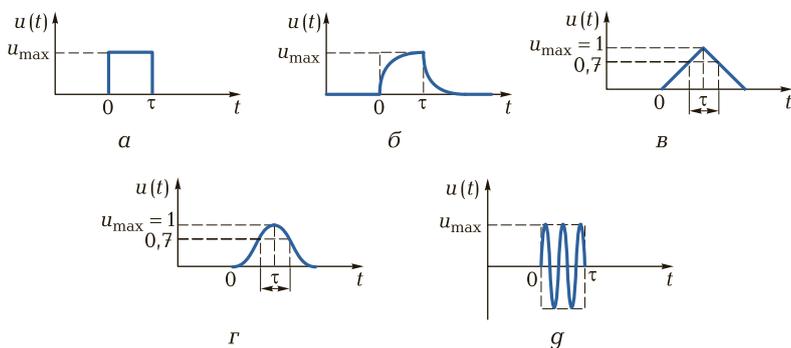
**Длительность импульса** измеряется, как правило, по уровню 0,7 от значения амплитуды.

**Длительность переходного процесса** (длительность фронта импульса) измеряют от 0 до достижения  $0,9U_{\max}$ .

**Длительность среза** импульса измеряют от начала спада до достижения  $0,1U_{\max}$ .

Чем выше быстродействие импульсных устройств, тем меньше длительности фронта и среза, а форма импульса ближе к прямоугольной. Обычно длительности фронта и среза составляют несколько процентов от длительности импульса. Иногда форму фронта (или среза) импульса характеризуют кругизной фронта (среза), т. е. отношением амплитуды к длительности фронта или среза. Спад напряжения на вершине импульса характеризуют коэффициентом спада:  $K_c = \Delta U_m / U_{\max}$ . Коэффициент спада импульса обычно не превышает 0,01 и характеризует качество формирующей импульсной системы.

В импульсных и цифровых электронных устройствах циркулируют электрические импульсы различной формы. В связи с их широким использованием рассмотрим их подробнее.



**Рис. 2.20.** Формы импульсов, используемых в электронной технике:  
 а — прямоугольный; б — экспоненциальный; в — треугольный; г — колоколообразный; д — радиоимпульс

**Импульс** (электрический импульс напряжения или тока) — это изменение тока или напряжения, отличающееся от постоянного значения в течение некоторого промежутка времени.

Изменение тока или напряжения или тока от времени в течение импульса можно просмотреть на осциллографе. Формы импульсов могут быть разными (рис. 2.20).

**Радиоимпульсы** — кратковременные импульсы синусоидально-го изменения напряжения или тока радиочастотного диапазона.

**Видеоимпульсы** — кратковременные изменения напряжения или тока от нулевого значения в положительную или отрицательную сторону.

Одиночные импульсы используются редко. Как правило, в радиотехнике и электронике используются непрерывные последовательности импульсов или последовательность импульсов, следующих по определенному закону.

**Импульсные устройства** — это устройства, предназначенные для формирования (генерирования) электрических импульсов, их усиления и преобразования.

К импульсным устройствам относятся генераторы одиночных импульсов различной формы и импульсных последовательностей; усилители по напряжению, току и мощности; преобразователи; инверторы; умножители и делители частоты импульсов; модуляторы; коммутирующие ключи.

Наиболее часто в радиотехнике и цифровых вычислительных устройствах используются прямоугольные импульсы. Такие импульсы формируются с помощью ключевых схем, триггеров и логиче-

ских элементов, которые будут рассмотрены далее. В схемах развертки осциллографов и электронно-лучевых индикаторов часто используют импульсы линейно нарастающего напряжения.

### 2.3.2. Электронные ключи

Термин «ключ» широко используется в автоматике и радиотехнике: в автоматике — для обозначения многоконтактного ручного переключателя, а в радиотехнике — для обозначения радиоключа, предназначенного для импульсной передачи сообщений азбукой Морзе. Основное назначение электронного ключа — осуществлять операции включения и выключения (в англоязычной технической терминологии — On и Off).

В настоящее время в импульсных устройствах применяют электронные ключи — устройства, резко изменяющие внутреннее сопротивление под воздействием управляющего сигнала. Электронные ключи на электронных лампах, транзисторах, оптронах и логических элементах получили широкое распространение. Они используются для включения и отключения различных цепей и устройств, источников питания, нагрузки, высокого и низкого напряжений, слабых и сильных токов.

С развитием импульсных цифровых устройств под термином «ключ» стали понимать элемент, работающий по принципу да—нет (замкнуто—разомкнуто). Такие ключи строятся на основе цифровых логических элементов.

Рассмотрим особенности работы различных электронных ключей.

**Диодные ключи.** Строятся на основе ламповых или полупроводниковых диодов с применением последовательной и параллельной схем. Полупроводниковый диод пропускает ток только в одном направлении (от плюса к минусу, см. гл. 4 — выпрямители). Переход ключа из выключенного положения в включенное происходит при  $U_{вх} > U_0$ . Изменяя напряжение смещения  $U_0$ , можно менять момент включения и выключения ключа.

Когда диод открыт, ключ включен, напряжение на выходе практически равно напряжению на входе диода, так как прямое сопротивление диода очень мало (значительно меньше сопротивления нагрузки). Наоборот, когда диод закрыт (заперт), ключ разомкнут и напряжение на выходе равно напряжению смещения  $U_0$ .

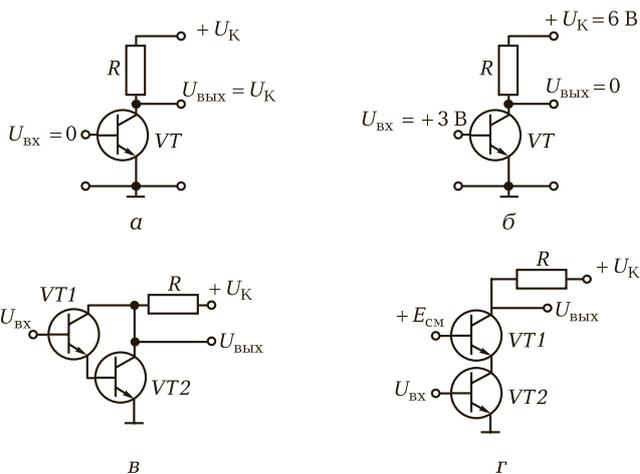
При прохождении через ключ коротких импульсов с крутыми фронтами большую роль играют паразитные емкости диода  $C_A$  и нагрузки  $C_H$  (включающей в себя емкость монтажных проводни-

ков). Чем больше емкость нагрузки, тем больше время ее заряда и разряда, т. е. тем больше длительность переходных процессов установления напряжения при коммутации ключа и меньше его быстродействие.

**Транзисторные ключи.** Транзисторным электронным ключом называется устройство, имеющее два состояния: открыто—закрыто (пропускает ток и не пропускает ток). Схемы включения  $n-p-n$ -транзисторов в ключевых каскадах такие же, как и схемы включения их в усилительных каскадах: с общим эмиттером, общей базой, общим коллектором. Наиболее часто применяют ключевые каскады с общим эмиттером и внешним источником напряжения смещения, подаваемого на базу, который задает порог срабатывания каскада.

В импульсных цепях необходимо лишь переводить транзистор из закрытого состояния (режим отсечки) в значимо открытое состояние (режим насыщения). Осуществляется это подачей соответствующего напряжения на базу. При достаточном напряжении на базе транзистор полностью открывается и переходит в насыщенное состояние.

**Режимы отсечки и насыщения.** Рассмотрим схему транзисторного усилительного каскада в режимах отсечки и насыщения. Транзистор находится в состоянии отсечки (рис. 2.21, а), когда перестает проводить ток, т. е. когда  $U_B = 0$ , а значит, и ток  $I_{\Sigma} = 0$ . При



**Рис. 2.21.** Схемы ключевого каскада на  $n-p-n$ -транзисторе в режимах отсечки (а) и насыщения (б) и составные транзисторы, выполненные по схеме Дарлингтона (в) и каскадной схеме (г)

этом падение напряжения на резисторе  $R$  отсутствует и, следовательно, напряжение на коллекторе равно напряжению питания  $U_E$ . Таким образом, напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{К-Э} = U_K - U_Э$  также равно напряжению питания  $U_E$  (см. рис. 1.5).

Транзистор находится в состоянии насыщения (рис. 2.21, б), когда пропускаемый им ток настолько велик, что дальнейшее его увеличение невозможно, т. е. когда  $I_Э$  и  $I_K$  достигают своих максимальных значений. При большом токе  $I_Э$  увеличивается падение напряжения на коллекторном резисторе  $R$ , что приводит к уменьшению напряжения на коллекторе относительно  $U_E$ , т. е. при увеличении тока транзистора значения напряжений на эмиттере и коллекторе сближаются. В состоянии насыщения, когда ток транзистора максимален, напряжения  $U_K$  и  $U_Э$  становятся практически одинаковыми, т. е.  $U_{К-Э}$  практически равно нулю.

Таким образом, транзистор можно использовать в качестве ключа с двумя состояниями:

- разомкнут ( $U_{вх} = 0$ ) — состояние отсечки ( $U_{вых} = 6$  В);
- замкнут ( $U_{вх} = 3$  В) — состояние насыщения ( $U_{вых} = 0$ ).

**Транзисторные ключевые каскады в импульсных цепях.** При работе транзистора в ключевых каскадах важно качество воспроизведения фронтов импульсов, для улучшения которого необходимо обеспечить быстроедействие транзистора, зависящее в основном от паразитных емкостей  $p-n$ -переходов. Для расчетов ключевых каскадов с высоким быстроедействием используют динамическую модель транзистора с учетом емкостей  $p-n$ -переходов и выходных цепей. Ускорить переходный процесс можно путем уменьшения нагрузочного сопротивления. Ключевой каскад с уменьшенным фронтом импульса получают путем введения нелинейной отрицательной обратной связи между коллектором и базой (с помощью диода).

Для переключения из одной цепи в другую используют транзисторный переключатель тока.

В качестве ключа может использоваться транзистор типа  $p-n-p$ , включенный по схеме с общим эмиттером. Запирание (отсечка тока) транзистора происходит, когда оба его  $p-n$ -перехода (эмиттерный и коллекторный) закрыты, т. е. когда напряжение на базе по отношению к эмиттеру и коллектору положительное. Транзистор  $p-n-p$ -типа при такой схеме включения будет закрыт при отрицательном напряжении.

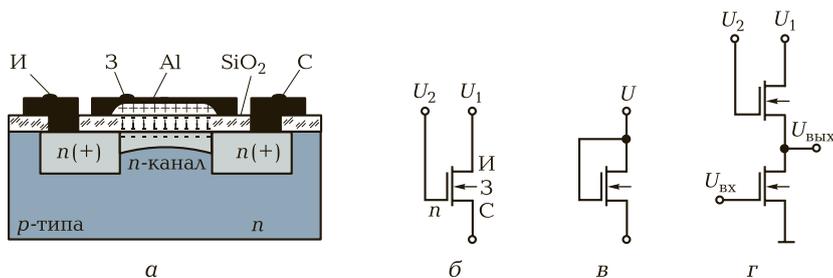
Для повышения мощности или перепада напряжения применяют составные ключевые каскады на составных транзисторах. Схе-

ма Дарлингтона (рис. 2.21, в) позволяет использовать транзисторы с разным коэффициентом усиления и транзисторы разной мощности. Для включения мощной нагрузки второй транзистор выбирают более мощным.

Каскодная схема (рис. 2.21, г) используется для повышения быстродействия ключа.

**Ключи на полевых транзисторах.** Схема ключа на полевом транзисторе на основе МДП-структуры с встроенным каналом представлена на рис. 2.22. При подаче положительного напряжения на затвор полевого транзистора с  $n$ -каналом его сопротивление уменьшается. Если же на его затвор подается отрицательное напряжение, то электроны вытесняются в  $p$ -область и  $n$ -канал обедняется. При этом проводимость транзистора резко снижается, повышается сопротивление и ток между истоком и стоком уменьшается.

Полевой МДП-транзистор без встроенного канала работает аналогично, но имеет некоторые особенности. При нулевом напряжении на затворе положительной области  $n$ -проводимости разделены полупроводниковой областью  $p$ -типа и ток между ними не проходит. При подаче положительного напряжения на затвор к области под затвором притягиваются электроны и отталкиваются дырки. Концентрация электронов в поверхностном слое полупроводника увеличивается, и он приобретает проводимость. Таким образом, в нем создается (индуцируется) канал проводимости. В отличие от транзистора с встроенным каналом этот полевой транзистор пропускает ток (открывается) только при положительном напряжении на затворе, что хорошо для ключевых импульсных схем, где важно четко различать положения «включен» и «выключен».



**Рис. 2.22.** Структура полевого МДП (МОП)-транзистора с встроенным  $n$ -каналом (а) и схемы его включения в качестве активного резистора (б, в) и ключевого каскада (г)

Особенность ключей на полевых транзисторах состоит в том, что они имеют большое внутреннее сопротивление и управляются не током, а напряжением.

Наиболее часто в качестве ключевых элементов используются МОП-транзисторы с индуцированным каналом. По сравнению с ключами на биполярных транзисторах они имеют ряд преимуществ: высокое входное сопротивление, малые токи, хорошие частотные характеристики и радиационную стойкость.

Ключевые и усилительные каскады на полевых транзисторах упрощают схемы и повышают надежность электронных устройств. Важно помнить, что полевые транзисторы имеют высокое входное сопротивление и управляются напряжением, подаваемым на затвор, а не током, как обычные транзисторы. Поэтому для уменьшения их постоянной времени и длительности переходного процесса после конденсатора в входную цепь вводят гасящее сопротивление.

**Тиристорные ключи.** Тиристор может находиться в одном из двух устойчивых состояний, соответствующих напряжению на управляющем электроде. При управляющем напряжении ниже критического тиристор закрыт. Если же оно равно критическому либо выше него, тиристор открыт.

Переход тиристора из одного устойчивого состояния в другое происходит скачком (на отрицательном участке ВАХ состояние прибора неустойчивое). Открывается тиристор, когда напряжение на его управляющем электроде превышает некоторое пороговое значение  $U_1$ , причем при этом переходе сопротивление тиристора и ток, проходящий через него, изменяются в  $10^6 \dots 10^7$  раз. Обратный переход тиристора в закрытое состояние происходит при напряжении на управляющем электроде меньше значения  $U_2$ . При сопротивлении примерно от  $10^7$  Ом в закрытом состоянии сила тока в тиристоре составляет около  $10^{-6}$  А, а в открытом — от 0,1 до 1,0 А. Таким образом, тиристор имеет очень высокие коэффициенты включения по току и мощности и может быть хорошим ключевым устройством.

Аналогично тиристорам включается фототиристор при освещении его потоком света.

**Электронные ключи на фотоэлектрических устройствах.** Включение таких ключей происходит при подаче светового потока на их чувствительную зону. Таким образом, световой поток влияет на проводимость (или внутреннее сопротивление) ключа и пускает ток в цепи. В ключевых каскадах могут использоваться фотосопротивления, фотодиоды, фототранзисторы, а также оптопары и оптроны (см. гл. 5).

### 2.3.3. Импульсные генераторы

Наличие большого числа типов импульсных генераторов, используемых в электронике, требует их классификации по различным признакам. В зависимости от функционального назначения и формы вырабатываемых импульсов генераторы подразделяются на следующие крупные классы:

- генераторы прямоугольных импульсов;
- генераторы линейно изменяющихся (пилообразных) напряжений;
- генераторы специальных функций (используются редко).

Генераторы прямоугольных импульсов включают в себя:

- формирователи прямоугольных импульсов из импульсов произвольной формы или синусоидальных напряжений;
- ждущие генераторы, т. е. срабатывающие по подходящему импульсу;
- генераторы меандровых последовательностей, т. е. формирующие последовательность импульсов с длительностью, равной длительности интервала между ними;
- автоколебательные генераторы — мультивибраторы, блокинг-генераторы и фантастроны;
- генераторы импульсных цифровых последовательностей.

Перечисленные генераторы используются для формирования видеоимпульсов, но они могут применяться и для генерации (или модуляции) радиоимпульсов такой же формы с высокочастотным заполнением. Высокочастотная импульсная модуляция возможна по амплитуде, частоте или фазе.

Генераторы линейно изменяющихся (пилообразных) напряжений включают в себя:

- симметричные генераторы (с симметричным линейным нарастанием и убыванием напряжения или тока);
- несимметричные генераторы (с медленным нарастанием и быстрым возвратом к исходному состоянию напряжения или тока);
- генераторы с стабилизаторами тока;
- генераторы с положительной обратной связью;
- генераторы с отрицательной обратной связью;
- автогенераторы (на основе мультивибраторов, блокинг-генераторов и фантастронов).

Далее мы рассмотрим лишь основные широко применяемые генераторы прямоугольных импульсов.

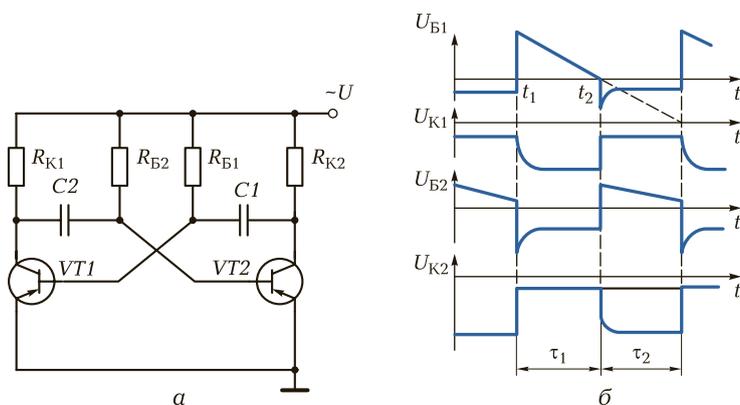
Автоколебательные генераторы являются астабильными (неустойчивыми) устройствами, т. е. не имеют устойчивых равновесных состояний. Такие генераторы используют для формирования последовательностей прямоугольных импульсов, когда нет жестких требований по стабильности временных характеристик.

Автоколебательные генераторы имеют различные схемные решения и строятся на различных элементах. Общим у них является наличие положительной обратной связи и релаксационной  $RC$ -цепи, в которой происходит постепенное нарастание или убывание напряжения до достижения определенного уровня, при котором происходит скачкообразный переход генератора из одного состояния в другое. Наиболее типичными представителями автоколебательных релаксационных генераторов являются мультивибраторы.

### 2.3.4. Мультивибратор на транзисторах

Автоколебательные мультивибраторы легко реализуются с помощью транзисторов и логических элементов.

Электрическая схема мультивибратора на транзисторах, показанная на рис. 2.23, работает следующим образом. При подаче напряжения питания один из транзисторов, например  $VT1$ , открывается и на его коллекторе образуется положительный потенциал. Конденсатор  $C2$  начинает заряжаться через резистор  $R_{B2}$ , создавая на нем падение напряжения, которое запирает транзистор  $VT2$ .



**Рис. 2.23.** Схема (а) и эпюры напряжений (б) мультивибратора на транзисторах

В этом состоянии мультивибратор будет находиться до тех пор, пока будет интенсивно заряжаться конденсатор  $C2$ .

По мере заряжения конденсатора  $C2$  напряжение на  $R_{B2}$  постепенно падает до нуля и транзистор  $VT2$  открывается. На его коллекторе появляется положительный потенциал, после чего начнет заряжаться конденсатор  $C1$  через резистор  $R_{B1}$ . Падение напряжения на  $R_{B1}$  скачком перекроет транзистор  $VT1$ , и мультивибратор перейдет в новое состояние, в котором и будет находиться пока заряжается конденсатор  $C1$ . Когда конденсатор  $C1$  зарядится и напряжение на  $R_{B1}$  упадет до нуля, снова откроется транзистор  $VT1$ , а транзистор  $VT2$  закроется.

Таким образом, мультивибратор будет работать в автоколебательном режиме. При этом время пребывания в том или ином состоянии  $\tau_1$  и  $\tau_2$  будет определяться постоянными времени ( $RC$ ) заряда конденсаторов  $C1$  и  $C2$ .

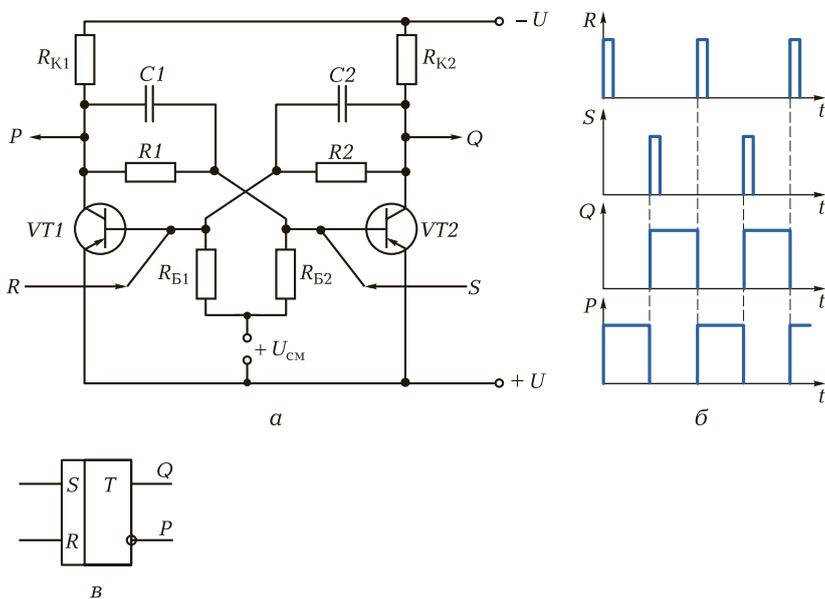
### 2.3.5. Симметричный триггер на транзисторах ( $RS$ -триггер)

В качестве формирователей импульсов и импульсных генераторов часто используют триггеры.

**Триггером** называется импульсное устройство с двумя устойчивыми состояниями, способное под воздействием внешних импульсов переходить из одного состояния в другое. Слово «триггер» происходит от англ. *trigger* — спусковой крючок оружия, т. е. внешний импульс действует на триггер как нажатие на спусковой крючок стрелкового оружия, вызывая лавинообразный процесс быстрого переключения из одного состояния в другое.

Схема симметричного триггера на двух транзисторах, его эпюры напряжений и УГО приведены на рис. 2.24. Он состоит из двух ключевых каскадов на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ , включенных по схеме с общим эмиттером. К коллекторам транзисторов подключены нагрузочные резисторы  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$ , а также цепочки межкаскадных связей  $R1, C1$  и  $R2, C2$ , которые также подключены к управляющим входам (базам) смежных транзисторов. Таким образом, выход одного ключевого каскада на транзисторе  $VT1$  связан с входом другого транзистора  $VT2$ . Симметричное включение всех элементов обеспечивает одинаковость двух устойчивых состояний триггера:  $P = 1$  и  $P = 0$  на одном выходе (с  $VT1$ ) и соответственно  $Q = 0$  и  $Q = 1$  на другом.

Триггер имеет два входа  $S$  и  $R$  (от англ. *set* — установить и *reset* — сброс) и два выхода — прямой  $Q$  и инверсный  $P$ . Если триггер в со-



**Рис. 2.24.** Схема симметричного RS-триггера в интегральном исполнении (а), его эюры напряжений (б) и УГО (в)

стоянии  $Q = 1$ , то при подаче импульса на вход  $R$  он перейдет в состояние  $Q = 0$ . Если далее подать импульс на вход  $S$ , то триггер вернется в состояние  $Q = 1$ .

Связь одного ключевого каскада с входом другого вызывает лавинообразный процесс быстрого переключения триггера из одного состояния в другое. Для ускорения лавинообразного процесса за счет увеличения межкаскадной связи параллельно резисторам связи  $R1$  и  $R2$  подключены конденсаторы  $C1$  и  $C2$ , которые не влияют на статические состояния триггера, но хорошо передают изменение напряжений в переходном процессе.

Триггер может находиться в одном из устойчивых состояний неограниченно долго. Если один из транзисторов, например  $VT1$ , открыт, то потенциал базы транзистора  $VT2$  за счет потенциала источника напряжения смещения  $U_{см}$  будет положительным и приведет к его закрытию. Большой отрицательный потенциал на коллекторе закрытого транзистора  $VT2$  передается через резистор  $R2$  на базу транзистора  $VT1$ , удерживая его в режиме насыщения.

При подаче на вход  $R$  положительного импульса транзистор  $VT1$  начинает закрываться. Отрицательный потенциал на его коллекторе возрастает и через конденсатор  $C1$  и резистор  $R1$  передается на

базу транзистора  $VT_2$ . Последний начинает открываться. На его коллекторе появляется положительный потенциал (от эмиттера), который передается через конденсатор  $C_2$  и резистор  $R_2$  на базу транзистора  $VT_1$ , усиливая процесс его перекрытия. Таким образом, через  $RC$ -цепи устанавливается сильная положительная обратная связь, приводящая к лавинообразному «опрокидыванию» триггера и переходу его в новое устойчивое состояние. Обратный переход произойдет только при подаче положительного импульса на вход триггера  $S$ . Ввиду симметрии схемы обратный процесс проходит так же, как прямой, если при рассмотрении процесса поменять местами транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$ .

Интегральные микросхемы триггеров на логических элементах рассмотрены в подразд. 3.2.5.

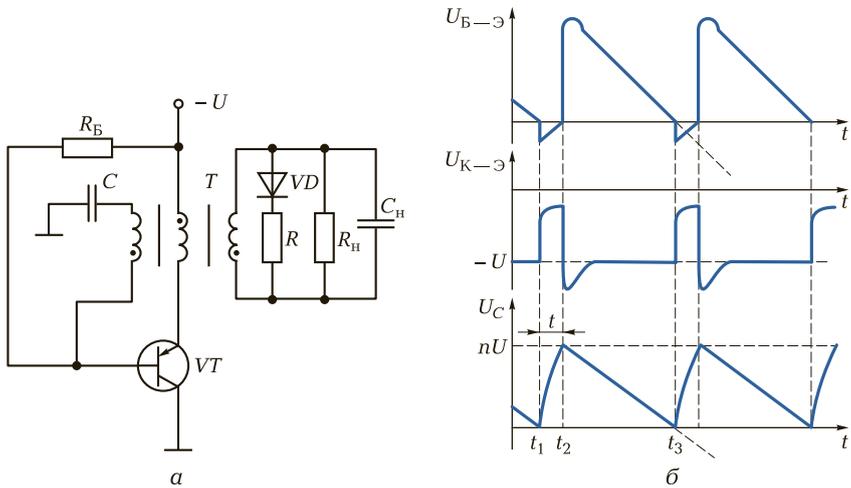
### 2.3.6. Блокинг-генераторы

**Блокинг-генератором** называется однокаскадное регенеративное импульсное устройство с трансформаторной положительной обратной связью, формирующее прямоугольные импульсы малой длительности (от десятых долей до единиц микросекунд) большой амплитуды и мощности.

Блокинг-генератор (БГ) в отличие от мультивибратора содержит только один усилитель, что облегчает регулировку длительности и частоты повторения импульсов. Однако входящий в него трансформатор усложняет конструкцию и затрудняет его миниатюризацию. В то же время, применяя дополнительную нагрузочную обмотку трансформатора, можно осуществлять электрическую развязку нагрузки и источника питания, и усиливать напряжение выхода.

Регенеративные процессы в блокинг-генераторах, называемые блокинг-процессами (БП), возникают при выполнении условий баланса фаз и амплитуд, создавая скачки токов и напряжений. Возникающий при формировании фронта импульса блокинг-процесс называется прямым (ПБП), а возникающий при формировании среза импульса — обратным (ОБП). Формирование паузы между импульсами обусловлено процессами релаксации при разряде конденсатора (как в мультивибраторах), а формирование вершины импульса — процессами релаксации при заряде конденсатора (что является особенностью БГ).

Блокинг-генераторы могут работать в ждущем и автоколебательном режимах. В последнем они генерируют импульсы большой скважности ( $M = 1\ 000$  и более). Применение БГ особенно эффек-



**Рис. 2.25.** Схема автоколебательного блокинг-генератора на транзисторе (а) и его эпюры напряжений (б)

тивно при работе на мощную нагрузку, которая даже улучшает форму импульсов. Поэтому БГ часто применяют в мощных импульсных устройствах, в частности в модуляторах высокочастотных импульсных генераторов. В этих случаях БГ представляет собой генератор импульсов тока.

Схема и эпюры напряжений блокинг-генератора на транзисторе приведены на рис. 2.25. Для получения автоколебательного режима необходимо подключить резистор  $R_B$  к источнику питающего напряжения  $U$ , как показано на схеме. В этом случае БГ потеряет свое устойчивое состояние, т. е. оба его состояния будут квазиустойчивыми.

Пусть в некоторый момент времени  $t_1$  напряжение на базе транзистора  $VT$  достигнет уровня, близкого к нулю, и он откроется. При этом в блокинг-генераторе происходит лавинообразный прямой блокинг-процесс, в результате которого транзистор переходит в режим насыщения. В этом режиме конденсатор  $C$  заряжается напряжением вторичной обмотки трансформатора и базовым током. По мере заряда конденсатора напряжение базы растет, а базовый ток уменьшается.

В момент времени  $t_2$  транзистор  $VT$  выходит из насыщения и происходит обратный блокинг-процесс, в результате которого транзистор закрывается. После закрытия транзистора конденсатор  $C$  перезаряжается через базовую обмотку трансформатора, резистор

$R_B$  и источник питающего напряжения  $U$  (в интервале времени  $t_2 \dots t_3$ ). Когда напряжение на базе становится отрицательным, развивается регенеративный процесс, в результате которого транзистор вновь оказывается в режиме насыщения.

Далее процессы в схеме повторяются. Все рассмотренные процессы аналогичны соответствующим процессам в ждущем БГ. Отличительной особенностью автоколебательного БГ является перезаряд, а не разряд конденсатора  $C$ .

Период повторения выходных импульсов автоколебательного блокинг-генератора:  $T = T_{пр} + T_{и}$ , где  $T_{пр}$  — время перезаряда емкости;  $T_{и}$  — длительность импульса. Поскольку время перезаряда значительно больше длительности импульса, можно считать, что  $T \approx T_{пр}$ . Период повторения импульсов можно регулировать с помощью конденсатора  $C$  и резистора  $R_B$ .

Блокинг-генераторы используются в радиолокаторах, импульсных лазерах и других импульсных цепях, где требуются очень короткие и мощные импульсы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы особенности аналоговых усилителей? Какие существуют типы усилителей?
2. Каковы особенности усилительного транзисторного каскада при постоянном и переменном напряжениях на входе?
3. Зачем нужны конденсаторы в транзисторных усилительных каскадах переменного напряжения?
4. Нарисуйте схему и поясните работу резонансного усилительного каскада. Каковы его АЧХ и ФЧХ?
5. Как определить полосу пропускания резонансного контура и от чего она зависит?
6. Что представляет собой усилитель постоянного тока и как он работает?
7. Нарисуйте схему и поясните работу дифференциального усилительного каскада.
8. Что представляет собой операционный усилитель (ОУ) и как он работает?
9. Из каких основных каскадов состоит микросхема ОУ?
10. Что такое усилительный каскад с ОУ и чем он отличается от ИМС ОУ?
11. Для чего нужны обратные связи в усилителях и какие обратные связи используют в электронных устройствах?
12. Чем характеризуются усилители мощности (УМ) и для чего их используют?

13. Каким образом достигаются экономичные режимы работы выходных каскадов?
14. Нарисуйте схему двухтактного бестрансформаторного выходного каскада на комплементарной паре транзисторов. Поясните, как она работает.
15. Что представляет собой автогенератор и каковы составляющие его элементы?
16. Какие параметры определяют условия генерации незатухающих колебаний автогенератора синусоидальных напряжений?
17. Зачем нужна стабилизация частоты автогенератора и как она осуществляется?
18. Нарисуйте схемы автогенераторов на биполярных и полевых транзисторах. Поясните, как они работают.
19. Что представляет собой мультивибратор и каковы его характеристики?
20. Что представляет собой блокинг-генератор и что для него характерно?
21. В чем состоит особенность генерации линейно изменяющихся напряжений?

# ОСНОВЫ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

## 3.1. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Успехи современной микропроцессорной электронной техники в значительной степени определяют технический уровень очень многих отраслей промышленности (робототехники, автоматики, контрольно-измерительной техники). Быстрый рост сложности и требование миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры потребовали поиска принципиально новых путей создания элементной базы на основе микроэлектроники. Особенностью современного этапа развития электронной техники является все усиливающийся процесс внедрения микроэлектроники во все электронные устройства.

**Микроэлектроника** — научно-техническое направление электроники, которое на основе использования комплекса физических, химических, схмотехнических и технологических методов решает задачу создания миниатюрных электронных устройств — интегральных микросхем, содержащих большое количество электронных элементов.

Изготовление полупроводниковых интегральных микросхем относится к области высоких технологий и требует значительных капитальных затрат на технологическое оборудование. Технологический процесс изготовления интегральных микросхем сложен, требует использования особо чистых материалов, привлечения к работе квалифицированного персонала. Поэтому разработка и внедрение технологии полупроводниковых микросхем экономически целесообразно только в условиях массового производства (производство карманных радиоприемников, мобильных телефонов, планшетников и т. п.).

### 3.1.1. Микросборки и интегральные микросхемы

**Микросборки** — это функциональные электронные устройства (усилители, генераторы, приемники и т. п.), выполненные на плате, изготовленной по толсто пленочной технологии, с впаянными (навесными) активными и пассивными элементами (транзисторами, конденсаторами и др.).

**Интегральные микросхемы** — это миниатюрные функциональные электронные устройства с многими пассивными и активными элементами, выполненные по тонко пленочной технологии на одном полупроводниковом кристалле, в герметичном пластмассовом или керамическом корпусе.

Существенными признаками классификации являются технология исполнения (толсто пленочная и тонко пленочная) и конструктивное исполнение.

Толсто пленочная технология заключается в нанесении эмульсионных слоев методом типографской печати с последующей сушкой и отжигом. Этим методом получают, как правило, пассивные элементы (резисторы, индуктивности и емкости), а нелинейные и активные элементы (диоды и транзисторы) спаивают. Технология изготовления схем на основе толстых пленок является сравнительно простой и не требует сложного и дорогостоящего оборудования. Толсто пленочные ИМС характеризуются высокой надежностью и небольшой себестоимостью.

При тонко пленочной технологии слои полупроводников, изоляторов и металлов наносятся в вакуумных установках молекулярно пучковым или плазмохимическим методом. Эти методы позволяют делать любые элементы и сложные схемы из последовательно наносимых слоев по рисунку, задаваемому методом фотолитографии. Толщина пленок в этой технологии составляет от 0,1 до 0,5 мкм, ширина линий или промежутков между ними может достигать 0,3 мкм. Чем меньше размеры одного активного элемента, тем более сложную ИМС можно создать на одном кристалле. Поэтому сейчас осуществляется переход на ультрафиолетовую фотолитографию, позволяющую изготавливать ИМС с размерами элементов 0,3 мкм. Разрабатывается также принципиально новая нанотехнология, позволяющая получать ИС с размерами элементов 10 нм = 0,01 мкм.

По конструктивному исполнению ИМС делятся на гибридные и полупроводниковые. В гибридной ИМС содержатся тонко пленочные или толсто пленочные пассивные элементы и полупро-

водниковые активные навесные элементы — компоненты ИМС. Гибридная толстопленочная технология предпочтительна в тех случаях, когда необходимо изготовить сравнительно небольшое количество специализированных микросхем — микросборок для мощных устройств.

Основным преимуществом полупроводниковых ИМС является возможность изготовления множества высококачественных электронных элементов по тонкопленочной технологии с высокой плотностью элементов. При этом допуски на параметры элементов могут быть доведены до 1—2 %. Это важно в тех случаях, когда точность номиналов параметров пассивных элементов и их стабильность имеют решающее значение (например, при изготовлении некоторых видов фильтров, фазочувствительных и избирательных схем, генераторов и т. п.).

Одно из главных достоинств изделий микроэлектроники — повышение надежности аппаратуры благодаря высокой надежности ИМС, значительному уменьшению числа соединений и возможностям резервирования как целых узлов, так и отдельных элементов. Поскольку паяные соединения в микросхемах отсутствуют, а из внешних необходимо паять лишь входные и выходные выводы, вероятность выхода из строя микросхемы вследствие нарушения соединений не больше, чем у дискретных полупроводниковых приборов, например транзисторов. Интенсивность отказов полупроводниковых микросхем в настоящее время достигает  $10^{-9}$  ч<sup>-1</sup>.

Развитие микроэлектроники связано с созданием малогабаритных, надежных и экономичных вычислительных машин и систем, где используется большое число однотипных элементов. Поэтому в первую очередь созданы различные типы логических и вычислительных микросхем. Гибридные ИМС применяются в приемно-передающей аппаратуре связи, усилителях высокой частоты, микрофонных усилителях, СВЧ-устройствах и т. д.

Микросхемы находят все большее применение в бытовой вещательной аппаратуре, например все каскады телевизоров с малым уровнем сигнала собираются на микросхемах. Электронные устройства видеомагнитофонов, переносных и автомобильных радиоприемников сейчас выполняются на типовых микросхемах.

Увеличение функциональной сложности и плотности упаковки элементов и компонентов привело к появлению больших интегральных схем (БИС), в которых вместо отдельных элементов (усилительный каскад, триггер, логическая ячейка и т. п.) используются интегральные узлы и целые устройства (регистр, счетчик, усилитель, аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи, запоми-

нающее устройство и даже процессор ЭВМ). Считается, что по сложности БИС эквивалентна как минимум 100 логическим схемам. Показателем степени сложности микросхем является степень интеграции  $K = \lg N$ , где  $N$  — число элементов и компонентов, входящих в ИС. Для микросхемы 1-й степени интеграции  $N \leq 10$  и  $0 \leq K \leq 1$ , для 2-й —  $10 \leq N \leq 100$  и  $1 \leq K \leq 2$ , для 3-й  $100 \leq N \leq 1\,000$  и  $2 \leq K \leq 3$ . В ИМС 5-й степени интеграции содержится до  $10^5$  элементов на кристалле. На одной кремниевой пластине диаметром 150 мм создаются десятки СБИС, которые могут выполнять функции целой ЭВМ. Для реализации БИС наиболее пригодны структуры металл — диэлектрик — полупроводник (МДП-структуры). Схемы на МДП-структурах значительно проще в изготовлении, имеют малые величины управляющих напряжений, потребляют малую мощность, характеризуются высоким быстродействием.

Микросхемы классифицируются как по методам их изготовления, так и по используемым в них физическим явлениям.

В условное обозначение микросхем включены четыре элемента. Первый элемент: цифра, показывающая конструктивно-технологическое исполнение, вторая и третья цифры — номер разработки данной серии (первые три цифры соответствуют номеру серии микросхем). Третий элемент: индекс, состоящий из двух букв, — функциональное назначение данной микросхемы. Четвертый элемент (одна или две цифры) — порядковый номер разработки микросхемы по функциональному признаку в данной серии. Например, запись 13ЗТМ2 означает: полупроводниковая микросхема серии 133, представляющая собой два  $D$ -триггера с номером разработки 2. Классы и группы микросхем и их обозначения (в скобках) приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Классы и группы микросхем и их обозначения

Класс	Группа
Усилители	Высокой частоты (УВ), синусоидальные (УС), промежуточной частоты (УР), постоянного тока (УТ), низкой частоты (УН), видеоусилители (УВ), считывание и воспроизведение (УЛ), импульсные (УИ), индикации (УМ), операционные и дифференциальные (УД), прочие (УП)
Генераторы	Гармонических сигналов (ГС), прямоугольных сигналов (ГТ), линейно изменяющихся сигналов (ГЛ), сигналов специальной формы (ГФ), шума (ГМ), прочие (ГП)

Класс	Группа
Преобразователи	Частоты (ПС), длительности (ПД), фазы (ПФ), мощности (ПМ), напряжения (ПН), аналог — код (ПК), декодирующие (код — аналог) (ПД), код — код (ПР), уровни (согласователи) (ПУ), прочие (ПП)
Модуляторы	Амплитудные (МА), частотные (МС), фазовые (МФ), импульсные (МИ), прочие (МП)
Детекторы	Амплитудные (ПА), частотные (ДС), фазовые (ДФ), импульсные (ДИ), прочие (ДП)
Триггеры	<i>J</i> -типа (ТВ), <i>D</i> -типа (ТМ), <i>RS</i> -типа (ТР), Т-типа (ТТ), комбинированные (типов <i>DT</i> , <i>RST</i> , <i>T</i> и др. (ТЛ), Шмитта (ТК), динамические (ТД), прочие (ТП)
Ключи и коммутаторы	Транзисторные (КТ), диодные (КД), оптоэлектронные (КЭ), тока (КТ), напряжения (КН), прочие (КП)
Фильтры	Верхних частот (ФВ), нижних частот (ФН), полосовые (ФП), заградительные (ФГ), режекторные (ФР), сглаживающие (ФС), пассивные (БМ), активные (БР), прочие (БП)
Логические элементы	И (ЛИ), ИЛИ (ЛЛ), НЕ (ЛН), И—НЕ (ЛА), ИЛИ—НЕ (ЛЕ), И—ИЛИ (ЛС), И—ИЛИ—НЕ (ЛР), И—ИЛИ—НЕ/И-ИЛИ (ЛК), ИЛИ—НЕ/ИЛИ (ЛК), расширители (ЛД), прочие (ЛП)
Элементы запоминающих устройств	Матрицы-накопители: ОЗУ (РМ) и ПЗУ (РВ), ОЗУ со схемами управления (РУ), ПЗУ (масочное) со схемами управления (РЕ), ПЗУ со схемами управления (РТ), прочие (РП)
Вычислительные элементы	Регистры (ИР), сумматоры (ИС), полусумматоры (ИЛ), счетчики (ИЕ), шифраторы (ИШ), дешифраторы (ИД), комбинированные (ИК)
Многофункциональные схемы	Импульсные (ХИ), цифровые (ХЛ), аналого-импульсные (ХЕ), аналого-логические (ХВ), аналого-импульсно-логические (ХК), прочие (ХП)
Формирователи	Импульсов прямоугольной формы (АГ), импульсов специальной формы (АФ), адресных токов (АА), разрядных токов (АР), прочие (АП)
Вторичные источники питания	Выпрямители (ЕВ), преобразователи (ЕМ), стабилизаторы напряжения (ЕН), стабилизаторы тока (ЕТ), прочие (ЕП)

По технологическому исполнению микросхемы разделяются на полупроводниковые и совмещенные (первые цифры в условном обозначении 1, 5, 7), гибридные (2, 4, 6, 8), пленочные (3). Для микросхем широкого применения перед первым элементом условного обозначения ставится буква К.

По характеру выполняемой функции микросхемы разделяются на классы: генераторы, усилители, преобразователи, логические элементы, элементы ЗУ и т.д. Каждый класс, в свою очередь, подразделяется на группы. Например усилители подразделяются на усилители синусоидальные, постоянного тока, импульсные, высокой, промежуточной и низкой частот, операционные и дифференциальные видеоусилители, повторители.

Микросхемы группируются также по сериям. Микросхемы, входящие в одну серию, имеют одинаковую технологию, напряжение питания, надежность, а также допустимые уровни внешних воздействий.

### 3.1.2. Технологические процессы изготовления ИМС

В толстопленочной технологии изготовления гибридных ИМС используют материалы и технологии близкие к технологии изготовления печатных плат. В качестве подложки и используются фольгированный текстолит и гетинакс. В качестве проводников, пластин конденсаторов и элементов индуктивности применяются фольга или металлы гальванического и химического осаждения: Al, Cu, Ag, Au. Для изготовления резистивных элементов используют эмульсии и суспензии, содержащие NiCr или SiCr. В качестве диэлектриков используют эпоксидные смолы, силиконовые резины, лаки. Процесс изготовления гибридных ИМС по толстопленочной технологии сходен с типографским процессом печати книг. Все требуемые материалы подготавливают в виде суспензий, эмульсий, лаков, красок. Методом печати наносят защитный слой кислотоустойчивого лака на фольгу гетинакса. После сушки производят травление металла в растворе кислоты. Затем печатью последовательно наносят резисторы, изоляторы, обкладки конденсаторов. Далее, после сушки, впаивают нелинейные и активные элементы (диоды, транзисторы). На последних этапах изготовления ИМС наносят защитные диэлектрические покрытия и упаковывают схему в пластмассовый или металлический корпус. Гибридные ИМС имеют специальное функциональное назначение. Их выполняют небольшими партиями,

и каждый тип микросхемы может иметь свою уникальную технологию.

В тонкопленочной технологии процесс изготовления полупроводниковых ИМС состоит из следующих основных этапов: диффузии, оксидирования, эпитаксиального выращивания, фотолитографии и вакуумного напыления, химического осаждения из газовой среды, анодирования.

В качестве подложек полупроводниковых тонкопленочных ИС используют пластины из кристаллического кремния, арсенида галлия, фосфида галлия. Наибольшее распространение получила кремниевая технология, в которой используются стандартные планшайбы из легированного кремния толщиной 0,5 мм и диаметром 70, 100 и 150 мм. Пластины поставляют в виде дисков с шлифованными и полированными поверхностями. Непосредственно перед процессом изготовления их протравливают в растворе плавиковой кислоты, промывают в деионизованной воде и сушат потоком фильтрованного воздуха.

В основе изготовления тонкопленочных микросхем лежат вакуумные процессы последовательного нанесения тонких пленок на планшайбу.

Рассмотрим кратко перечисленные технологические процессы.

**Диффузия.** Большинство методов образования  $p-n$ -переходов в ИС основано на использовании явления диффузии в твердом теле. Современная кремниевая технология получения микросхем основана на диффузии легирующих присадок в кремниевой пластине при температуре 1 000—1 300 °С. Обычно берут кремниевую пластину (подложку), легированную акцепторной примесью — бором ( $p$ -область) — и помещают ее в диффузионный кварцевый реактор. При температуре 1 200 °С в реактор подают газ с донорной примесью (например, фосфор). Если нижняя часть подложки защищена, то после обработки в течение 30 мин на глубине 0,1 мм от верхней поверхности, где концентрации донорной и акцепторной примесей равны, образуется  $p-n$ -переход. При дальнейшем пребывании в реакторе  $p-n$ -переход будет смещаться в глубь подложки.

Для формирования  $p-n-p$ -перехода необходимо чередовать подачу газа с разными легирующими примесями. В результате в подповерхностном слое создается распределение диффундирующих веществ с  $p-n$ - и  $p$ -областями, характерными для биполярных транзисторов.

**Оксидирование.** Тонкая пленка диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ , кварц) является хорошим изолирующим материалом. Она прочна, однородна, не имеет пор, химически инертна, имеет хорошую адгезию

с кремниевой поверхностью, хорошо защищает поверхность микросхем от воздействия окружающей среды. Пленка  $\text{SiO}_2$  широко используется для маскирования поверхности кремния при проведении диффузии, так как она препятствует диффузии легирующих примесей в кремниевую подложку. Равномерную пленку диоксида кремния получают на подложке в диффузионном реакторе при температуре  $1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$  подачей влажного (с водяным паром) или чистого (сухого) кислорода. Поверхностный слой кремниевой пластины окисляется кислородом с образованием пленки  $\text{SiO}_2$ . Для эффективного маскирования требуется пленка толщиной от  $0,2$  до  $1\ \mu\text{м}$ . Для удаления пленки в соответствующих местах (под контакты или для диффузии) методом фотолитографии наносят защитный рисунок из фоторезиста, а затем протравливают пленку методом ионно-плазменного травления фторсодержащим газом (фреоном).

Пленки диоксида кремния могут синтезироваться на поверхности полупроводниковой структуры из тетрахлорида кремния ( $\text{SiCl}_4$ ) в кислородной среде по следующей реакции:  $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Cl}_2 \uparrow$ . При температуре выше  $1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$  тетрахлорид кремния разлагается на кремний и хлор. Хлор улетучивается, а кремний соединяется с кислородом и осаждается на поверхность полупроводниковой структуры в виде пленки  $\text{SiO}_2$ .

**Эпитаксиальное выращивание.** В результате этого процесса атомы нового вещества надстраиваются на монокристаллическую подложку, повторяя ее структуру. При жидкостной и газовой эпитаксии атомы беспорядочно движутся вдоль кристаллической поверхности, пока не займут устойчивого положения и не образуют жесткой структуры, повторяющей структуру поверхности кристалла. Этот процесс похож на рост природных и синтетических кристаллов. Он отличается тем, что наращиваемые слои имеют другое атомное строение и потому упорядоченность атомов после нескольких атомных слоев нарушается. Основным требованием при эпитаксиальном выращивании является близость межатомного расстояния наращиваемого вещества и вещества подложки.

В последнее время интенсивно развивается новое направление — молекулярно-пучковая эпитаксия. В этом процессе эпитаксиальное выращивание пленки с упорядоченной кристаллической структурой производится в вакуумной установке молекулярным (или атомным) пучком, формируемым дуговым, плазменным или магнетронным распылением вещества. Пучок молекул падает на поверхность подложки. Отличительной особенностью молекулярно-пучковой эпитаксии от вакуумного напыления является то, что

подложка нагревается до высокой температуры (для кремниевой технологии до 1 000 °С). При этом молекулы (атомы) не могут сразу закрепиться на поверхности кристалла, и за счет температурных колебаний перемещаются по поверхности кристалла до ближайшей границы роста. Здесь они занимают устойчивое положение с прочными молекулярными связями кристаллической решетки.

**Фотолитография.** Для формирования заданного микроскопического рисунка на поверхности кремниевой подложки, по которому необходимо проводить диффузию, необходимо нанести слой диоксида кремния и протравить в нем соответствующие «окна». Для этого на пластину кремния со сплошным слоем диоксида толщиной около 1 мкм наносится слой светочувствительного вещества (фоторезиста). Затем пластину накрывают металлической маской (на фотопленке) с фотоизображением схемы (фотошаблоном) с прозрачными и непрозрачными областями и облучают ультрафиолетовым (УФ) светом. Под прозрачными участками УФ свет полимеризует фоторезист. Он становится нерастворимым в трихлорэтилене, в то время как неполимеризованный хорошо растворяется в нем. После обработки в трихлорэтилене на поверхности подложки фоторезист остается только в местах, подверженных облучению УФ-светом, т. е. под прозрачными местами маски. Затем пластину помещают в сосуд с разбавленной плавиковой кислотой, которая в течение нескольких минут растворяет диоксид кремния в местах, не защищенных фоторезистом. Полимеризованный фоторезист удаляют горячей серной кислотой, и подложка готова к процессу диффузии.

Для изготовления микросхемы требуется нанесение нескольких слоев с разным типом легирования в разных местах подложки. Для этого изготавливают несколько фотошаблонов с разными рисунками и метками совмещения. После проведения одной операции диффузии снова окисляют поверхность, наносят фоторезист, устанавливают фотошаблон, совмещая под микроскопом метки совмещения, и повторяют операции фотолитографии и диффузии. Таким образом, благодаря процессу фотолитографии можно получить на одной кремниевой пластине до 100 микросхем 4-й или 5-й степени интеграции.

**Вакуумное напыление.** Осаждение тонких пленок металла в соединительных проводниках ИМС, для формирования резисторов, конденсаторов и индуктивностей, производят методом вакуумного напыления. При термическом напылении металл в «лодочке» из тугоплавкого материала нагревается высокочастотным ин-

дуктором до высокой температуры. Металл плавится, начинает испаряться и оседать (конденсироваться) на соседние, более холодные поверхности, покрывая их тонким слоем. Если кремниевую пластину накрыть трафаретом или использовать технику фотолитографии, то на ней можно создать все перечисленные тонкопленочные элементы. Благодаря вакууму получают хорошую адгезию к кремниевой подложке и однородные плотные слои металлических пленок толщиной от 0,5 до 1 мкм.

По методу испарения металла вакуумное напыление разделяют на термическое (нагрев), дуговое (в дуге электрического тока), электронно-лучевое, катодное распыление, магнетронное распыление, лазерное испарение.

По типу осаждения на поверхность выделяют обычное (на холодную поверхность), эпитаксиальное (на горячую) и ионное осаждение. При последнем способе создается разность потенциалов между нагреваемым металлом и подложкой. Ионное осаждение упорядочивает поток молекул металла и дает повышенную адгезию (прилипание) пленки к подложке.

**Химическое осаждение из газовой фазы.** Этот метод заключается в том, что в реактор подается газовая или парогазовая смесь и реактор нагревается. Под действием высокой температуры происходит разложение вводимых химических веществ и образуются новые вещества, которые оседают на поверхность подложки.

Химическим осаждением из газовой фазы можно получить все необходимые для микроэлектроники типы тонких пленок: изолятор, проводник и полупроводник.

**Анодирование.** Анодирование — наиболее распространенный метод анодного окисления танталовой пленки в оксид тантала, которая служит диэлектриком конденсатора. К танталовой пленке, служащей анодом, прикладывается напряжение. В качестве электролита используют раствор уксусной кислоты. На пленке образуется равномерный слой оксида тантала, толщина которого зависит от приложенного напряжения. Затем снова осаждают металл. В результате формируются конденсаторы большой емкости со стабильными характеристиками.

Процессы металлизации, плазмохимического осаждения и анодирования проводят с использованием фотолитографии и травления. Обычно поверхность кремниевой планшайбы (подложки) окисляют. Методом фотолитографии наносят защитный рисунок из фоторезиста. Удаляют диоксид кремния плазмохимическим или химическим травлением, проводят диффузионные процессы. Там, где должны быть контакты, напыляют тонкий (1 мкм) слой алюми-

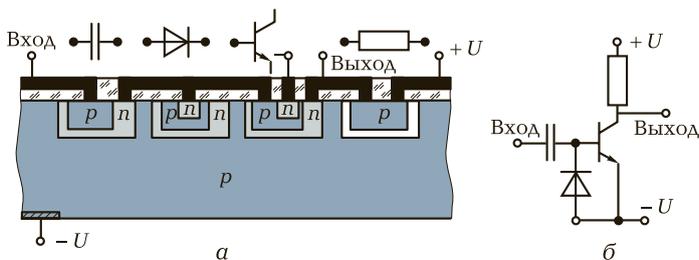
ния. Далее опять проводят процессы фотолитографии, анодирования, нанесения новых металлических пленок.

**Изготовление планарных ИМС.** Полупроводниковая микросхема транзисторного усилителя-инвертора в интегральном исполнении и его электрическая схема (элементы для наглядности расположены в одну линию над структурой) показана на рис. 3.1. Все элементы размещены в одной кремниевой пластине  $p$ -типа. Для исключения взаимного влияния активные и пассивные элементы размещаются в островках, изолированных от подложки. Сверху подложка защищена изоляционным слоем, на который нанесены проводящие дорожки, соединяющие элементы между собой.

Активные элементы полупроводниковых микросхем (транзисторы, диоды, тиристоры и оптоэлектронные приборы) состоят из одного или более  $p-n$ -переходов. Любой  $p-n$ -переход обладает барьерной емкостью аналогично плоскому конденсатору, и такие конденсаторы чаще всего применяются в микросхемах. В качестве резисторов используются участки полупроводника, обычно ограниченные  $p-n$ -переходами, т. е. слой кремния может выполнять функции резистора, а  $p-n$ -переходы могут быть границами.

Таким образом, в полупроводниковом кристалле с  $p-n$ -переходами можно создать набор элементов, достаточный для большинства радиотехнических схем. Наиболее трудно создать в интегральном исполнении индуктивность требуемых номиналов и добротности.

Для производства микросхем применяется планарная технология, позволяющая одновременно получать большое число микросхем в едином технологическом процессе. Для изготовления микросхем наиболее удобными оказались пленки кремния, полученные методом эпитаксиального выращивания. В этом случае процесс изготовления микросхем называется планарно-эпитаксиальным.



**Рис. 3.1.** Структура (а) и схема (б) усилительного каскада полупроводниковой интегральной микросхемы

Основой современных информационных технологий является работа вычислительных устройств с цифровыми данными, представленными в двоичных цифровых кодах. Современные системы передачи информации также работают с двоичными цифровыми последовательными кодами в режиме импульсно-кодовой модуляции. При этом обеспечивается высокая помехоустойчивость и точность передачи. Цифровая обработка данных также обеспечивает высокую точность получения конечного результата.

Представление информации в двоичной цифровой форме используется и в микропроцессорных устройствах, широко применяемых в системах автоматики и управления технологическими процессами на промышленных предприятиях и в бытовой технике.

## 3.2. БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

### 3.2.1. Логические элементы и устройства

Типовые логические элементы и устройства служат основой при создании цифровых вычислительных машин и автоматов дискретного действия. Они являются основными элементами арифметико-логических устройств (АЛУ) микропроцессоров и больших вычислительных машин, работающих с двоичными числами в соответствии с законами Булевой алгебры. В импульсных цепях и устройствах они используются в качестве ключей и элементов ключевых схем.

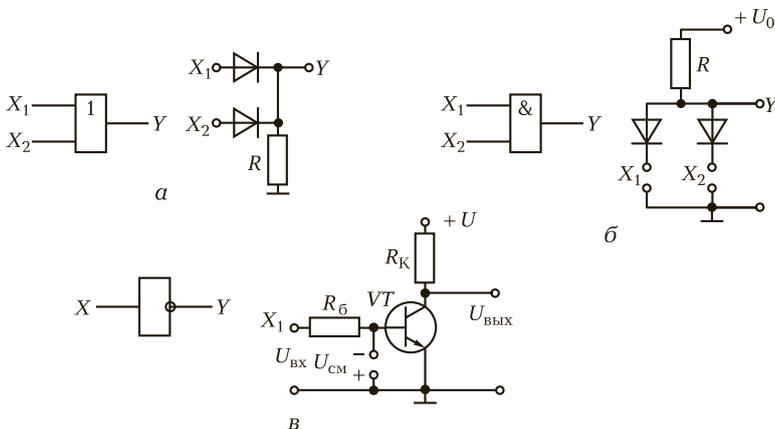
В логических устройствах сигналы на входе и выходе каскада являются двоичными — бинарными, т. е. они принимают значения только 0 или 1.

Любое логическое устройство можно представить в виде «черного ящика» с  $n$  входами и  $m$  выходами, на входе которого логическую комбинацию можно представить также в двоичном виде.

Комбинаторные логические устройства состоят из отдельных логических элементов. Их выходной сигнал зависит только от значений входных сигналов в виде 0 и 1.

Последовательностные логические устройства содержат логические устройства и элементы памяти. Результат их действия зависит как от сигналов на входе, так и от содержания памяти.

1. **Логический элемент ИЛИ** осуществляет операцию дизъюнкции (логическое сложение) по следующим правилам:  $0 + 0 = 0$ ;  $0 + 1 = 1$ ;  $1 + 0 = 1$ ;  $1 + 1 = 1$ .



**Рис. 3.2.** УГО и электрические схемы логических элементов ИЛИ (а), И (б), НЕ (в)

Эта операция математически представляется как двоичное сложение  $Y = X_1 + X_2$  или как логическое сложение  $Y = X_1 \vee X_2$  (где  $\vee$  — символ логического сложения).

Устройство, осуществляющее операцию дизъюнкции, называется логическое ИЛИ. Условное графическое обозначение этого устройства и его схемная реализация на диодах и резисторе показаны на рис. 3.2, а. Если на вход  $X_1$  или  $X_2$  приведенной схемы ИЛИ подать положительное напряжение  $+1$  В, оно автоматически окажется на выходе, т. е.  $Y = +1$ ; то же будет при подаче  $+1$  В на оба входа этой схемы ( $Y = +1$ ).

При 0 или отрицательном напряжении на обоих входах данной схемы на ее выходе будет 0.

Связь между двоичными значениями на входе и выходе логического элемента ИЛИ отражает соответствующая таблица истинности 3.2. Название элемента ИЛИ поясняет его смысловое значение: если на его первом или втором входе появится 1, то и на выходе будет 1.

Логический элемент ИЛИ может иметь не два, а  $n$  входов. При появлении хотя бы на одном из них значения 1 на его выходе формируется 1; если же на всех входах 0, то и на выходе также будет 0. Многовходовое логическое суммирование можно записать в виде

$$Y = \sum_{i=1}^n X_i.$$

Логическое суммирование отличается от обычного суммирования тем, что при любом количестве единичных значений на входах

Таблица 3.2. Таблица истинности логического элемента ИЛИ

$X_1$	$X_2$	$Y$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица 3.3. Таблица истинности логического элемента И

$X_1$	$X_2$	$Y$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

элемента ИЛИ, на его выходе всегда будет одна и та же величина  $Y = 1$ .

2. **Логический элемент И** осуществляет операцию конъюнкции (логическое умножение).

Эта операция математически представляется как двоичное произведение  $Y = X_1 \cdot X_2$  или как логическое умножение  $Y = X_1 \wedge X_2$  (где  $\wedge$  — символ логического умножения). При наличии на входах элемента 0 и 1 результаты логического умножения будут напоминать обычное умножение:  $0 \wedge 0 = 0$ ;  $0 \wedge 1 = 0$ ;  $1 \wedge 0 = 0$ ;  $1 \wedge 1 = 1$ .

Устройство, осуществляющее операцию конъюнкции, называется логическим И. Условное графическое обозначение и схемная реализация этого устройства на диодах и резисторе представлены на рис. 3.2, б.

Если на вход  $X_1$  или  $X_2$  приведенной схемы И подать положительное напряжение +1 В, то на ее выходе все равно будет 0 ( $Y = 0$ ), так как один из диодов замыкается на 0; то же будет при 0 на обоих входах ( $Y = 0$ ). При подаче на оба входа схемы +1 В на ее выходе будет 1 ( $Y = +1$ ).

Связь между двоичными значениями на входе и выходе логического элемента И отражает соответствующая таблица истинности 3.3.

Логический элемент И может иметь не два, а  $n$  входов, и при наличии хотя бы на одном из них значения 0 на его выходе тоже формируется 0; если же на всех входах 1, то и на выходе будет 1. Многovoходовое логическое умножение можно записать в виде следующей формулы:

$$Y = \prod_{i=1}^n X_i.$$

Результаты логического умножения практически не отличаются от результатов обычного умножения. Так, при любом количестве единичных значений на входах, если в произведении есть хотя бы один 0, на выходе будет 0. Только если на все входы подать 1, на выходе будет 1.

3. **Логический элемент НЕ** осуществляет операцию инверсии (логическое отрицание). Здесь слово «инверсия» означает переворачивание, т. е. при 0 на входе схемы НЕ на ее выходе будет 1, и наоборот, если на вход подается 1, на выходе будет 0.

Операция отрицания в булевой алгебре обозначается чертой над символом, т. е. следующим образом:

$$Y = \bar{X}; \bar{1} = 0; \bar{0} = 1.$$

УГО и схемная реализация логического устройства НЕ на основе транзистора представлены на рис. 3.2, в. Если на вход  $X_1$  приведенной схемы НЕ подать положительное напряжение +1 В, транзистор откроется и на ее выходе будет 0 ( $Y = 0$ ), так как транзистор замыкает цепь на землю. Если же на входе схемы 0, то транзистор будет закрыт, а на его выходе будет положительное напряжение, соответствующее 1 (потенциал  $+U$ ).

Транзисторное устройство, схематически представленное на рис. 3.2, в, называется также инвертором (переворачивателем) и часто используется в радиотехнике. Если на вход инвертора подается положительный скачок напряжения, то на выходе получают падение напряжения.

Операция НЕ возможна только для одной переменной  $X$ .

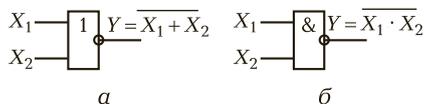
Система, включающая в себя логические элементы И, ИЛИ, НЕ, достаточна для построения любых комбинационных логических устройств и называется функционально полной.

Часто система элементарных логических устройств является избыточной, тогда часть из них можно сократить.

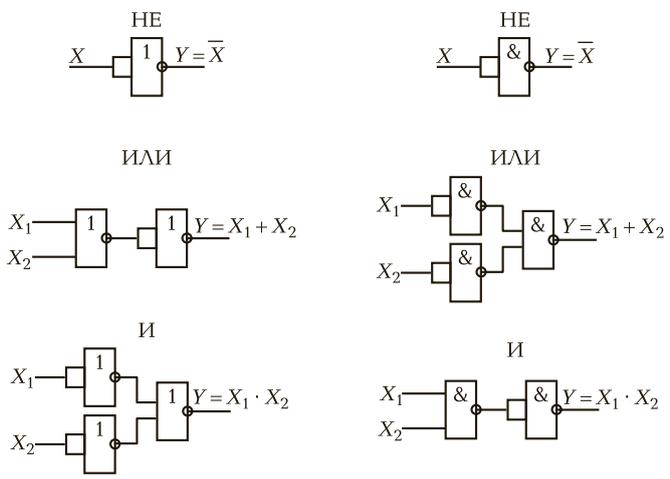
Элементы И, ИЛИ, НЕ можно заменить на комбинации логических элементов И—НЕ и ИЛИ—НЕ.

4. **Логический элемент И—НЕ** реализует логическую функцию (отрицание конъюнкции), обозначается  $Y = X_1 \downarrow X_2$  и называется функцией Шеффера (знак  $\downarrow$  называется штрихом Шеффера).

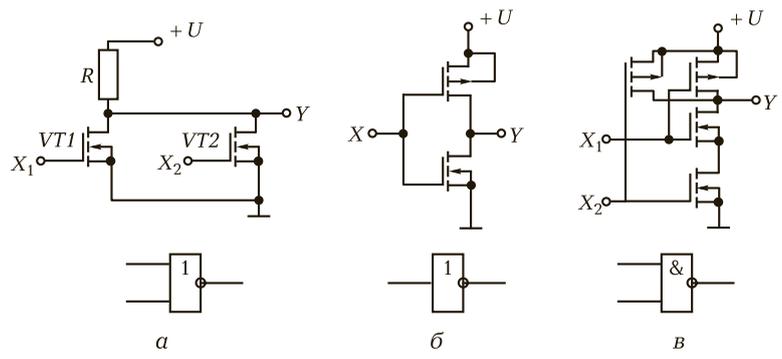
5. **Логический элемент ИЛИ—НЕ**, реализующий логическую функцию (отрицание дизъюнкции), обозначается как  $Y = X_1 \uparrow X_2$



**Рис. 3.3.** УГО универсальных логических элементов ИЛИ—НЕ (а) и И—НЕ (б)



**Рис. 3.4.** Схемы формирования основных логических элементов с помощью ИЛИ–НЕ и И–НЕ



**Рис. 3.5.** Электрические схемы и УГО логических элементов на полевых транзисторах (а) и комплементарных парах (б, в) в интегральном исполнении

и называется функцией Пирса (знак  $\downarrow$  называется стрелкой Пирса).

УГО логических элементов ИЛИ–НЕ и И–НЕ приведены на рис. 3.3. Каждый из этих элементов представляет функционально полную систему, и с их помощью можно сформировать все основные логические элементы (И, ИЛИ, НЕ), как показано на рис. 3.4.

Из логических элементов могут быть созданы различные логические устройства, реализующие логические функции. Результатом действия логических устройств является 0 или 1.

Основные (базовые) логические элементы изготавливаются по планарной микросхемной технологии с использованием резисторов, диодов и транзисторов. Существуют также логические элементы на полевых транзисторных элементах, выполненные по МОП-технологии.

На рис. 3.5 приведены электрические схемы логических элементов ИЛИ—НЕ, НЕ, И—НЕ, выполненных по МОП-технологии. Особенный интерес представляет элемент И—НЕ на комплементарных парах. Он не потребляет энергии ни в одном из состояний, так как при 0 на входах нижняя пара транзисторов перекрывает ток, а при 1 на двух входах закрыты верхние транзисторы.

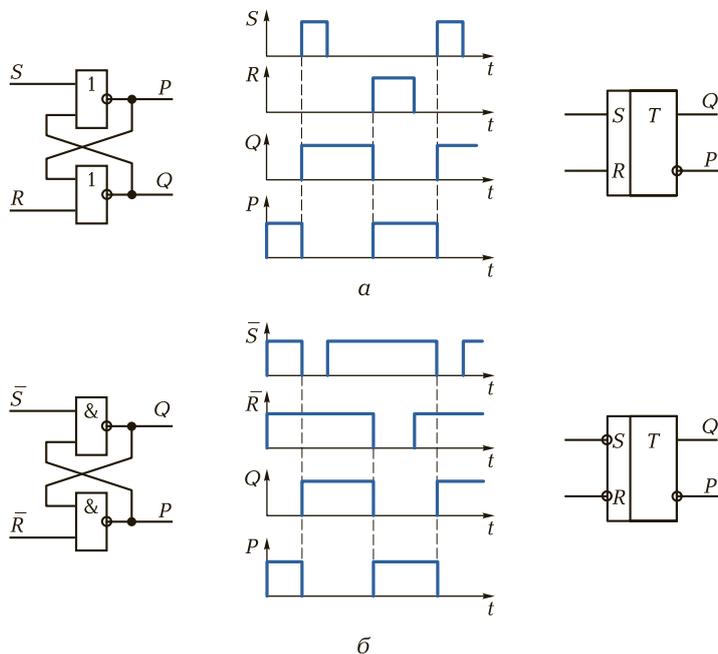
### 3.2.2. Интегральные микросхемы триггеров

Среди электронных ключевых устройств триггеры занимают особое место. Они имеют два устойчивых (стабильных) состояния и потому называются бистабильными устройствами. Переход из одного состояния в другое происходит при подаче запускающего импульса произвольной формы, и новое состояние сохраняется сколь угодно долго. Обычно же электронные ключи моностабильные, так как имеют только одно устойчивое состояние, а в другом (неустойчивом) состоянии они могут быть только до тех пор, пока на входе есть управляющее напряжение.

Свойство бистабильности триггеров используется для запоминания двоичных цифровых сигналов в памяти вычислительных машин. Кроме того, триггеры применяются просто как ключевые каскады для включения и отключения каких-либо устройств, а также как переключатели каналов (коммутаторы).

Переключение триггера происходит очень быстро — скачком. В результате формируются импульсы строго прямоугольной формы с длительностью, равной интервалу времени между запускающими импульсами. Поэтому триггеры часто используют в качестве формирователей или генераторов прямоугольных импульсов. Триггеры, как и импульсные генераторы различных типов, интенсивно развивались в радиотехнических системах и особенно в импульсных радиолокационных системах. Сейчас они находят широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре, измерительной и вычислительной технике, системах передачи информации, технологических установках и бытовой технике.

Рассмотрим симметричные *RS*-триггеры на логических элементах. Схема *RS*-триггера на двух логических элементах ИЛИ—НЕ с прямыми входами приведена на рис. 3.6, а.



**Рис. 3.6.** Схемы, эпюры напряжений и УГО асинхронных триггеров: *a* —  $RS$ -триггера с прямыми входами на логических элементах ИЛИ—НЕ; *б* —  $RS$ -триггера с инверсными входами на логических элементах И—НЕ

Термин «с прямыми входами» означает, что при подаче на входы  $R$  или  $S$  данного триггера положительного единичного импульса он будет вести себя так, как симметричный  $RS$ -триггер на транзисторах.

Триггер имеет два входа  $S$  и  $R$  (от англ. *set* — установить и *reset* — сброс) и два выхода — прямой  $Q$  и инверсный  $P$ . При подаче единичного напряжения на вход  $S$  триггер перейдет в состояние  $Q = 1$ ,  $P = 0$ . При подаче импульса на вход  $R$  он перейдет в состояние  $Q = 0$ ,  $P = 1$ . Если далее подать импульс на вход  $S$ , то триггер вернется в состояние  $Q = 1$ ,  $P = 0$ .

Следуя таблице истинности логических элементов ИЛИ—НЕ, можно представить состояния  $RS$ -триггера в виде табл. 3.4.

Переходы триггера из одного состояния в другое поясняются эпюрами напряжений данного триггера. Поскольку симметричный  $RS$ -триггер имеет два устойчивых состояния, то значения на выходах  $Q$  и  $P$  обязательно будут противоположными, т. е. в терминах булевой (бинарной) алгебры состояние  $P$  является отрицанием со-

Таблица 3.4. Состояния и переходы RS-триггера

Сигналы на входах		Сигналы на выходах		Действие
$S$	$R$	$Q$	$P$	
1	0	1	0	Переключение
0	0	1	0	Сохранение
0	1	0	1	Переключение
0	0	0	1	Сохранение
1	1			Не определенные

стояния  $Q$ . Рассмотрим работу триггера более детально с использованием представленных эпюр напряжений.

При подаче на вход  $S$  положительного импульса триггер переходит в состояние  $Q = 1$  и  $P = 0$  и может находиться в этом состоянии неограниченно долго. Если снова подать на вход  $S$  положительный импульс, то состояние триггера не изменится, так как при появлении на любом его входе 1 на выходе верхнего логического элемента ИЛИ—НЕ будет 0, а значение 1 уже поддерживается на выходе  $Q$  нижнего логического элемента. Только при подаче на вход  $R$  положительного импульса, соответствующего 1, сработает нижний логический элемент и на выходе  $Q$  появится 0, а при условии, что на входе  $S$  будет 0, на выходе  $P$  появится 1, т. е. триггер переключится в новое устойчивое состояние.

Если на оба входа триггера подается нулевой входной сигнал, то на его выходах сохраняется то положение, которое установилось последним. Такой режим (режим хранения информации) может сохраняться триггером сколь угодно долго. Это свойство триггеров используется для создания оперативной памяти вычислительных машин и хранения цифровых данных в двоичной системе счисления.

Если же на оба входа триггера подается единичный сигнал, то на обоих его выходах будет нулевое значение до тех пор, пока не закончится действие одного из сигналов. Окончательные значения сигналов на выходах триггера будут определяться сигналом, который закончится позже.

Каждый логический элемент имеет определенное время срабатывания, и для надежного перехода триггера из одного состояния в другое необходимо время, равное удвоенному времени срабатывания одного логического элемента. Это время и определяет скорость и допустимую частоту переключения триггера на логических элементах.

Схема RS-триггера с инверсными входами на логических элементах И—НЕ приведена на рис. 3.6, б. Схема соединений элементов И—НЕ аналогична схеме соединений в триггере с прямыми входами на элементах ИЛИ—НЕ, однако выполняемые здесь функции другие. Чтобы этот триггер работал как обычный RS-триггер, необходимо поставить на входы инверторы.

Существуют различные конструкции и схемные реализации триггеров, зависящие от их назначения и используемой элементной базы. Имеется также целый класс последовательностных цифровых устройств, в которых триггеры являются элементами памяти.

Интегральные триггеры, выполняемые, как правило, в виде микросхемы с несколькими триггерными ячейками, состоят из самого триггера и вспомогательных логических элементов управления его входами (схемы входной логики). В зависимости от структуры схемы входной логики различают триггеры с разными функциональными возможностями, т. е. разные типы триггеров: *RSC*, *D*, *E*, *T*, *JK* и др.

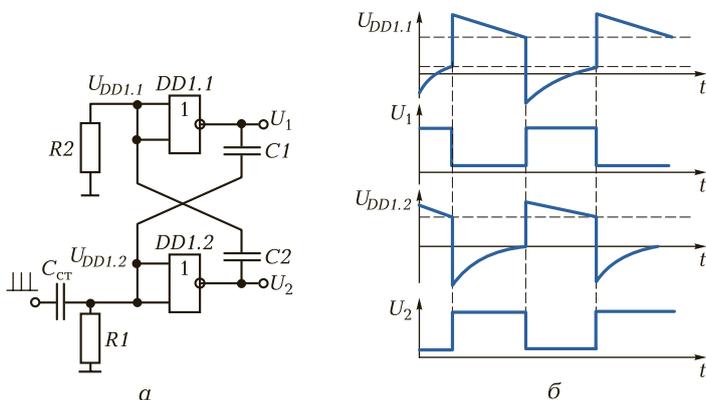
По способу управления триггеры подразделяют на асинхронные (*RS*) и синхронные (тактируемые, *RSC*). Переключение (или опрокидывание) асинхронных триггеров происходит непосредственно с поступлением входного сигнала на их информационный вход. Переключение синхронных триггеров, имеющих дополнительный вход *S* для подачи тактового импульса, происходит только при одновременном поступлении входного и тактового импульсов на информационные входы.

Существуют одноктактные (обозначаемые *T*) и двухтактные, или двухступенчатые (обозначаемые *TT*), триггеры. Одноктактные триггеры переключаются по переднему фронту тактового импульса, а двухтактные — по его срезу.

На базе тактируемого *JK*-триггера можно реализовать *T*-триггер, *D*-триггер задержки и *DV*-триггер с блокировкой, т. е. этот триггер является универсальным.

### 3.2.3. Мультивибраторы на логических элементах

Электрическая схема мультивибратора на параллельном соединении логических элементов И—НЕ приведена на рис. 3.7. Кроме того, в схеме имеются две *RC*-цепи *R1*, *C1* и *R2*, *C2*, являющиеся, как и в мультивибраторе на транзисторах, времязадающими релаксационными элементами. Через конденсаторы также осуществляется связь выхода одного логического элемента с входом другого,



**Рис. 3.7.** Схема (а) и эпюры напряжений (б) мультивибратора на двух логических элементах, включенных параллельно

создающая петлю положительной обратной связи. Приведенные эпюры напряжений характеризуют работу отдельных элементов устройства.

Данный мультивибратор имеет два квазиравновесных состояния. В исходном состоянии логический элемент  $DD1.1$  отключен, а логический элемент  $DD1.2$  включен. Инвертированный сигнал на выходе элемента  $DD1.1$  равен 1 и, следовательно, конденсатор  $C1$  начинает заряжаться через резистор  $R1$ . Падение напряжения на резисторе  $R1$  создает положительный потенциал и поддерживает логический элемент  $DD1.2$  во включенном состоянии. При этом на выходе  $DD1.2$  инвертированный сигнал равен нулю и напряжение на обкладках конденсатора  $C2$  также равно нулю.

Постепенно напряжение на обкладках конденсатора  $C1$  приближается к единичному уровню, и ток, протекающий через резистор  $R1$ , уменьшается. При этом напряжение на резисторе  $R1$  уменьшается и после некоторого критического уровня начинает восприниматься логическим элементом  $DD1.2$  как логический 0. Логический элемент  $DD1.2$  выключается, и на его выходе инверсное значение становится равным 1. Этот скачок напряжения проходит через конденсатор  $C2$  и включает логический элемент  $DD1.1$ , на выходе которого появляется 0.

После завершения переключения элемента  $DD1.1$  начнет заряжаться конденсатор  $C2$ , поддерживая его в включенном состоянии за счет падения напряжения на сопротивлении  $R2$ . Пока конденсатор  $C2$  заряжается, конденсатор  $C1$  будет разряжаться, создавая отрицательный потенциал на входе логического элемента  $DD1.2$ .

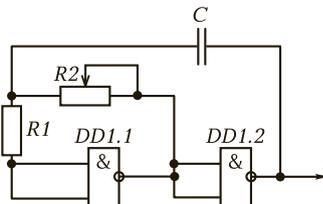
Мультивибратор будет находиться в устойчивом состоянии до тех пор, пока конденсатор  $C2$  насыщается. После этого напряжение на резисторе  $R2$  приблизится к значению, соответствующему логическому 0, и элемент  $DD1.1$  отключится. Мультивибратор снова переключится в первоначальное состояние, и далее процессы будут циклически повторяться.

Таким образом, в мультивибраторе будет поддерживаться автоколебательный режим перехода из одного временно устойчивого состояния в другое. Причем время сохранения каждого устойчивого состояния будет определяться временем заряда (релаксации) конденсаторов  $C1$  и  $C2$  через сопротивления  $R1$  и  $R2$ . Для стабилизации частоты мультивибратора через конденсатор  $C_{ст}$  подаются импульсы более высокой частоты от кварцевого генератора.

Рассмотрим теперь мультивибратор, работающий на двух логических элементах И—НЕ, соединенных последовательно по схеме, представленной на рис. 3.8.

При включении питания на логический элемент  $DD1.1$  подается слабое положительное напряжение и он включается. Вследствие инвертирования на выходе  $DD1.1$  будет логический 0, а на выходе  $DD1.2$  — логическая 1. При этом конденсатор  $C$  начнет заряжаться через резистор  $R$ . Во время зарядки конденсатора  $C$  на входе логического элемента  $DD1.1$  будет сохраняться положительный потенциал из-за падения напряжения на резисторе  $R$ . По мере насыщения конденсатора ток в цепи будет уменьшаться, а падение напряжения на резисторе приблизится к пороговому значению, которое логический элемент  $DD1.1$  начнет воспринимать как логический 0. Затем логический элемент  $DD1.1$  переключится, на его выходе появится 1, а на выходе логического элемента  $DD1.2$  — 0.

После переключения  $DD1.1$  конденсатор  $C$  начнет разряжаться через резистор  $R$  под действием напряжения высокого уровня на выходе  $DD1.2$ . Конденсатор будет разряжаться до появления на входе элемента  $DD1.1$  потенциала, воспринимаемого им как логическая 1. После чего  $DD1.1$  опять переключится во включенное положение, на его выходе появится логический 0, а на выходе  $DD1.2$  — логическая 1. Затем конденсатор снова начнет заряжаться,



**Рис. 3.8.** Схема мультивибратора, работающего на двух логических элементах И—НЕ, соединенных последовательно

мультивибратор будет находиться в устойчивом состоянии до следующего переключения (опрокидывания).

Время заряда и время разряда конденсатора почти одинаковое, так как конденсатор  $C$  заряжается и разряжается через один резистор  $R$ . В результате на выходе такого мультивибратора получают меандровую последовательность прямоугольных импульсов. Если необходимо получить последовательность коротких импульсов с большой скважностью, параллельно резистору  $R$  подключают диод и резистор с малым сопротивлением, чтобы заряд конденсатора проходил быстрее, чем разряд. Примерные значения параметров:  $C = 1,0$  мкФ,  $R_1 = 100$  кОм,  $R_2 = 10$  кОм.

Недостатком мультивибратора на логических элементах, как и других мультивибраторов на сосредоточенных активных элементах с релаксационными  $RC$ -цепями, является нестабильность частоты и длительности импульсов. В связи с этим необходимо применять методы стабилизации частоты.

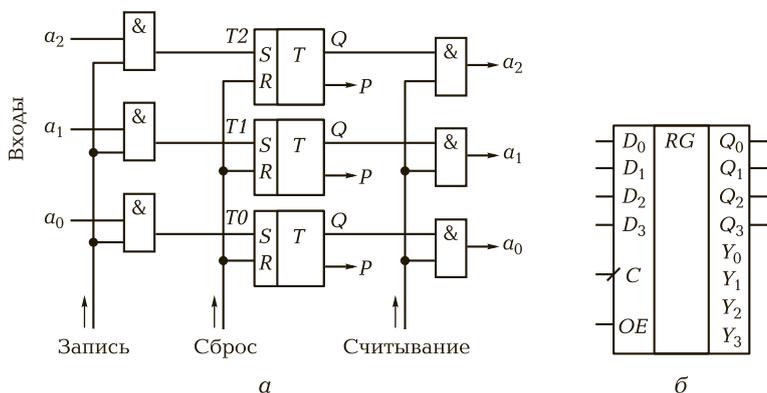
Характер изменения напряжения на входе логического элемента  $DD1.1$  (см. рис. 3.8) показывает, что этот мультивибратор может использоваться и как генератор линейно изменяющихся напряжений (ГЛИН).

### 3.2.4. Регистры памяти, кодеры и мультиплексоры

В табл. 2.1 показано, как целое положительное десятичное число  $N$  можно представить в двоичном виде. Для отображения двоичных чисел необходим набор устройств, имеющих два значения 0 или 1. Таким устройством является триггер. При этом число триггеров должно быть равно числу разрядов двоичного кода.

**Регистр** — устройство для выражения числа  $N$  в двоичном виде, состоящее из триггеров. После записи в регистр двоичного числа с заданным числом разрядов это число может храниться в регистре до тех пор, пока не будут изменены состояния триггеров. Информация в регистре, построенном на триггерах, может храниться сколько угодно долго, т. е. регистр является элементом памяти (устройством хранения информации). Схема устройства памяти на основе регистра параллельного действия приведена на рис. 3.9.

Устройство работает следующим образом. Запись и считывание проводятся по всем разрядам одновременно. По команде сброса триггеры переходят в нулевое состояние. Например, при записи числа 5 триггеры переводятся в состояние, соответствующее числу 101, задаваемому на входе. Хранение числа в таком состоянии может



**Рис. 3.9.** Схема [а] и УГО [б] устройства запоминания на основе регистра параллельного действия

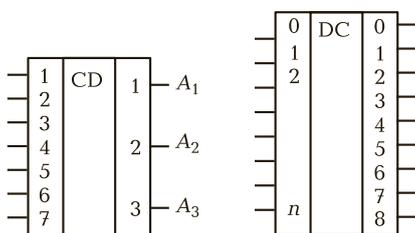
быть сколь угодно долгим. Импульс считывания создает на выходе параллельный код 101 (одновременно).

Иногда для вычислений требуется выполнить обращение кода, т. е. получить обратный код, называемый также инвертированным. Для этого используют триггеры со счетным входом.

Для получения обратного кода используется импульс обращенного кода, который дает инверсию  $Q_i$ . Повторная подача этого импульса восстанавливает код. Обращенный код используется для проведения операции сложения положительных и отрицательных двоичных чисел.

**Шифраторы и дешифраторы** — устройства, преобразующие числа из десятичной системы счисления в двоичную, и наоборот, из двоичной в десятичную. В зарубежной терминологии они обозначаются как кодер (CD) и декодер (DC). Для лучшего понимания работы этих устройств рассмотрим сначала шифратор.

**Ш и ф р а т о р ы** (кодеры CD) — это устройства, преобразующие числа из десятичной системы счисления в двоичную кодовую комбинацию. Число входов в шифраторах равно числу возможных десятичных чисел, а число выходов — разрядности формируемого кода. Эти устройства вырабатывают двоичный код числа, соответствующий номеру возбужденного входа (рис. 3.10). Двоичный код формируется на выходе только в том случае, если на вход поступает сигнал синхронизирующего импульса. Например, если при сигнале синхронизирующего импульса  $Z = 1$  на входе 5 шифратора есть напряжение, соответствующее уровню логической 1, а на остальных входах при этом 0, то на выходе появится комбинация 101.



**Рис. 3.10.** УГО микросхем шифратора (CD) и дешифратора (DC) на логических элементах

Дешифраторы (декодеры DC) — это устройства, распознающие двоичные кодовые комбинации и преобразующие их в десятичное число. Дешифраторы имеют число входов, равное разрядности принимаемого двоичного кода, и число выходов, равное числу возможных кодовых комбинаций (т. е. числу возможных десятичных чисел). Эти устройства вырабатывают единичный сигнал на каждом выходе только в том случае, если на их вход поступает код числа, соответствующий номеру этого выхода (см. рис. 3.10). Например, если на вход подана комбинация 101, то на выходе 5 дешифратора появится логическая 1, а на остальных будут 0.

**Мультиплексор** (объединитель) объединяет сигналы от  $k$  входов нескольких устройств в один канал (одну шину). Например, логические сообщения от устройств  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$  подаются последовательно во времени к общей выходной шине  $X_C$ .

**Демультимплексор** (распределитель) распределяет входной поток импульсов в зависимости от значения управляющего сигнала. Например, последовательность логических сообщений  $Y_C$  распределяется последовательно во времени сначала на выход  $Y_1$ , а затем на выходы  $Y_2, Y_3, \dots, Y_k$ .

Распределитель имеет  $k$  выходов. При числе импульсов  $i > k$  их передача блокируется. В циклических распределителях импульс  $k + 1$  подается на 1-й выход,  $k + 2$  — на 2-й и т. д., т. е. цикл повторяется.

Мультиплексор и демультимплексор импульсов, как правило, работают в паре и служат для передачи информации по одному каналу в режиме уплотнения (временные уплотнители). Наибольшее распространение они получили при передаче телефонных сообщений в режиме временного уплотнения на радиочастотных каналах. При этом происходит уплотнение каналов во времени, т. е. сравнительно медленные изменения голосовых звуков кодируются в виде двоичных цифр и передаются последовательно сначала от первого, затем от второго, третьего и так до 12-го абонента. На другом конце линии происходит распределение информации соответственно по абонентам — потребителям сообщений.

### 3.2.5. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) служат для преобразования непрерывно изменяющегося напряжения  $y = f(t)$  (аналогового значения) в двоичные цифровые коды. Обратное преобразование из цифрового кода в эквивалентное напряжение осуществляют с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП).

АЦП необходимы при обработке информации на ЭВМ, так как информация, с которой оперирует ЭВМ, должна быть в двоичной цифровой форме, а исходные данные от датчиков и других периферийных устройств обычно поступают в аналоговой форме в виде изменений токов или напряжений.

Процесс аналого-цифрового преобразования включает в себя следующие стадии:

- дискретизацию (разбиение, квантование) функции во времени (выбор интервала квантования и проведение измерений сигнала через равные интервалы времени);
- квантование сигнала по уровню (выбор интервала квантования по уровню и разбиение диапазона измерений по уровням);
- кодирование (преобразование значения функции в двоичный цифровой код).

Минимальный интервал дискретизации определяют исходя из теоремы Котельникова:  $\Delta t = 1/(2f_b)$ , где  $f_b$  — верхняя, значимая частота.

Операция дискретизации заключается в определении числовых значений функции  $y = f(t)$  в моменты времени  $t_1, t_2, t_3, s \dots, t_n$  через интервал  $\Delta t$ . В результате дискретизации получают набор значений функции  $f(t_1), f(t_2), s, f(t_n)$  с шагом дискретизации  $\Delta t$ .

Операция квантования по уровню заключается в выборе интервала квантования  $\Delta U$  и разбиении диапазона измерений по уровням от  $f_{\min}(t_1)$  до  $f_{\max}(t_1)$ . В некоторых АЦП предусмотрены устройства квантования (квантизаторы), учитывающие предельные значения функции. Обычные АЦП изготавливают с учетом того, что на их вход подается ТТЛ-сигнал уровня  $\pm 5$  В (или уровня питания операционных усилителей  $\pm 15$  В), и этот интервал разбивается с учетом разрядности кода на выходе АЦП. В простейших АЦП применяется восьмиразрядный код, обеспечивающий точность измерения 0,4 % и 256 уровней градаций. Таким образом, для диапазона  $\pm 5$  В интервал квантования  $\Delta U$  составляет  $2,12 \cdot 10^{-2}$  В, а для диапазона  $\pm 15$  В —

$6,36 \cdot 10^{-2}$  В. Эти значения и будут определять методическую погрешность, возникающую при квантовании сигнала.

Заключительным этапом аналого-цифрового преобразования является определение уровня напряжения сигнала и формирование соответствующего двоичного цифрового кода.

**АЦП на основе преобразования напряжение—частота** формируют импульсы, частота которых пропорциональна входному напряжению, и широко используются при необходимости перехода от аналогового сигнала (напряжения) к цифровому, выражаемому числом импульсов в единицу времени. Принцип определения состоит в том, что для определения двоичного кода, соответствующего напряжению на входе АЦП, происходит подсчет числа импульсов за определенный интервал времени двоичным счетчиком. Чем больше напряжение на входе АЦП, тем чаще идут импульсы и больше число на выходе счетчика.

Передача сигналов от датчиков на большие расстояния также предпочтительнее в частотной форме, так как она более помехоустойчива.

В **АЦП последовательного счета** используется двоичный счетчик для подсчета импульсов от генератора тактовых импульсов. Результат счетчика преобразуется в напряжение с помощью ЦАП, которое сравнивают в компараторе с цифруемым напряжением. Когда они сравниваются, двоичный код счетчика является цифровым эквивалентом напряжения на выходе ЦАП, а, следовательно, и напряжения  $U_{вх}$  на входе АЦП. АЦП рассмотренного типа используются довольно широко, так как обладают достаточно высоким быстродействием при относительно простой структуре. Современные восьмиразрядные АЦП имеют достаточно высокую скорость и обеспечивают преобразование радиосигналов с частотой до 10 МГц. Существуют также сверхбыстродействующие четырехразрядные АЦП на квантовых интегрально-оптических устройствах, позволяющие обрабатывать сигналы с частотой до 1 ГГц.

**Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП)** осуществляют действие обратное АЦП, т. е. преобразуют цифровой двоичный код в соответствующее значение напряжения. Такое преобразование необходимо, например, для восстановления звука из цифровой записи на диске. Применяется оно и для восстановления изображения на дисплее ЭВМ или экране телевизора при использовании каналов цифрового телевидения.

Электрические схемы ЦАП реализуют в виде интегральных схем с набором сопротивлений. Схема с резисторами веса включает на-

бор электронных ключей, соответствующих двоичному коду, и мгновенно формирует напряжение на выходе.

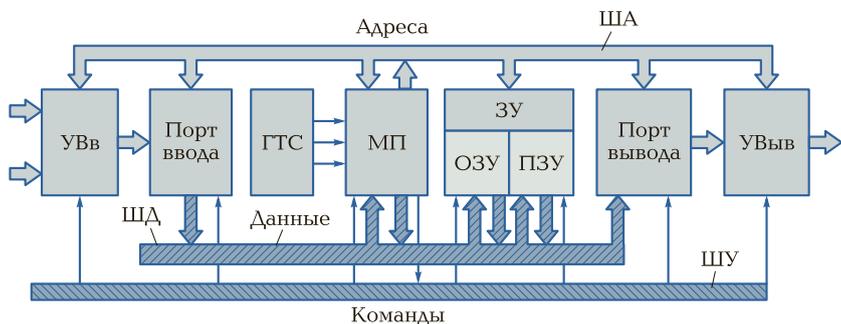
### 3.3. МИКРОПРОЦЕССОРЫ, МИКРОЭВМ И ПЕРСОНАЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ

В настоящее время электронные цифровые вычислительные машины находят широкое применение в различных производственных системах управления и в быту. В информационных и управляющих системах используют управляющие и вычислительные машины разного уровня.

**Микропроцессор** выполняет простые логические и арифметические операции с двоичными числами, имеет систему команд и тактовых прерываний, систему входных и выходных контактов для связи с другими устройствами. Как правило, он выполнен на одном кристалле, оформлен в виде одной микросхемы. Устройства, работающие с микропроцессором, снабжаются генератором тактовых импульсов на основе задающего кварцевого генератора (синхронизатора) и микросхемами памяти.

Однокристалльная микроЭВМ — имеет микропроцессор и встроенные элементы памяти. Фактически это малая вычислительная машина, выполненная в виде одной микросхемы. Содержит процессор, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), имеет контакты для подключения к внешнему запоминающему устройству. Она имеет также свою систему команд и тактовых прерываний, систему входных и выходных контактов для связи с другими устройствами. Различными способностями обладают 8-разрядная и 16-разрядная однокристалльная микроЭВМ.

**Контроллер** — это однокристалльная микроЭВМ с встроенными дополнительными элементами для приема информации от нескольких аналоговых (8 или 16) и логических датчиков (8 или 16). Логические датчики — это датчики, принимающие два значения: 0 — закрыто (выключено), 1 — открыто (включено). К встроенным устройствам относятся мультиплексор (для последовательного опроса датчиков), аналого-цифровой преобразователь, элементы ввода и вывода команд и данных. К подключаемым устройствам относятся: генератор тактовых импульсов, элементы питания, согласующие элементы к устройствам ввода-вывода.



**Рис. 3.11.** Структурная схема контроллера:

УВв — устройство ввода данных в процессор; ГТС — генератор тактовых сигналов; МП — микропроцессор; ЗУ — запоминающее устройство; ОЗУ — оперативное запоминающее устройство; Увыв — устройство вывода данных; ША — шина адресов; ШД — шина данных; ШУ — шина управляющих команд

Структурная схема контроллера приведена на рис. 3.11. В настоящее время они широко используются в промышленных системах управления и выполняются в виде больших интегральных микросхем (БИС или микроЭВМ на одном кристалле). Они используются в системах сбора информации и как управляющая вычислительная машина (УВМ).

Входное устройство УВв служит для согласования данных при вводе в процессор. УВв имеет входы от 16 логических датчиков (обычно это контактные соединения: 1 — да, есть контакт; 0 — нет, нет контакта) и 8 входов от аналоговых датчиков, встроенный мультиплексор и аналого-цифровой преобразователь. Устройство связи с объектом УВыв имеет встроенный цифроаналоговый преобразователь.

Контроллер, управляющая микроЭВМ — это устройство на основе МП, а также запоминающих устройств (ЗУ), устройств управления и средств связи с периферийными устройствами (интерфейс). Управляющая микроЭВМ должна иметь средства сопряжения с объектом управления датчиками, АЦП, ЦАП. Совокупность микроЭВМ и средств сопряжения образует микропроцессорную систему сбора информации, или систему управления.

Рассмотрим подробнее структурную схему контроллера (см. рис. 3.11).

В качестве УВв служат магнитные головки, фотодиоды и АЦП. В качестве УВыв — дисплеи, формирователи сигналов для печатающих устройств, ЦАП и т. п. Порты ввода и вывода предназначены

для кратковременного хранения информации в процессе ввода, вывода и переключения каналов.

Входная информация делится на данные, над которыми выполняются операции, и программу, т. е. последовательность команд, описывающих выполняемые операции. Данные и программа задаются совокупностью двоичных чисел с числом разрядов, кратным 8 (1 байт).

Данные УВв поступают в порт ввода. Сигналы управления выбирают необходимый порт, обеспечивают запись данных, временное хранение в порте, а затем их передачу в шину данных (ШД), состоящую из совокупности  $m$  проводящих линий и обеспечивающую передачу  $m$ -разрядного слова. При магистральной организации связей элементы контроллера подключаются к общим магистралям — шине данных, шине команд и шине адресов.

Передача данных из порта ввода идет через буферные усилители, которые могут находиться в одном из трех состояний: 1 — передача данных в магистраль; 2 — прием данных из магистрали; 3 — отключение от магистрали.

Одни сигналы управления от микропроцессора задают режим передачи информации в магистраль, другие — в режим приема информации или отключения ввода. Для того чтобы работа МП не зависела от быстродействия УВв, данные и программа перед ее выполнением записываются в ОЗУ контроллера. Объем ОЗУ для микроЭВМ составляет единицы и десятки килобайт (1 Кбайт =  $2^{10}$  байт, т. е. 1 024 восьмиразрядных слова). Кроме того, может подключаться внешняя флэш-память, или внешний жесткий диск.

Микропроцессор (МП) работает в следующей последовательности:

1) считывание команды из памяти; при этом номер ячейки памяти, где хранится первая команда, заносится в счетчик команд, а после выполнения команды число в счетчике автоматически увеличивается на 1, что обеспечивает последовательность выполнения следующей команды программы;

2) при каждом положении счетчика команд происходит считывание из памяти следующей информации: кода операции, которая выполняется по данной команде, и числа, над которым команда выполняется, или его адреса;

3) проводится выполнение команды.

После выполнения команды выполняется «считывание» из следующей ячейки памяти, и цикл повторяется. Устройство управления с помощью генератора тактовых сигналов (ГТС) обеспечивает требуемую последовательность работы и выполнение этапов команды.

Выполнение одной команды происходит за несколько машинных циклов, каждый из которых содержит несколько циклов работы кварцевого ГТС.

Команды в МП представляются в виде двоичных восьмиразрядных слов. Команда записывается вместе с адресами ячеек памяти, где хранятся числа. Программа может быть записана непосредственно в машинных командах, однако этот процесс очень сложен и утомителен. Кроме того, возникают трудности при отладке программы. Для упрощения программирования используют компилирующие языки типа Ассемблер, Фортран, ПЛ. При этом перевод программы в машинные команды существенно увеличивает число выполняемых команд, и время обработки данных увеличивается. Поэтому для контроллеров, обрабатывающих данные от быстропротекающих процессов, необходимо программирование в машинных командах.

Контроллеры постоянно усложняются, и существует много их модификаций. Они имеют устройства для обмена данными с центральным процессором (диспетчерской ЭВМ). Обычно в автоматизированной системе управления (АСУ) содержится много контроллеров (УВМ). Связь с центральным процессором может быть непосредственной и через общую шину данных (магистральный интерфейс).

**Персональный компьютер** — полноценная стационарная цифровая вычислительная машина с блоком питания, материнской платой, жестким диском, блоками ввода-вывода информации на оптических и магнитных дисках. На материнской плате располагаются основные элементы цифровой электроники: центральный процессор в виде сверхбольшой интегральной схемы (СБИС); элементы оперативной памяти и постоянной памяти; видеокарты и звуковые карты со своими микропроцессорами; встроенный кварцевый генератор с множителем частоты. Современные персональные компьютеры имеют устройства и розетки для подключения периферийных устройств — печати, звуковых колонок, сканеров. Имеются также универсальные розетки для подключения к основной шине обмена информации (USB-порты), к которым подключаются внешние устройства портативной памяти (флэш-память) или автономные жесткие диски.

**Центральный процессор** — основная микросхема компьютера, в которой и производятся все вычисления. В современном компьютере существует главный, т. е. центральный процессор (CPU), и несколько вспомогательных (в видеокarte, звуковой карте и т. п.). Так как CPU — это цельная однокристалльная микросхе-

ма его обычно называют микропроцессором, хотя это не тот микропроцессор, который используется в простых микроЭВМ и в контроллерах.

Тип установленного в компьютере центрального процессора является главным фактором, определяющим качество ПК. Именно от него зависят вычислительные возможности компьютера. В зависимости от типа используемого процессора и его архитектуры зависят все параметры и характеристики компьютера.

**Быстродействие** процессора — это число элементарных операций, выполняемых микропроцессором в единицу времени (операций в секунду).

**Разрядность** процессора — максимальное количество разрядов двоичного кода, которые могут обрабатываться или передаваться одновременно.

**Архитектура** процессора включает в себя систему команд, способы адресации, возможность совмещения выполнения команд во времени, наличие дополнительных устройств в составе микропроцессора, принципы и режимы его работы. Различают по особенностям архитектуры следующие типы микропроцессоров:

- VLIW со сверхбольшим командным словом;
- CISC с полным набором системы команд;
- RISC с усеченным набором системы команд;
- MISC с минимальным набором системы команд.

В состав центрального процессора входят следующие устройства:

- арифметико-логическое устройство (выполняет все арифметические и логические операции над числовой, логической и символьной информацией);
- устройство управления (координирует взаимодействие различных частей компьютера);
- микропроцессорная память (предназначена для кратковременного хранения, записи и выдачи информации, используемой в вычислениях непосредственно в ближайшие такты выполнения команд);
- кэш-память (буферная память) — своеобразный накопитель для данных;
- шины команд, адресов и данных.

Устройство управления выполняет следующие основные функции:

- формирует и подает во все блоки процессора в нужные моменты времени определенные сигналы управления (управляющие импульсы), обусловленные спецификой выполнения различных операций;
- формирует адреса ячеек памяти, используемых выполняемой операцией, и передает эти адреса в соответствующие блоки процессора;
- получает от генератора тактовых импульсов последовательность импульсов, по которым подает управляющие импульсы во все блоки процессора.

Микропроцессорная память строится на внутренних регистрах и используется для обеспечения высокого быстродействия компьютера, так как основная память не всегда обеспечивает скорость записи, поиска и считывания информации, необходимую для эффективной работы быстродействующего микропроцессора. Данные, попавшие в некоторые регистры, рассматриваются не как данные, а как команды, управляющие обработкой данных в других регистрах.

В современных процессорах используется два типа кэш-памяти: первого уровня — небольшая (несколько десятков килобайт) сверхбыстрая память, и второго уровня — чуть помедленнее, зато больше — от 128 Кбайт до 2 Мбайт.

Шина команд предназначена для передачи управляющих сигналов к памяти и устройствам ввода-вывода. Эти сигналы указывают направление передачи данных (в процессор или из него)

Шина адресов предназначена для передачи адреса. Используется ЦП для выбора требуемой ячейки памяти или устройства ввода-вывода путем установки на шине конкретного адреса, соответствующего одной из ячеек памяти или одного из элементов ввода-вывода, входящих в систему.

Шина данных — информационная магистраль, благодаря которой процессор может обмениваться данными с другими устройствами компьютера.

Кварцевый генератор тактовых импульсов генерирует последовательность электрических импульсов, определяющих такт работы процессора. Частота генерируемых импульсов определяет тактовую частоту процессора и всей вычислительной машины. Промежуток времени между соседними импульсами определяет время одного такта работы машины, или, просто, такт работы машины.

Основная особенность центрального процессора — его универсальность. При наличии соответствующего программного обеспе-

чения центральный процессор может выполнять любую работу, в то время как специализированные процессоры имеют ограниченные функции.

На основе современных СБИС микропроцессоров Pentium, Android и других изготавливают разнообразные современные компьютеры разных модификаций.

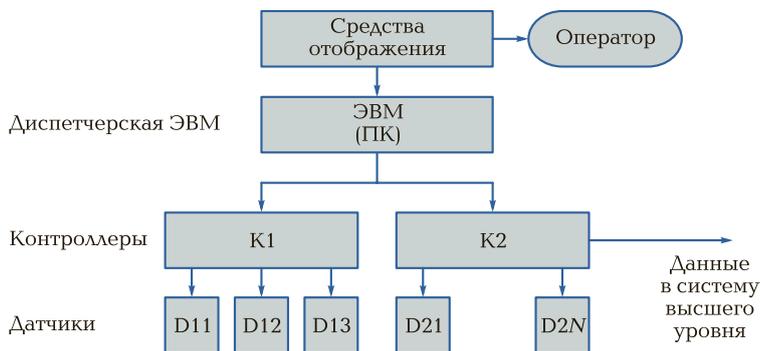
Аналогичную архитектуру имеют переносные и портативные компьютеры:

- ноутбук — переносный портативный персональный компьютер. Выполняет все функции стационарного персонального компьютера и возможности подключения внешних устройств;
- планшетные компьютеры — портативные персональные компьютеры. Вначале появились портативные черно-белые планшетные компьютеры с ограниченными возможностями — только для чтения книг. Современные планшетные компьютеры имеют цветной экран и выполняют практически все функции стационарного персонального компьютера. Они не имеют жесткого диска, но имеют встроенные устройства памяти (типа флэш-памяти) емкостью до 40 Гбайт, позволяющие хранить большие объемы информации. Имеют также USB-порт для подключения внешних устройств портативной памяти и выход на радиоканал сети Интернет. Они настолько совершенны, что начинают вытеснять ноутбуки и стационарные компьютеры;
- смартфоны — портативные однокристалльные ЭВМ, встроенные в переносные сотовые телефоны. Смартфоны оснащены цветным экраном, сенсорным управлением, встроенным фотоаппаратом, имеют связь по радиоканалу с сетью Интернет.

### 3.4. ИНФОРМАЦИОННЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

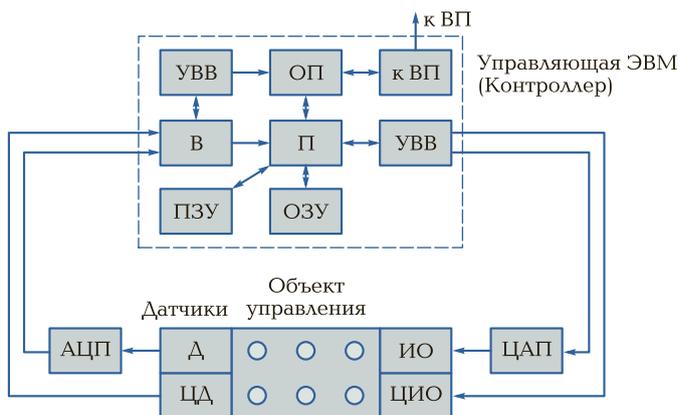
Структура информационных и управляющих систем определяется их назначением и выполняемыми функциями. Например, существуют системы сбора информации, состоящие из чувствительных элементов (сенсоров) и преобразователей, которые часто называют датчиками.

Структурная схема системы сбора информации представлена на рис. 3.12. Управление системой осуществляется диспетчерской ЭВМ, которая запрашивает данные от контроллеров K1 и K2, проводит



**Рис. 3.12.** Структурная схема системы сбора информации

предварительную обработку данных от датчиков  $D_{ij}$ , хранение информации и представление данных на экране монитора (средства отображения) в удобном для оператора виде. Контроллеры проводят опрос нескольких датчиков  $D_{ij}$ , оцифровку получаемых сигналов, простейшую обработку и хранение данных до запроса от диспетчерской ЭВМ и передачу данных по запросу.



**Рис. 3.13.** Структурная схема системы автоматического управления с контроллером:

П — процессор; ПЗУ и ОЗУ — постоянное и оперативное запоминающее устройства соответственно; Д и ЦД — датчики аналоговые и цифровые соответственно; ИО и ЦИО — исполнительные устройства аналоговые и цифровые соответственно; УВВ — устройство ввода и вывода; ОП — оперативная память; ВП — внешний процессор; В — устройство ввода

В отличие от системы сбора информации, система управления (рис. 3.13) содержит дополнительно средства управления и исполнительные устройства, действующие на объект управления. Оператор может контролировать процесс управления и менять параметры системы. Как видно на схеме, информационные потоки играют важную роль в системе управления.

Кроме информационных и управляющих систем существуют системы автоматизированного управления (САУ) объектами, в которых нет оператора, а процесс управления осуществляется полностью в автоматическом режиме.

Макроструктура более сложных автоматизированных систем управления (АСУ) предприятиями и организациями имеет несколько подсистем, которые содержат САУ более простых систем низшего уровня, которые сами могут быть довольно сложными информационно-управляющими системами.

Соединение управляющих ЭВМ и диспетчерской ЭВМ образует вычислительную сеть, объединенную магистральным интерфейсом.

*Интерфейс* — совокупность унифицированных аппаратных, программных и конструкторских средств, осуществляющих взаимодействие модулей ЭВМ и внешних устройств.

Необходимо отметить интенсивное развитие и совершенствование отраслевых информационных вычислительных систем (банковских, коммунальных, военных, электроэнергетических и т. п.). Специфика корпоративных и служебных сетей заключается в их закрытости и конфиденциальности информации, что приводит к необходимости создания технических и программных средств контроля несанкционированного доступа к управлению и информационным ресурсам. Однако иерархические принципы организации остаются практически без изменения.

В заключение отметим, что импульсная цифровая техника находит все более широкое применение в быту, промышленности и телекоммуникационных сетях коллективного пользования, поэтому важно знать общие принципы построения цифровых устройств, их особенности, области применения и основные параметры. Прогрессивное развитие электронной техники идет в направлении расширения функциональных возможностей микросхем, увеличении степени интеграции, повышения быстродействия, снижения потребляемой мощности. Эти направления поддерживаются интенсивными работами в области нанотехнологии и, в частности, работами по созданию новых материалов и новых наноразмерных электронных структур.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Что представляет собой логический элемент? Назовите основные логические элементы и операции, которые они выполняют.
2. На каких полупроводниковых структурах создаются логические элементы И, ИЛИ, НЕ?
3. В чем состоит преимущество универсального логического элемента И—НЕ и как он реализуется?
4. В чем преимущество универсального логического элемента И—НЕ по МОП-технологии?
5. Почему триггер можно использовать в качестве запоминающего устройства и переключателя?
6. Назовите виды триггеров и их особенности.
7. Каковы области применения триггеров?
8. Какие логические устройства и микросхемы вы знаете? Каковы их особенности?
9. Где применяется импульсная цифровая техника?
10. Что представляет собой регистр памяти. Из каких элементов он состоит?
11. Что представляют собой АЦП и ЦАП и где они применяются?
12. В чем состоит сходство и различие процессора, контроллера и ПЭВМ?
13. В чем состоит сходство и различие систем сбора информации и систем управления?
14. Чем отличаются САУ от АСУ?

# АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

## 4.1. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И ВЫПРЯМИТЕЛИ

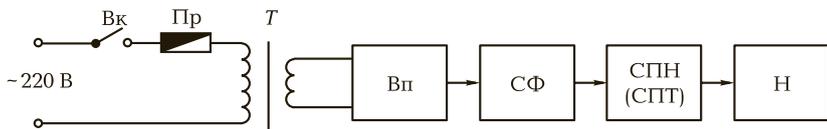
Для работы электронных приборов и устройств необходимы источники питания, которые подразделяются на первичные и вторичные:

- к первичным относятся источники, непосредственно вырабатывающие электрическую энергию (аккумуляторы, батареи, солнечные батареи, генераторы постоянного и переменного тока);
- вторичные источники питания преобразуют энергию первичного источника (сети) в энергию питания конкретных электронных устройств, радиоэлектронной аппаратуры, измерительных приборов и т. п.

Питание широко используемых электронных устройств и бытовой радиоэлектронной аппаратуры осуществляется в основном вторичными источниками питания, преобразующими энергию переменного сетевого напряжения (220 В) в энергию постоянного тока с номиналами напряжений 5, 9, 12, 15 или 27 В.

Электронную аппаратуру различают по мощности: маломощная (до 10 Вт — переносные радиоприемники), средней мощности (от 10 до 300 Вт — звуковая аппаратура и телевизоры), большой мощности (от 300 до 1 000 Вт — мощная звуковая аппаратура, радиопередатчики).

В электронной технике применяют также преобразователи напряжений и частоты. В частности, преобразователь постоянного напряжения в переменное напряжение заданной частоты называется инвертором. Такие преобразователи распространены в авиационной технике, где для уменьшения массы трансформаторов и двигателей используют нестандартную частоту 400 Гц.



**Рис. 4.1.** Структурная схема типового вторичного источника питания

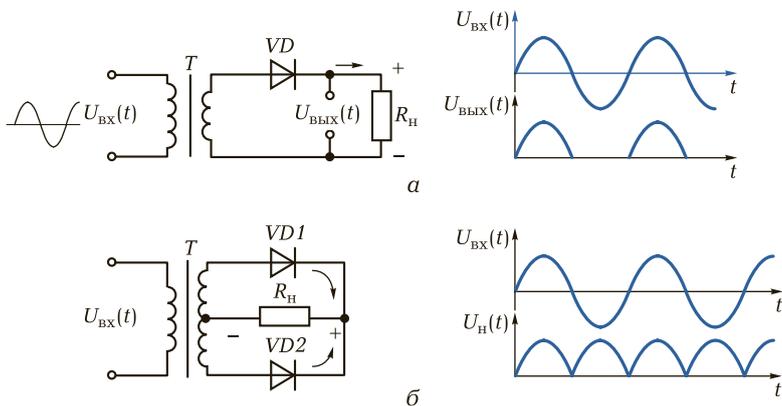
Структурная схема типового вторичного источника питания приведена на рис. 4.1.

В этой схеме цепь с выключателем Вк и предохранителем Пр необходима для подключения и отключения сетевого напряжения. Защита от замыканий в аппаратуре осуществляется с помощью предохранителя. Трансформатор  $T$  служит для понижения сетевого напряжения до напряжения питания, требуемого для аппаратуры. Выпрямитель Вп с помощью диодов преобразует переменное напряжение в пульсирующее напряжение одной полярности. Сглаживающий фильтр СФ строится на основе  $RC$ - и  $RLC$ -цепочек и обеспечивает снижение пульсаций напряжения питания. Стабилизатор постоянного напряжения СПН обеспечивает дальнейшее снижение пульсаций напряжения, а также его стабильность на выходе преобразователя при наличии колебаний сетевого напряжения или изменениях тока в нагрузочной цепи. При необходимости задачу обеспечения стабилизации тока нагрузки выполняет стабилизатор постоянного тока СПТ. Потребляемая мощность и ток нагрузки Н изменяются в широких пределах. При этом меняется внутреннее сопротивление нагрузки, что вызывает резкое падение напряжения на выходе источника питания.

Рассмотрим возможные схемы и принципы работы наиболее сложных элементов источников питания — выпрямителей.

Выпрямители могут быть управляемые и неуправляемые, однофазные и трехфазные. Они также могут иметь сглаживающие фильтры и устройства стабилизации выходного тока или напряжения.

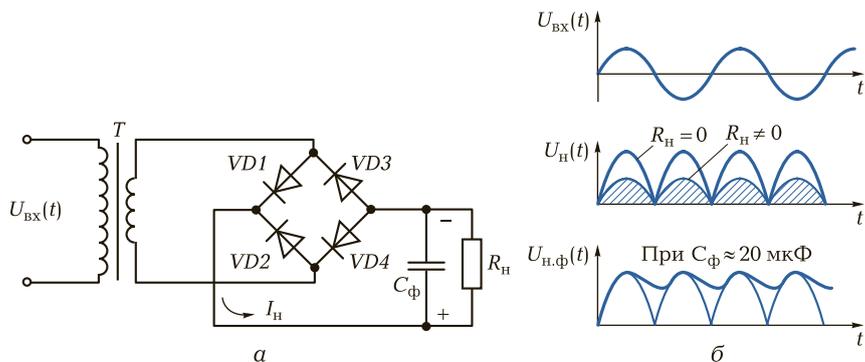
**Однофазные неуправляемые выпрямители.** Электрические схемы и диаграммы напряжений на входе и выходе полупериодного и двухполупериодного выпрямителей представлены на рис. 4.2. На диаграмме на рис. 4.2, *а* видно, что в этой схеме диод пропускает только положительный полупериод входного напряжения  $U_{вх}(t)$  и на выходе выпрямителя наблюдается пульсирующее напряжение  $U_{вых}(t)$ . В схеме на рис. 4.2, *б* диоды пропускают два полупериода напряжений, сдвинутых по фазе на  $180^\circ$  во вторичной обмотке трансформатора со средней точкой (по времени на половину пе-



**Рис. 4.2.** Электрические схемы и диаграммы напряжений полупериодного (а) и двухполупериодного (б) выпрямителей

риода). В этом случае пульсации напряжения на нагрузке  $U_H(t)$  значительно снижаются.

В настоящее время наибольшее распространение получила *мостовая* схема двухполупериодного выпрямителя (рис. 4.3, а), не требующая использования трансформатора со средней точкой. В таком выпрямителе обратное напряжение на диодах не превышает максимального напряжения в полупериоде, в то время как в двухполупериодном выпрямителе обратное напряжение на диодах близко к удвоенному напряжению вторичной обмотки трансформатора. Диодные мостовые схемы выполняются в виде монолитных

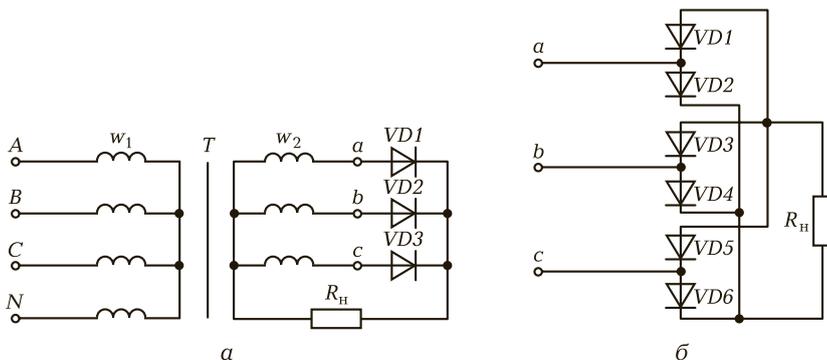


**Рис. 4.3.** Электрическая мостовая схема (а) и диаграммы напряжений (б) двухполупериодного выпрямителя

сборку в одном корпусе с указанием мест подсоединения переменного напряжения и нагрузки.

Если на выходе двухполупериодного выпрямителя установить конденсатор большой емкости  $C_{\Phi}$ , он будет играть роль простейшего сглаживающего фильтра-накопителя. Изменение напряжения на нагрузке  $U_{н.ф}(t)$  при этом показано утолщенной сплошной линией на рис. 4.3, б. Поскольку токи в диодах проходят только в одном направлении на заряд конденсатора, то в моменты максимальных значений напряжения в полупериодах конденсатор подзарядается, а в промежутках между максимумами напряжения он медленно разряжается через нагрузку с внутренним сопротивлением  $R_{н}$ . В качестве фильтров-накопителей обычно используют электролитические конденсаторы большой емкости с требуемым номиналом напряжения. В зависимости от мощности нагрузки и требований по стабильности напряжения на выходе емкость конденсатора выбирают в пределах от 20 до 200 мкФ. Следует заметить, что такой фильтр-накопитель довольно хорошо сглаживает пульсации напряжения, но не может обеспечить высокой стабильности его уровня на выходе. Более сложные схемы фильтров и стабилизаторов напряжения будут рассмотрены далее.

**Трехфазные неуправляемые выпрямители.** Во многих электротехнических устройствах используется трехфазное переменное напряжение, для преобразования которого применяют трехфазный выпрямитель с нулевым выводом от трехфазного трансформатора (рис. 4.4, а). В таком выпрямителе каждый диод проводит ток только в положительный полупериод колебания напряжения своей фазы: А, В и С. Напряжение в фазах сдвинуто на  $120^\circ$ , вы-



**Рис. 4.4.** Электрические схемы трехфазных выпрямителей:

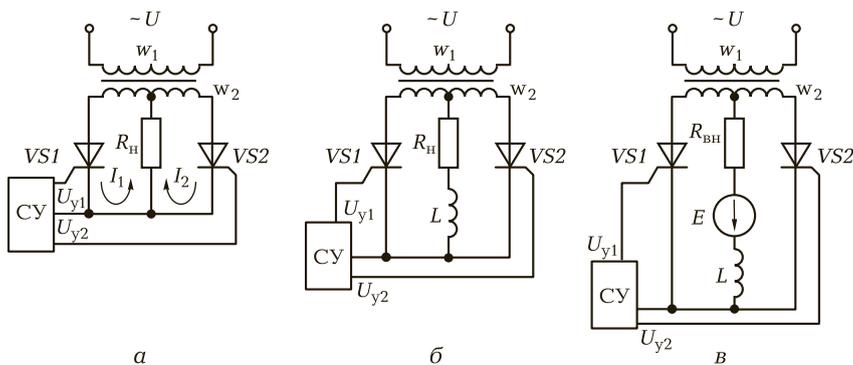
а — с трансформатором; б — мостовая

прямленные токи накладываются, и на выходе формируется положительное напряжение с малыми пульсациями. Подобные трансформаторные схемы выпрямителей используют, когда нужно одновременно понизить или повысить выпрямляемое напряжение.

На рис. 4.4, б показана мостовая схема бестрансформаторного выпрямителя. В такой схеме не нужен нулевой вывод, так как положительный полупериод одной из фаз подключается здесь через обратно включенные диоды двух других фаз. Максимальное значение выпрямленного напряжения такого выпрямителя составляет  $0,7U_{\max}$  (где  $U_{\max}$  — амплитуда линейного межфазового напряжения).

Многофазные неуправляемые выпрямители применяют при нагрузках средней и большой мощностей (до сотни киловатт при токах в сотни килоампер). КПД неуправляемых выпрямителей достигает 98 %.

**Управляемые выпрямители.** Часто для работы электрических устройств требуется изменять напряжение или ток в зависимости от режима работы нагрузки. Для этого используют регуляторы тока или напряжения с управляющими устройствами в виде мощных транзисторов и тиристоров (рис. 4.5). Тиристорные схемы более эффективны, так как они одновременно обеспечивают выпрямление и управление на одном элементе. Применяются также оптоэлектронные схемы выпрямителей, в которых управление осуществляется светом.



**Рис. 4.5.** Электрические схемы выпрямителей, управляемых тиристорами:

*а* — двухполупериодная; *б* — с сглаживающим фильтром; *в* — используемая для зарядки аккумуляторов

В управляемых выпрямителях используются те же схемы, что и в неуправляемых, но диоды заменяют тиристорами (управляемыми вентилями). Программа включения тиристорov задается системой управления (СУ) напряжением или током.

## 4.2. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Сглаживающие фильтры служат для уменьшения пульсаций напряжения на нагрузке выпрямителя. Вместе с тем они не должны ухудшать протекание постоянной составляющей тока, так как это приводит к тепловым потерям и снижению КПД источника питания.

Важной характеристикой является коэффициент пульсации напряжения на выходе фильтра, который определяется как отношение амплитуды первой гармоники  $U_r$  выходного напряжения к усредненной постоянной составляющей выходного напряжения  $U_0$ :  $K_{\text{п}} = U_r / U_0$ .

В отсутствие сглаживающего фильтра при большой активной нагрузке (т. е. малом сопротивлении нагрузки) коэффициент пульсации может достигать больших значений. При подключении хорошего фильтра коэффициент пульсации снижается до значения 0,001, т. е. колебания напряжения на выходе выпрямителя с фильтром составляют менее 0,1 %.

Эффективность работы фильтра оценивают коэффициентом сглаживания:

$$K_{\text{с.ф}} = K_{\text{п.вых}} / K_{\text{п.н}}, \quad (4.1)$$

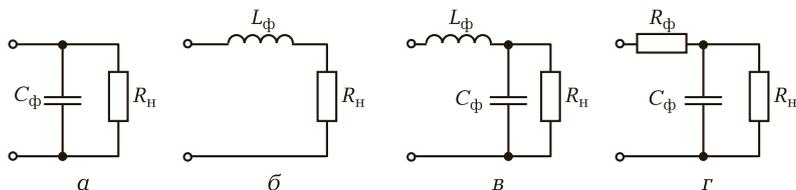
где  $K_{\text{п.вых}}$  и  $K_{\text{п.н}}$  — коэффициенты пульсации напряжения на выходе выпрямителя и нагрузке (т. е. на входе и выходе фильтра).

С учетом выражения для определения коэффициента пульсации и того факта, что у качественного фильтра постоянная составляющая не изменяется, коэффициент сглаживания можно записать в следующем виде:

$$K_{\text{с.ф}} = U_{\text{г.вых}} / U_{\text{г.н}}, \quad (4.2)$$

где  $U_{\text{г.вых}}$  и  $U_{\text{г.н}}$  — амплитуды первой гармоники напряжения на выходе выпрямителя и нагрузке (т. е. на входе и выходе фильтра).

**Емкостной и индуктивный фильтры.** Схема простого емкостного фильтра приведена на рис. 4.6, а. Коэффициент сглаживания фильтра возрастает при увеличении выпрямляемой частоты, емко-



**Рис. 4.6.** Электрические схемы фильтров:

*а* — емкостного; *б* — индуктивного; *в* — Г-образного LC; *г* — Г-образного RC

сти фильтра и сопротивления нагрузки:  $K_{с.ф} = \omega C_{\phi} R_H$ , где  $\omega$  — частота;  $C_{\phi}$  — емкость конденсатора;  $R_H$  — сопротивление нагрузки.

Этот фильтр эффективен при малой потребляемой мощности и больших сопротивлениях нагрузки.

Электрическая схема простого индуктивного фильтра приведена на рис. 4.6, б. В схеме индуктивность в виде катушки из медного провода включена последовательно с нагрузкой. Иногда используется катушка (дрессель) на замкнутом железном или другом ферромагнитном сердечнике. Для постоянного тока сопротивление этой катушки мало, поэтому постоянный ток проходит через нее без потерь. Для получения высокого коэффициента сглаживания фильтра  $K_{с.ф}$  необходимо, чтобы сопротивление по переменной, составляющей импеданс для первой гармоники, было велико. Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра получим в виде  $K_{и.ф} \approx \omega L_{\phi} / R_H$ , где  $L_{\phi}$  — индуктивность катушки фильтра.

Согласно этому выражению индуктивный фильтр эффективен при больших частотах, большой индуктивности и малых сопротивлениях нагрузки. Чем больше частота  $\omega$  выпрямляемого напряжения, тем меньше требуемая индуктивность  $L_{\phi}$  катушки или дросселя. Соответственно будут меньше их масса и габаритные размеры. Поэтому на самолетах, вертолетах и других летательных аппаратах используется сетевая частота 400 Гц. При такой сетевой частоте меньше масса и габаритные размеры всех используемых трансформаторов и двигателей по сравнению с аналогичными устройствами эквивалентной мощности, работающими на стандартной частоте бытовой сети 50 Гц. Недостатком использования частоты 400 Гц является постоянный сильный звук, исходящий от дросселей и трансформаторов.

#### **Г-образные, П-образные и активные сглаживающие фильтры.**

Электрическая схема Г-образного индуктивного фильтра с емкостью (LC-фильтра) приведена на рис. 4.6, в. Этот фильтр выполнен в виде последовательного соединения двух фильтров: индуктивного и ем-

костного. Удачное сочетание характеристик этих двух фильтров обеспечивает Г-образному  $LC$ -фильтру большой коэффициент сглаживания:

$$K_{г,ф} = K_{и,ф} K_{е,ф},$$

где  $K_{и,ф}$ ,  $K_{е,ф}$  — коэффициенты сглаживания индуктивного и емкостного фильтров соответственно.

Подставив в эту формулу выражения для  $C$ - и  $L$ -фильтров получим

$$K_{г,ф} = \omega^2 L_{ф} C_{ф}.$$

Из полученного выражения следует, что коэффициент сглаживания Г-образного фильтра не зависит от сопротивления нагрузки. Это важно для многих устройств (усилителей, генераторов и регуляторов), у которых мощность, а следовательно, и внутреннее сопротивление могут меняться в широких пределах.

Из последней формулы найдем выражение для параметров сглаживающей цепи:  $L_{ф} C_{ф} = K_{г,ф} / \omega^2$ .

Г-образные фильтры используются при больших токах нагрузки, так как даже при значительном постоянном токе потери в дросселе незначительны.

При малых токах нагрузки часто используют Г-образный  $RC$ -фильтр, схема которого приведена на рис. 4.6, г. По сравнению с Г-образными  $LC$ -фильтрами у Г-образных  $RC$ -фильтров меньше габаритные размеры и масса. Однако при больших токах такой фильтр дает большие потери в резисторе. Для повышения коэффициента сглаживания Г-образного  $RC$ -фильтра используют активные фильтры, включающие в себя активный элемент в виде операционного усилителя.

Схема активного  $RC$ -фильтра с операционным усилителем приведена на рис. 4.7, а. Такой фильтр эффективен при сглаживании низких частот. Коэффициент сглаживания этого фильтра повы-

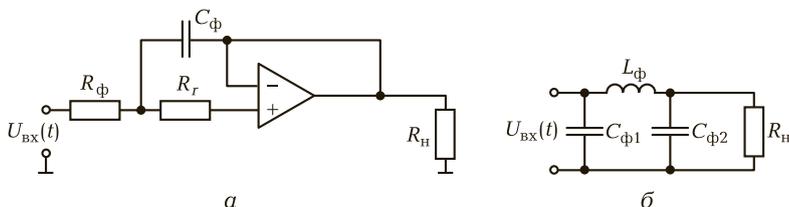


Рис. 4.7. Электрические схемы активного (а) и П-образного (б) фильтров

шается за счет повышения эффективной емкости интегрирующей цепи в  $K$  раз (здесь  $K$  — коэффициент усиления усилителя на ОУ). Так как  $K$  обычно составляет от 10 до 100, эффективная емкость и коэффициент сглаживания  $K_{RC\Phi}$  возрастают во столько же раз.

Для повышения коэффициента сглаживания используют П-образные (рис. 4.7, б) и многозвенные фильтры.

### 4.3. СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Большинство устройств радиоэлектронной и контрольно-измерительной аппаратуры требует стабильного постоянного напряжения питания.

**Характеристики стабилизаторов напряжения.** Требование к стабильности напряжения задается коэффициентом нестабильности:

$$K_{nc} = \Delta U_{\text{п}} / U_{\text{п}}$$

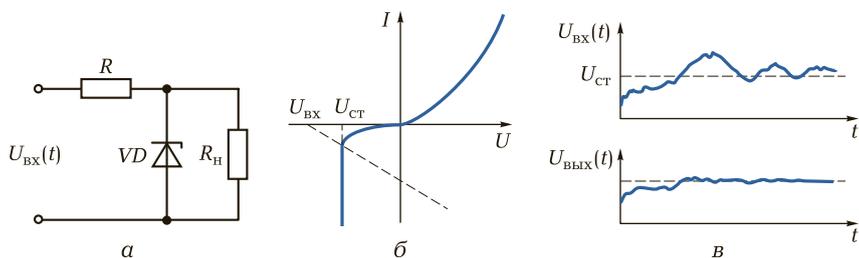
где  $\Delta U_{\text{п}}$  — отклонение напряжения питания от требуемого напряжения  $U_{\text{п}}$ .

В некоторых случаях коэффициент нестабильности не должен превышать 0,01 %. Обеспечить выполнение этого условия с помощью сглаживающего фильтра трудно вследствие нестабильности напряжения в сети. Повышенные требования к фильтрам приводят к росту их массы и габаритных размеров, снижению КПД, повышению стоимости. Поэтому, как правило, в схему источника питания после фильтров оптимальной конструкции включают стабилизатор постоянного напряжения.

Основным параметром, характеризующим работу стабилизатора напряжения, является коэффициент пульсации выходного напряжения. По существу он представляет собой коэффициент нестабильности по отношению к быстрым изменениям напряжения, выраженный в процентах. (Пульсация — это быстрое изменение напряжения на выходе стабилизатора напряжения.)

В общем случае стабилизатор напряжения постоянного тока характеризуют следующие параметры:

- коэффициент пульсации, %,  $K_{\text{п}} = 100K_{nc} = 100\Delta U_{\text{п}} / U_{\text{п}}$ ;
- коэффициент стабилизации выходного напряжения при постоянной нагрузке (при  $R_{\text{н}} = \text{const}$ );
- выходное сопротивление стабилизатора (при  $U_{\text{вх}} = \text{const}$ )  $R_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{п}} / \Delta I_{\text{п}}$ ;



**Рис. 4.8.** Параметрический стабилизатор на основе стабилитрона:  
*а* — электрическая схема; *б* — ВАХ стабилитрона; *в* — диаграммы напряжения

- коэффициент полезного действия стабилизатора  $\eta = P_H/P_{BX} = U_H I_H / (U_{BX} I_{BX})$ .

### Параметрические стабилизаторы постоянного напряжения.

Простейшим стабилизатором является параметрический стабилизатор напряжения на основе стабилитрона, схема которого приведена на рис. 4.8, *а*.

Характеристики стабилизатора зависят от параметров нелинейного элемента — стабилитрона. Особенностью ВАХ стабилитрона (рис. 4.8, *б*) является наличие участка пробоя стабилитрона в области отрицательных напряжений, где напряжение не зависит от тока. Каждый стабилитрон имеет свое определенное напряжение пробоя  $U_{пр}$ , которое определяет напряжение стабилизации  $U_{ст}$  стабилизатора:  $U_{ст} \approx U_{пр}$ . Стабилитрон включается последовательно с гасящим сопротивлением  $R$  и параллельно по отношению к нагрузке (см. рис. 4.8, *а*). Обычно напряжение на входе стабилизатора превышает напряжение пробоя стабилитрона  $U_{пр}$  (напряжение  $U_{ст}$ ), поэтому в стабилитроне протекает слабый ток, параллельный току в нагрузке. Эти токи создают падение напряжения  $\Delta UR$  на сопротивлении  $R$ . При этом напряжение на нагрузке  $U_{ст}$  будет меньше входного напряжения  $U_{вх}$  стабилизатора. Если напряжение на входе стабилизатора увеличится, то ток через стабилитрон соответственно также увеличится, что приведет к увеличению падения напряжения на сопротивлении  $R$  и гашению избыточного напряжения (рис. 4.8, *в*). Если напряжение на входе стабилизатора уменьшится, то ток в стабилитроне тоже уменьшится, и соответственно снизится падение напряжения на сопротивлении  $R$ . В результате напряжение на нагрузке стабилизируется.

При изменении тока в нагрузке часть тока стабилизатора переходит в нагрузку, при этом напряжение на нагрузке (и стабилитро-

не) остается постоянным благодаря тому, что напряжение на участке пробоя стабилитрона не зависит от тока.

Значение гасящего сопротивления  $R$  выбирается в зависимости от значения напряжения стабилизации, требуемого коэффициента стабилизации и мощности нагрузки (обычно в пределах от 6 до 120 Ом). Чем больше сопротивление  $R$ , тем выше  $K_{\text{ст}}$ , но при этом падает выходное напряжение стабилизатора. Особенно сильно  $U_{\text{вых}}$  падает при повышении тока нагрузки.

Параметры стабилитрона также должны подбираться с учетом требуемого напряжения на выходе стабилизатора и допустимых токов нагрузки. При больших компенсационных токах падает КПД стабилизатора вследствие его нагрева, поэтому необходим радиатор для теплоотвода; при малых токах ограничивается диапазон стабилизации колебаний напряжения.

Из всего сказанного следует, что схемы параметрических стабилизаторов могут применяться только для слаботочных цепей (приборов малой мощности).

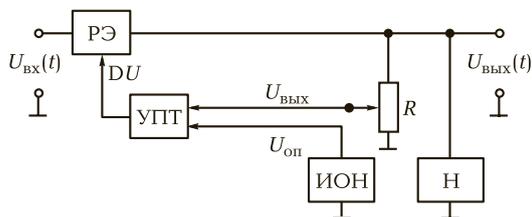
Коэффициент стабилизации параметрических стабилизаторов на стабилитронах не превышает 50. Недостатком параметрических стабилизаторов является также невозможность плавного регулирования выходного напряжения и жесткая привязка к входному напряжению.

Вместе с тем параметрические стабилизаторы просты в исполнении и надежны. Они часто используются в бытовой аппаратуре.

**Компенсационные стабилизаторы постоянного напряжения.** Для обеспечения высокого коэффициента стабилизации напряжения ( $K_{\text{ст}} > 1\,000$ ) используют компенсационный стабилизатор. Такой стабилизатор представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования с обратной связью, в которой выходное напряжение сравнивается с эталонным опорным напряжением.

В зависимости от способа включения регулирующего элемента различают компенсационные стабилизаторы последовательного и параллельного типов.

Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа приведена на рис. 4.9. Данная схема работает следующим образом. Значение выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  здесь сравнивается с эталонным опорным напряжением  $U_{\text{оп}}$  источника опорного напряжения (ИОН). Сигнал рассогласования  $\Delta U = U_{\text{вых}} - U_{\text{оп}}$  усиливается усилителем постоянного тока (УПТ) и воздействует на регулирующий элемент (РЭ), в качестве которого, как правило, используется транзистор. Внутреннее сопротивление регулирующего элемента изменяется под действием сигнала

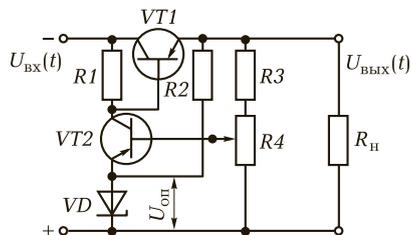


**Рис. 4.9.** Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа

рассогласования и регулирует выходное напряжение, приближая его значение к значению опорного напряжения. Опорное напряжение может быть более низким по сравнению с выходным. В этом случае устанавливается потенциометр  $R$ , с помощью которого выходное напряжение понижается для выполнения сравнения. Этот потенциометр может использоваться и для плавного регулирования стабильного напряжения, подаваемого на нагрузку ( $H$ ).

Электрическая схема компенсационного стабилизатора последовательного типа на двух транзисторах приведена на рис. 4.10. Здесь транзистор  $VT1$  играет роль регулирующего элемента. Транзистор  $VT2$  является усилителем сигнала рассогласования. Делитель напряжения, служащий для сравнения  $U_{\text{ВЫХ}}$  с опорным напряжением, строится на резисторах  $R3, R4$ . Он обеспечивает плавную регулировку напряжения на выходе стабилизатора. Обычно в компенсационных стабилизаторах источником опорного напряжения служит дополнительный источник, являющийся также источником питания для транзистора  $VT2$ . Однако в данной схеме напряжение для сравнения формируется за счет падения напряжения между базой и эмиттером, которое сравнивается с опорным напряжением  $U_{\text{оп}}$ , задаваемым стабилитроном  $VD$ .

Схема работает следующим образом. Пусть напряжение на входе увеличится и составит  $U_{\text{ВХ}} + \Delta U_{\text{ВХ}}$ . При этом начнет возрастать ток через транзистор  $VT1$ , а следовательно, и напряжение на базе



**Рис. 4.10.** Электрическая схема компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа

транзистора  $VT_2$ , что повлечет за собой увеличение запирающего положительного потенциала на базе транзистора  $VT_1$ . Ток в нем начнет уменьшаться, компенсируя увеличение входного напряжения. В результате внутреннее сопротивление транзистора  $VT_1$  повысится и стабилизируется напряжение на выходе.

При снижении входного напряжения работа схемы происходит в обратном направлении. В этом случае транзистор  $VT_1$  в конечном счете переходит в более открытое состояние, компенсируя падение напряжения на входе и обеспечивая заданное стабильное напряжение на нагрузке.

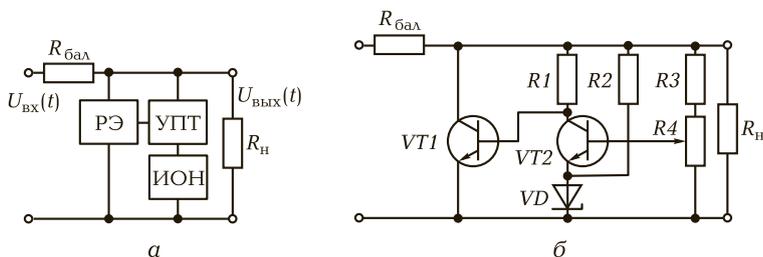
Аналогично работает схема компенсации напряжения на выходе при уменьшении или увеличении тока нагрузки. Поскольку снижение тока нагрузки приводит к снижению тока транзистора  $VT_1$  за счет увеличения его внутреннего сопротивления под воздействием коллекторного потенциала транзистора  $VT_2$ , напряжение на нагрузке остается стабильным. Увеличение тока нагрузки приводит к увеличению тока транзистора  $VT_1$  за счет обратной связи через транзистор  $VT_2$  и компенсирует падение напряжения на нагрузке. Следовательно, напряжение на нагрузке снова остается стабильным.

Увеличение коэффициента усиления по току транзистора  $VT_1$  обеспечивает увеличение коэффициента стабилизации напряжения. Однако при больших коэффициентах усиления схема может самовозбуждаться.

Для увеличения коэффициента усиления по току можно заменить транзистор  $VT_1$  составным, т. е. состоящим из двух транзисторов с коэффициентами усиления  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Коэффициент усиления составного транзистора  $\beta_c = \beta_1\beta_2$ . Использование составного транзистора позволяет создавать стабилизаторы напряжения с коэффициентами стабилизации в несколько тысяч.

Структурная схема компенсационного стабилизатора параллельного типа приведена на рис. 4.11, а. В этой схеме также имеются источник опорного напряжения и устройство сравнения с усилителем сигнала рассогласования, но в отличие от схемы последовательного типа регулирующий элемент здесь включен параллельно нагрузке. Схема работает примерно так же, как работает схема на основе стабилитрона: сигнал рассогласования поступает на вход усилителя, а затем на регулирующий элемент, увеличивая или уменьшая ток до тех пор, пока выходное напряжение стабилизатора не сравняется с опорным напряжением.

Электрическая схема компенсационного стабилизатора параллельного типа на двух транзисторах приведена на рис. 4.11, б. Схе-



**Рис. 4.11.** Структурная (а) и электрическая (б) схемы компенсационного стабилизатора напряжения параллельного типа:

$R_{балл}$  — балластное сопротивление

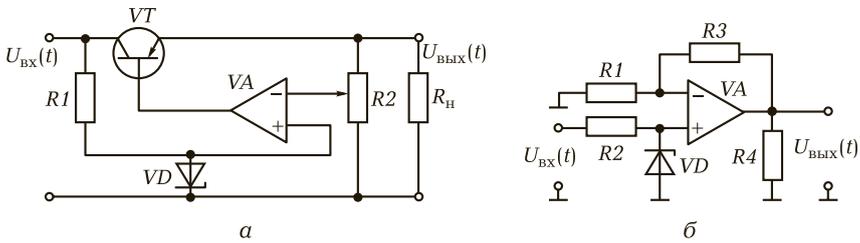
ма работает следующим образом. Пусть, например, напряжение на входе увеличилось. Следовательно, начнет увеличиваться напряжение на потенциометре, что приведет к увеличению напряжения на базе транзистора  $VT2$ , а значит, и его коллекторного тока, и коллекторного тока транзистора  $VT1$ , что, в свою очередь, обеспечит стабилизацию напряжения на выходе стабилизатора и нагрузке. Уменьшение напряжения на входе приведет к уменьшению коллекторного тока в цепи транзистора  $VT2$  и, соответственно, уменьшению коллекторного тока транзистора  $VT1$ . Следовательно, напряжение на выходе стабилизируется.

Аналогично реагирует стабилизатор на падение напряжения при уменьшении или увеличении тока нагрузки, стабилизируя выходное напряжение.

Сравнивая стабилизаторы последовательного и параллельного типов, можно отметить, что последние менее экономичны, так как у них есть параллельная цепь с компенсирующим током, не используемым нагрузкой, и они имеют меньший КПД. Однако стабилизаторы параллельного типа устойчивы к влиянию короткого замыкания нагрузки.

В стабилизаторе с регулятором, расположенным последовательно с нагрузкой, при коротком замыкании в нагрузке возникают большие токи в регулирующем элементе, и последний разрушается. Однако эта схема все-таки предпочтительнее при больших токах нагрузки, так как в схеме параллельного типа необходимо наличие примерно таких же компенсационных токов. Вместе с тем в последовательной схеме необходимо принимать дополнительные меры по защите от коротких замыканий в нагрузке.

**Стабилизаторы напряжений с использованием операционных усилителей и микросхем.** В схемах компенсационного типа в каче-



**Рис. 4.12.** Электрические схемы стабилизаторов напряжения с использованием ОУ и транзистора (а) и с прямым включением ОУ (б)

стве устройства сравнения и усиления сигнала рассогласования можно использовать ОУ, так как он является усилителем постоянного тока и хорошо подходит для выполнения этих функций. Две электрические схемы стабилизаторов напряжения с использованием ОУ приведены на рис. 4.12.

Питание электронных устройств средней мощности можно осуществлять по схеме с транзистором (рис. 4.12, а). В этой схеме использованы эмиттерный повторитель на основе транзистора *VT1* и потенциометр *R2* отрицательной обратной связи с усилением через операционный усилитель *VA*. Потенциометр также можно

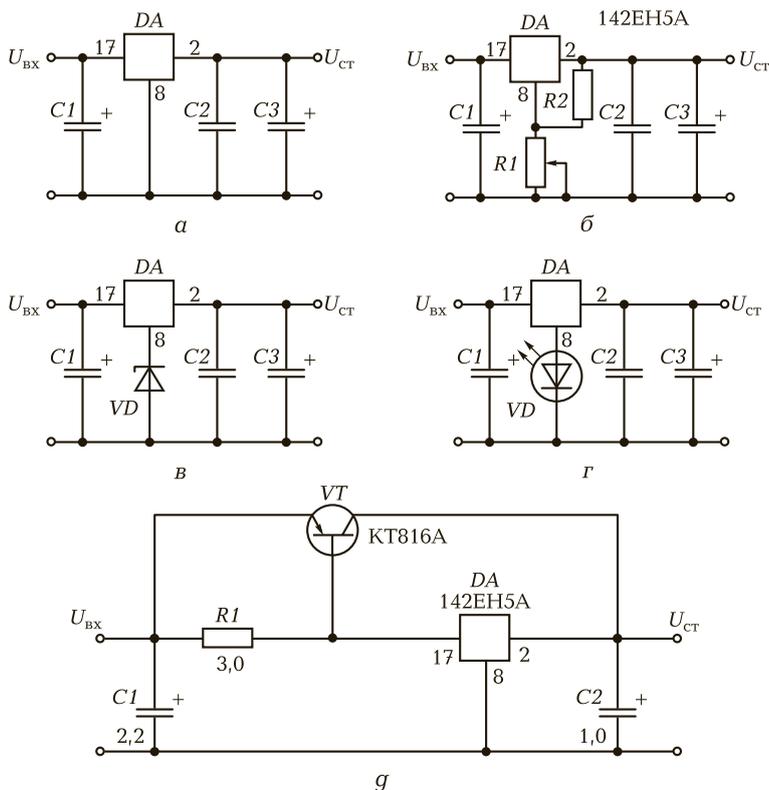
Таблица 4.1. **Параметры основных микросхем стабилизаторов**

Марка, тип	Параметры	Зарубежные аналоги
КР142ЕН1 (А—Г)	$U_{ст} = 12 \dots 30 \text{ В}; I_{max} = 0,05 \text{ А}$	$\mu\text{A}723\text{C}$
КР142ЕН2 (А—Г)	$U_{ст} = 12 \dots 30 \text{ В}; I_{max} = 0,05 \text{ А}$	$\mu\text{A}723\text{C}$
К142ЕН3 (А, Б)	$U_{ст} = 12 \dots 30 \text{ В}; I_{max} = 1 \text{ А}$	М300
К142ЕН4 (А, Б)	$U_{ст} = 12 \dots 30 \text{ В}; I_{max} = 1 \text{ А}$	М300
К142ЕН5А	$U_{ст} = 5 \text{ В}; I_{max} = 2 \text{ А}$	—
142ЕН6 (А, Б)	$U_{ст} = \pm (5 \dots 25) \text{ В}; I_{max} = 0,2 \text{ А}$	SG150I
142ЕН8 (А—В)	$U_{ст} = 9(\text{А}), 12(\text{Б}), 15(\text{В}) \text{ В}; I_{max} = 1,5 \text{ А}$	SG7808 (7812, 7815)
142ЕН9 (А—В)	$U_{ст} = 20(\text{А}), 24(\text{Б}), 27(\text{В}), \text{В}; I_{max} = 1,5 \text{ А}$	SG7818 (7824)

применять для регулировки уровня выходного стабилизированного напряжения. Опорное напряжение в схеме задается стабилитроном  $VD$ , включенным последовательно с высокоомным сопротивлением  $R1$ .

На рис. 4.12, б приведена схема стабилизации напряжения на выходе операционного усилителя с отрицательной обратной связью. Такая схема может быть использована только для питания слаботочных цепей или в качестве источника опорного напряжения.

**Микросхемы стабилизаторов напряжения серий 142, К142, КР142.** Для низковольтных, маломощных одно- и двухполярных ис-



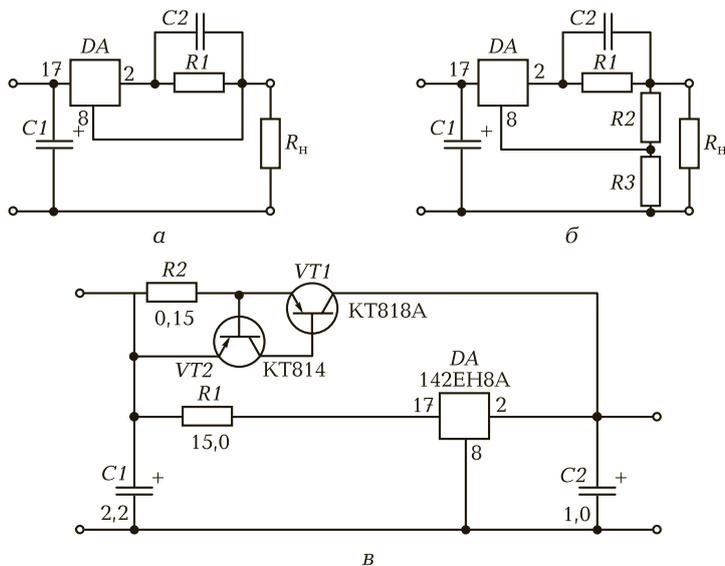
**Рис. 4.13.** Схемы подключения микросхем стабилизатора напряжения 142EH5A:

а — стандартная; б — с использованием делителя напряжения; в — с использованием стабилитрона; г — с использованием светодиода; д — с параллельным подключением транзистора

точников питания разработаны и широко применяются интегральные микросхемы стабилизаторов напряжения, выполняемые по планарной технологии. Выходное напряжение стабилизатора может быть положительным, отрицательным, двуполярным, фиксированным или регулируемым. Фиксированное напряжение  $+5\text{ В}$  используется в устройствах с ТТЛ-логикой, а двуполярное  $\pm 15\text{ В}$  — в аналоговых микросхемах с операционными усилителями.

Выпускаемые микросхемы стабилизаторов различаются по назначению, выходному напряжению, возможности регулировки, допустимому току стабилизации. Микросхемы с большими токовыми нагрузками (несколько ампер) имеют приспособление для крепления на радиатор, как и силовые транзисторы. Они также допускают параллельное подсоединение мощных транзисторов. Основные типы микросхем стабилизаторов и их параметры приведены в табл. 4.1.

Основные типовые схемы включения микросхем 142-й серии в качестве стабилизаторов напряжения показаны на рис. 4.13. В схеме на рис. 4.13, *а* показано стандартное подключение. В схемах на рис. 4.13, *б...г* предусмотрено повышение стабильности выходного напряжения соответственно за счет использования делителя



**Рис. 4.14.** Схемы подключения микросхемы стабилизатора напряжения 142EH8A для стабилизации тока (*а*), тока и напряжения (*б*) и защиты от перегрузок (*в*)

напряжения, стабилитрона и светодиода. В схеме на рис. 4.13, г светодиод играет роль индикатора напряжения и одновременно смещает управляющее напряжение. В схеме на рис. 4.13, г показано использование микросхемы КР142ЕН5 с внешним транзистором, принимающим основную токовую нагрузку.

Микросхемы стабилизаторов напряжения могут использоваться также в схемах стабилизаторов тока (рис. 4.14, а) и комбинированных стабилизаторах тока и напряжения (рис. 4.14, б). Для защиты блока питания от перегрузок может быть использована схема, приведенная на рис. 4.14, в, в которой ток транзистора  $VT1$  перекрывается при перегрузке транзистором  $VT2$ .

В настоящее время микросхемные стабилизаторы широко используются как в источниках питания повышенной мощности, так и для создания эталонных и опорных напряжений, в том числе в малогабаритных переносных электронных устройствах питанием от батареи и аккумулятора.

## 4.4. ИНВЕРТОРЫ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ

**Инвертированием** называют процесс обратный выпрямлению, т. е. преобразование постоянного тока в переменный. Инверторы подразделяются на автономные и ведомые сетью. Автономные инверторы служат для передачи энергии в сеть с переменным током заданной частоты, а инверторы, ведомые сетью, — для питания автономных приемников или сетей. Частота преобразования в них задается системой управления инвертором.

**Автономные инверторы.** Различают автономные инверторы тока и напряжения. Инверторы тока используются со сглаживающим

фильтром большой индуктивности  $L_\Phi$  (рис. 4.15), а инверторы напряжения подключают непосредственно к источнику питания  $E$ .

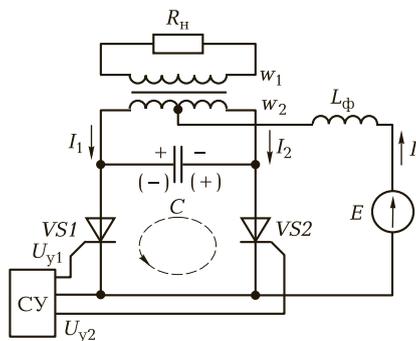


Рис. 4.15. Электрическая схема автономного инвертора

Автономный инвертор работает почти так же, как инвертор, ведомый сетью, но его работа полностью определяется запускающими импульсами системы управления (СУ).

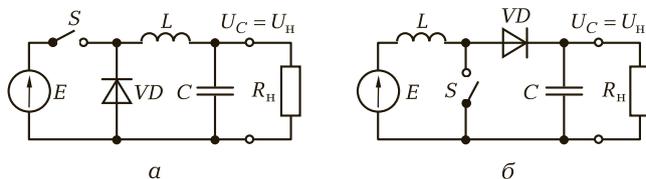
**Инверторы, ведомые сетью.** Если в схеме на рис. 4.5, б вместо нагрузки установить аккумулятор  $E$  и индуктивность  $L$ , включить их, как показано на рис. 4.15, то аккумулятор сможет питать через трансформатор внешнюю цепь переменного напряжения.

Процесс переключения тиристоров аналогичен процессу переключения в выпрямителе. Например, примем, что к моменту времени  $t = 0$  тиристор  $VS2$  был открыт, а тиристор  $VS1$  — закрыт. Переключения тиристоров задаются двумя последовательными импульсами управления с периодом повторения  $T$ , сдвинутыми на половину периода. Первый импульс управления  $U_{y1}$  открывает тиристор  $VS1$ , т. е. напряжение между его катодом и анодом становится равным нулю, и возникает ток в левой цепи трансформатора. На выходе другой ветви вторичной обмотки трансформатора второй импульс  $U_{y2}$  наводит отрицательное напряжение, закрывающее тиристор  $VS2$ . Закрытие ранее проводившего ток тиристора может произойти и раньше под действием переменного тока первичной обмотки трансформатора, что и определяет название инвертора — ведомый сетью.

Через половину периода под действием напряжения сети тиристор  $VS1$  начнет закрываться, а тиристор  $VS2$  откроется под действием второго импульса управления. Таким образом, процесс переключения тиристоров начнет повторяться. При этом импульсы тока, возникающие во вторичной обмотке трансформатора, наводят ЭДС в его первичной обмотке, передавая энергию от аккумулятора в цепь переменного напряжения.

Инверторы часто применяют для питания двигателей постоянного тока от сети переменного тока. На транспорте такие двигатели могут работать и как генераторы, причем при использовании одного и того же устройства преобразования. Это устройство может служить и выпрямителем для обеспечения питания двигателя при движении транспорта на подъем, и инвертором для обеспечения использования энергии, генерируемой электродвигателем при движении транспорта на спуске. Мощность таких инверторов может достигать 100 кВт и более.

**Преобразователи напряжения.** Преобразователями постоянного напряжения (конверторами) называют устройства, изменяющие постоянное напряжение одного уровня в постоянное напряжение другого уровня. Конверторы основаны на импульсных устройствах, позволяющих осуществлять преобразование с минимальными по-



**Рис. 4.16.** Схемы преобразователей постоянного напряжения с последовательным (а) и параллельным (б) включением электронных ключей

терями. Схемы преобразователей, работающих с понижением напряжения, приведены на рис. 4.16. В схеме, показанной на рис. 4.16, а, используется источник питания с напряжением ЭДС  $E$ , электронный ключ  $S$ , диод  $VD$ , индуктивный элемент (дроссель)  $L$  и конденсатор большой емкости  $C$ . Ключ включается на время длительности импульса  $\tau_n$  с постоянной частотой  $f$  и периодом  $T$ . За это время конденсатор заряжается до напряжения  $U_c = U_n$ . После прекращения импульса конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки  $R_n$ . Так как постоянная времени  $CR_n \gg T$ , а индуктивность с конденсатором образуют  $LC$ -фильтр, выходное напряжение преобразователя изменяется мало и можно приближенно считать напряжение нагрузки  $U_n$ , как и ток в цепи нагрузки, постоянным. Регулирование напряжения на выходе преобразователя осуществляется изменением длительности  $\tau_n$  импульса, подаваемого на ключ  $S$ . Напряжение на выходе преобразователя определяется соотношением:  $U_n = E\tau_n/T$ .

В схеме (рис. 4.16, б), содержащей источник питания с напряжением ЭДС  $E$ , электронный ключ  $S$  включает импульсами длительностью  $\tau_n$  цепь с индуктивным элементом (дросселем)  $L$  с постоянной частотой  $f$ . За время  $\tau_n$  в дросселе  $L$  накапливается электромагнитная энергия. При отключении ключа конденсатор большой емкости  $C$  заряжается через диод  $VD$  напряжением индукции от дросселя  $L$ . В этом случае напряжение на выходе преобразователя определяется соотношением  $U_n = E/(1 - \tau_n/T)$ .

В преобразователях малой и средней мощности (до 1 кВт) в качестве ключа используют биполярные и полевые транзисторы, а в преобразователях большей мощности — тиристоры.

**Преобразователи частоты.** Эти устройства преобразуют напряжение одной частоты в напряжение другой частоты. Обычно такое преобразование выполняется через выпрямление первичного напряжения с последующим инвертированием его в переменное напряжение другой частоты импульсным методом, используя включение электронного ключа с определенной частотой.

## 4.5. ИМПУЛЬСНЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ

Во многих случаях электронная аппаратура работает в условиях при сильных колебаниях сетевого напряжения и больших изменениях потребляемой мощности. В этих случаях компенсационные стабилизаторы неэффективны или имеют низкий КПД. В последнее время широкое применение нашли более эффективные импульсные стабилизаторы напряжения.

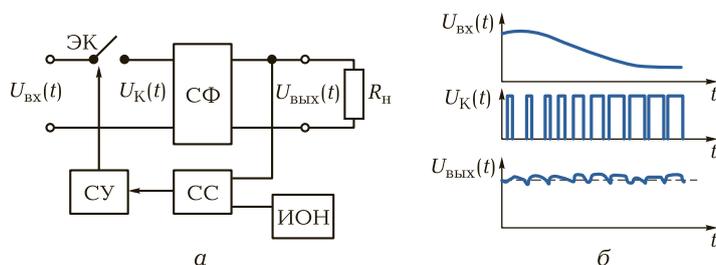
Структурная схема импульсного стабилизатора напряжения приведена на рис. 4.17, а, а поясняющие диаграммы напряжений на входе, выходе ключа и выходе сглаживающего фильтра — на рис. 4.17, б.

Электронный ключ включается импульсной схемой управления с определенной частотой импульсов до тех пор, пока напряжение на выходе фильтра не достигает определенного уровня, установленного в схеме сравнения. Как только это напряжение достигнет заданного уровня, схема управления начинает регулировать скважность импульсов меняя напряжение на выходе фильтра.

В схеме управления используются:

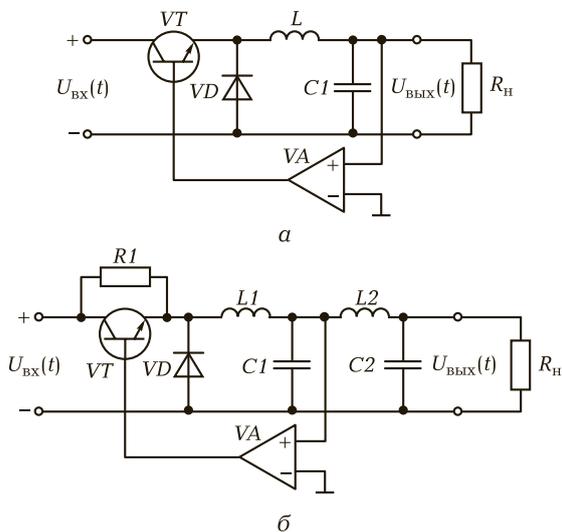
- широтно-импульсная модуляция — изменение ширины импульса при постоянной частоте;
- частотно-импульсная модуляция — изменение частоты импульсов при постоянной длительности.

Для выделения постоянной составляющей напряжения после электронного ключа устанавливается  $LC$ -фильтр. Поскольку частота импульсов обычно довольно высока (десятки кГц), то ин-



**Рис. 4.17.** Структурная схема импульсного стабилизатора напряжения (а) и поясняющие диаграммы напряжений (б):

ЭК — электронный ключ; СУ — схема управления электронным ключом; СС — схема сравнения; СФ — схема сглаживающего фильтра



**Рис. 4.18.** Электрические схемы простого импульсного стабилизатора напряжения с прямым подключением нагрузки (а) и с дополнительным фильтром (б)

дуктивность катушки и емкость конденсатора сравнительно небольшие, т. е. используемые  $LC$ -фильтры имеют малые объем и массу по сравнению с фильтрами для сетевой частоты 50 Гц.

Электрическая схема простейшего импульсного стабилизатора напряжения приведена на рис. 4.18, а. Схема работает следующим образом. В обычном состоянии электронный ключ (транзистор  $VT$ ) пропускает ток. Если выходное напряжение превысит заданный уровень, то компаратор  $VA$  выдает импульс, закрывающий транзистор  $VT$ . Напряжение самоиндукции катушки  $L$  закорачивается диодом  $VD$ . Конденсатор  $C1$  начинает разряжаться через нагрузку, и напряжение на нем падает по линейному закону, но как только оно станет ниже порогового уровня, компаратор  $VA$  переключится и транзистор  $VT$  откроется. При этом напряжение на конденсаторе  $C1$  снова начнет нарастать. Таким образом, на выходе импульсного стабилизатора устанавливается напряжение, слабо колеблющееся около порогового уровня, установленного в компараторе. Колебания напряжения на конденсаторе  $C1$ , связанные с включением и выключением транзистора, можно устранить с помощью дополнительного сглаживающего фильтра  $L2, C2$  (рис. 4.18, б).

Преимуществом импульсного стабилизатора по сравнению с другими типами стабилизаторов является большой динамический

диапазон регулирования напряжений при колебаниях входного напряжения и сопротивления нагрузки. Он также имеет высокий КПД, так как транзистор работает в импульсном режиме с малыми тепловыми потерями.

Недостатком импульсного стабилизатора является высокий уровень колебаний тока. Скачки тока в цепи питающего трансформатора, связанные с импульсным переключением транзистора, вызывают помехи в электрических цепях электронной аппаратуры.

Для устранения указанного недостатка схему (см. рис. 4.18, а), изменяют (см. рис. 4.18, б): параллельно транзистору  $VT$  устанавливают резистор  $R1$  с сопротивлением  $10 \dots 50$  Ом, а  $LC$ -фильтр делают двухзвенным. При этом постоянная времени первого звена должна быть примерно в два раза меньше, чем второго, а напряжение к компаратору отводится после первого звена. В результате скачки тока при переключении транзистора снижаются, а пульсации, вызванные регулированием напряжения, сглаживаются вторым звеном. В некоторых случаях используют схемы защиты от перегрузок с логическими элементами, схемы защиты от коротких замыканий с автоматическим повторным включением.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

---

1. Какие источники питания относятся к первичным и вторичным?
2. Какова структурная схема вторичного источника питания? Поясните назначение каждого ее структурного блока.
3. Какие схемы выпрямителей вы знаете? Начертите мостовую схему и поясните ее преимущества.
4. Какова роль сглаживающих фильтров на примере  $RC$ -фильтра?
5. Начертите схемы  $\Gamma$ -образных  $RC$ - и  $LC$ -фильтров, поясните их работу.
6. Что такое активный фильтр? Начертите его схему, поясните работу и расскажите о преимуществах.
7. Для чего нужны стабилизаторы напряжения, по каким параметрам оценивают их работу?
8. Начертите схему простейшего стабилизатора на основе стабилитрона и поясните его работу.
9. Начертите структурную схему компенсационного стабилизатора последовательного типа.
10. Начертите электрическую схему импульсного стабилизатора напряжения, поясните принцип его действия, расскажите о достоинствах и недостатках.

# ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И ПРИБОРЫ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

## 5.1. ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

В последнее время в связи с развитием волоконно-оптических систем связи, систем сбора информации и систем автоматики широкое распространение получили различные оптоэлектронные устройства и электронные схемы с оптическими устройствами, а также импульсные и ключевые схемы, управляемые световыми импульсами. Во многих случаях такие устройства превосходят по своим параметрам электронные или обладают рядом преимуществ. В частности, световой луч позволяет «развязать» высоковольтную и низковольтную части аппаратуры, предотвращая разрушение низковольтных приборов от случайного попадания высокого напряжения. Световым импульсом можно включать сильноточные высоковольтные выключатели и передавать телеметрическую информацию по волоконным кабелям, прикрепленным к проводу высоковольтной электрической линии.

Сейчас волоконно-оптические линии связи превосходят проводные по дальности передачи, информационно-пропускной способности и широкополосности. По волоконно-оптическим кабелям можно передавать световые управляющие импульсы и принимать информацию от датчиков. Телеметрические системы оптоволоконной связи и передачи информации особенно необходимы для обеспечения электромагнитной совместимости одной аппаратуры с другой, при наличии сильных электромагнитных помех или требовании соблюдения искро- и пожаробезопасности. Таким образом, оптоэлектроника является одной из наиболее перспективных и бурно развивающихся областей электроники.

Фоточувствительные приборы реагируют на оптическое излучение в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спек-

тра и преобразуют оптические сигналы в электрические. На их основе создаются приборы, воспринимающие видимый окружающий мир и невидимые излучения. Современные оптоэлектронные приборы позволяют «видеть» невидимые ультрафиолетовое (УФ) и инфракрасное (ИК) излучения, а также регистрировать быстропротекающие импульсные процессы, которые не воспринимаются глазом.

Фоточувствительные приборы — важнейшие элементы любого опτικο-электронного устройства. Они состоят в основном из фоточувствительного элемента (оптического сенсора) и вспомогательных элементов (корпуса, окна, контактных выводов, встроенных усилителей), позволяющих связать оптическую и радиоэлектронную системы в конкретной аппаратуре.

Фоточувствительные приборы делятся на приборы с внешним и внутренним фотоэффектом. К приборам с внешним фотоэффектом относятся вакуумные фотоэлементы и фотоумножители. Они основаны на «выбивании» фотонами электронов с поверхности металлов или оксидов в вакууме. Существуют фоточувствительные элементы, способные принимать очень слабые сигналы, усиливать их и преобразовывать в видимый свет (электронно-оптические преобразователи). Для приборов с внешним фотоэффектом требуется значительная энергия фотона, чтобы выбить электрон с поверхности. Поэтому они работают только в ультрафиолетовой и видимой областях и применяются в основном в научно-исследовательской аппаратуре.

Большинство современных фоточувствительных элементов основано на внутреннем фотоэффекте, а именно на способности полупроводников изменять сопротивление под действием света (фоторезисторы, фотодиоды) или создавать разность электрических потенциалов (фотоЭДС).

Фоточувствительные приборы и фотоключи успешно применяются в системах автоматического управления станками и механизмами. Оптические устройства включения, переключения и выключения различных исполнительных устройств позволяют легко автоматизировать процессы счета деталей и изделий на конвейере, сортировки их по размерам, форме, цвету, качеству обработки, химическому составу и т. п. Эти приборы весьма успешно применяются в технике для контроля и регулирования физических величин: геометрических размеров деталей, температуры, цвета, а также для количественного и качественного анализа параметров твердых, жидких и газообразных сред. Разнообразные датчики с применением фотоприборов пригодны для создания устройств,

контролирующих экологическую обстановку, т. е. сигнализирующих о возникновении пожароопасных ситуаций, сильной запыленности среды, а также о загрязненности атмосферы и воды вредными примесями. На основе этих датчиков создают приборы, повышающие безопасность труда, например, предотвращающие случайное попадание человека в опасную зону лазерного излучения, зону работы роботов, зону вредных газов и т. п.

Фоточувствительные приборы находят применение во многих бытовых радиоэлектронных системах и устройствах (например, в лазерных цифровых проигрывателях с дисков, системах дистанционного управления магнитофонами и телевизорами, системах охранной и пожарной сигнализации, устройствах управления игрушками и моделями). Применение устройств передачи сигналов на инфракрасных лучах значительно упрощает системы связи (по сравнению с системами связи, построенными на основе радиотехнических средств), они более экономичны, имеют меньшие габаритные размеры.

Различные типы фотоприборов, выпускаемых промышленностью, полностью охватывают оптическую область спектра электромагнитного излучения, которое включает в себя три части: ультрафиолетовую, с длинами волн  $0,1 \dots 0,38$  мкм; видимую, с длинами волн  $0,38 \dots 0,78$  мкм; инфракрасную, с длинами волн  $0,78 \dots 100$  мкм.

**Фоторезисторы.** Фоторезистор — это фотоэлектрический полупроводниковый приемник излучения, принцип действия которого основан на эффекте фотопроводимости пленки полупроводника на диэлектрической поверхности. В отсутствие облучения светом ток, протекающий через прибор (темновой ток), при разности потенциалов  $10 \dots 20$  В обычно не превышает 1 мкА. При попадании на фоточувствительную поверхность фоторезистора оптического излучения его проводимость возрастает в тысячи раз, а ток может возрасти до нескольких сотен миллиампер.

Для видимой области оптического диапазона в качестве материала чувствительного элемента фоторезисторов используют сульфид кадмия (CdS) и селенид кадмия (CdSe). Для длины волны  $1 \dots 5$  мкм (ИК-область) применяют сульфид (PbS) и селенид (PbSe) свинца.

Темновой ток фоторезистора обычно растет с ростом температуры, т. е. повышение температуры увеличивает число носителей зарядов, что приводит к увеличению темнового тока, смещению нуля и ухудшению точности приборов.

**Фотодиоды.** Фотодиод представляет собой фоточувствительный полупроводниковый диод с  $p-n$ -переходом (между двумя типами полупроводника или между полупроводником и металлом). При

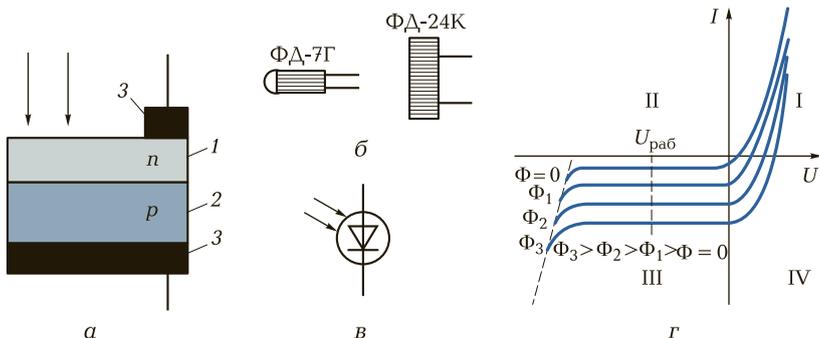
освещении  $p$ — $n$ -перехода в нем возникают электронно-дырочные пары. Направление тока этих носителей зарядов совпадает с направлением обратного тока перехода.

Полупроводниковая структура фотодиода с  $p$ — $n$ -переходом показана на рис. 5.1, а, виды германиевого (ФД-7Г) и кремниевых (ФД-24К) фотодиодов — на рис. 5.1, б, а УГО одиночного фотодиода — на рис. 5.1, в.

При освещении fotocувствительной поверхности фотодиода свет частично теряется (отражается, рассеивается) и частично распространяется под этой поверхностью. При поглощении оптического излучения fotocувствительным полупроводниковым материалом в нем возникают носители зарядов — электроны и дырки, что приводит к появлению электропроводности, называемой фотопроводимостью. Значение фотопроводимости зависит от коэффициента поглощения фотонов материалом, а также от квантового выхода числа электрон-дырочных пар (фотоионизации), образуемых под воздействием одного кванта излучения. Подвижность электрон-дырочных пар определяет скорость генерации носителей зарядов и, следовательно, быстродействие фотодиода.

Семейство ВАХ фотодиода (ФД-24К) при различных световых потоках  $\Phi_i$  приведено на рис. 5.1, г.

Фотодиоды используются в фотодиодном и фотогальваническом режимах. В первом случае на диод подается обратное напряжение и фототок, возникающий при освещении, будет функцией мощности светового потока. Этот режим показан на рис. 5.1, г в левом



**Рис. 5.1.** Структура фотодиодов (а), виды (б), УГО (в) и семейство ВАХ при разных световых потоках (г):

1 — слой полупроводника с  $n$ -проводимостью; 2 — слой полупроводника с  $p$ -проводимостью; 3 — металлические контакты;  $\Phi$  — световой поток; I—IV — квадранты

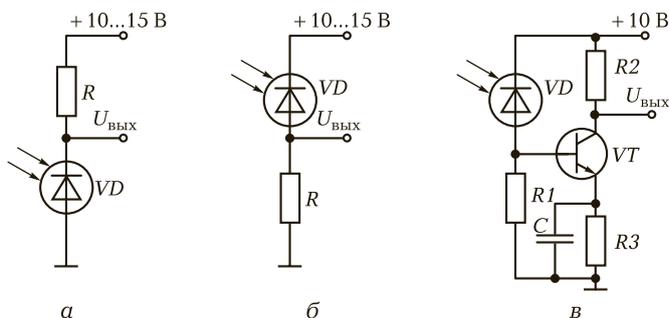
нижнем квадранте при разной освещенности  $\Phi$ . Во втором случае прибор работает в режиме генерации фотоЭДС, т. е. при освещении  $p-n$ -перехода на выходе фотодиода возникает напряжение, пропорциональное мощности светового потока. В этом случае фотодиод работает как солнечная батарея. Этот фотогальванический режим показан рис. 5.1, г в правом нижнем квадранте.

Фотодиодный режим обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с фотогальваническим: повышенные быстродействие и чувствительность фотодиода к длинноволновой части оптического спектра, а также более широкий динамический диапазон с линейной характеристикой.

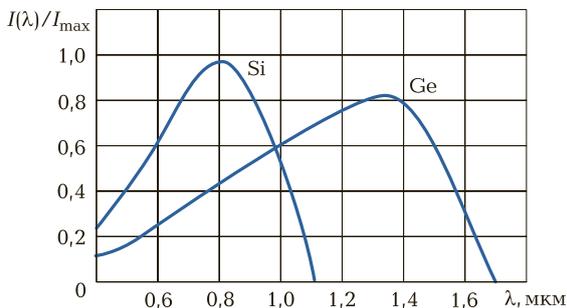
Схемы включения фотодиодов в фотодиодном режиме показаны на рис. 5.2.

Основной недостаток фотодиодного режима — наличие шумового тока, протекающего через нагрузку, поэтому в ряде случаев при необходимости обеспечения низкого уровня шума фотоприемника фотогальванический режим может оказаться более выгодным, чем фотодиодный. Для снижения шумового тока используют охлаждение фотодиода до  $-10^\circ\text{C}$  с помощью полупроводниковых холодильников Пельтье.

Люкс-амперные характеристики (ЛАХ) кремниевых фотодиодов линейны до значений интенсивности освещенности, превышающих несколько ватт (сотни тысяч люкс). Насыщение фотодиода и выход на нелинейный участок ЛАХ в фотогальваническом режиме наступают при меньших уровнях освещенности, чем в фотодиодном. Насыщение германиевого фотодиода в фотодиодном режиме происходит при мощности облучения в несколько ватт.



**Рис. 5.2.** Схемы включения фотодиодов в фотодиодном режиме: а, б — в качестве фоторезисторов; в — в усилительно-транзисторном каскаде

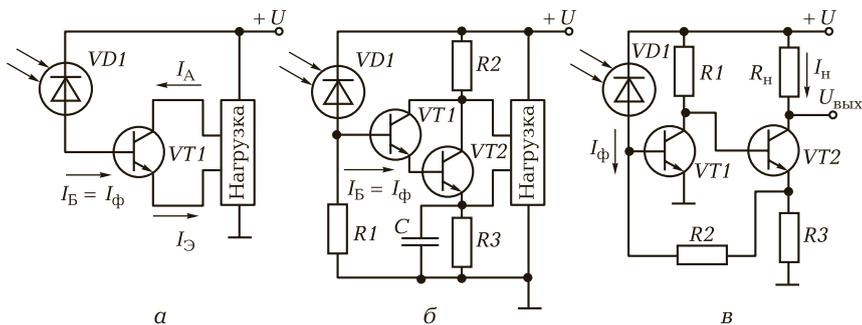


**Рис. 5.3.** Спектральные характеристики выходных токов кремниевого и германиевого фотодиодов

Фоточувствительность и нижний порог возможного обнаружения света фотодиода уменьшаются с повышением температуры прибора, а уровень собственных шумов возрастает из-за увеличения темнового тока. Понижение температуры окружающей среды приводит к противоположным изменениям: повышению чувствительности, снижению шумов, расширению спектрального диапазона. Поэтому для улучшения работы применяют охлаждение фотодиодов полупроводниковым холодильником на основе эффекта Пельтье.

В паспорте фотодиодов приводятся следующие основные параметры: токовая чувствительность  $S_{\text{T}}$ , постоянные времени нарастания  $T_{\text{н}}$  и спада  $T_{\text{сп}}$  импульса фототока (или граничные частоты модуляции светового потока), рабочая длина волны или рабочий интервал длин волн. Спектральные характеристики кремниевых и германиевых фотодиодов приведены на рис. 5.3. Зависимости выходных токов  $I(\lambda)$  от длины волны  $\lambda$  показаны в нормированном виде, т.е. по отношению к значению максимального тока  $I_{\text{max}}$  на длине волны максимальной чувствительности  $\lambda_{\text{max}}$  для кремниевого диода. Максимум чувствительности кремниевого фотодиода находится в пределах длины волны 0,80...0,95 мкм, а длинноволновый край его чувствительности — 1,1 мкм. У германиевых фотодиодов максимум чувствительности сдвинут в сторону более длинных волн (1,3...1,4 мкм), а длинноволновый край его чувствительности — 1,7 мкм.

На рис. 5.4 показаны схемы включения фотодиодов в транзисторные каскады усиления при обратном включении и управлении током базы транзистора. Фотодиоды могут использоваться для построения ключевых каскадов так же, как и фоторезисторы. Ключевые каскады, приведенные на рис. 5.4, могут работать при



**Рис. 5.4.** Схемы включения (а–в) фотодиодов в транзисторные каскады усиления

сильных световых потоках и малых мощностях нагрузки. Специальные сильноточные фотодиоды используют и как самостоятельные фотоключи, и как ключи в составе оптопары светодиод—фотодиод. При слабых световых потоках и значительных нагрузках необходимо применять дополнительные ключевые или усилительные каскады.

В цифровых системах передачи информации требуются фотодиоды с высоким быстродействием и малой инерционностью. Инерционность их зависит от временных характеристик процесса фотогенерации носителей, условий разделения электронно-дырочных пар, емкости  $p$ — $n$ -перехода, а также от сопротивления нагрузки. Быстродействие конкретного фотодиода можно охарактеризовать граничной частотой  $f_{гр}$ , соответствующей максимальной частоте модуляции светового потока, на которой чувствительность уменьшается до уровня 0,7 от чувствительности, соответствующей низкой частоте модуляции. Для кремниевых и германиевых фотодиодов с малой рабочей площадью ( $S \approx 1 \text{ мм}^2$ ) граничная частота  $f_{гр} \approx 1 \text{ ГГц}$ .

Параметрами быстродействия (или инерционности) фотодиодов являются также постоянные времени нарастания  $T_n$  и спада  $T_{сп}$  фототока, определяющие интервалы времени, в течение которых фототок изменяется в 2,7 раза от установившегося значения при  $\Phi = \text{const}$  соответственно после включения или выключения светового потока. Для кремниевых и германиевых малогабаритных фотодиодов значения этих величин составляют 1...2 нс.

**Пин- и лавинные фотодиоды.** Особую группу фотодиодов, отличающихся очень малой инерционностью и высокой чувствительностью, составляют  $p$ — $i$ — $n$ -фотодиоды (пин-фотодиоды) и лавинные.

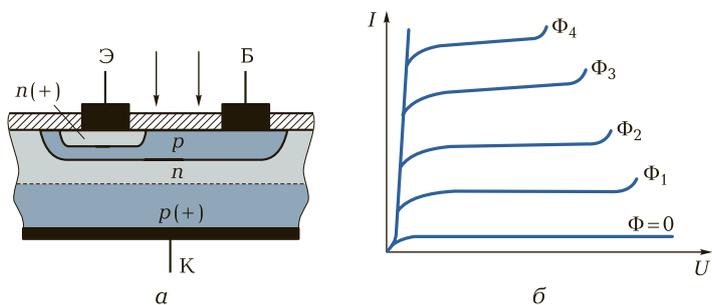
В волоконно-оптических линиях связи от фотодиода требуются высокие чувствительность и быстродействие (время переключения менее наносекунды). Такие фотодиоды необходимы также в цифровых телевизионных системах, системах записи и воспроизведения звука с компакт-дисков и др. В подобных устройствах применяют  $p-i-n$ -фотодиоды и лавинные.

Структура  $p-i-n$ -фотодиода отличается от структуры обычного диода. На подложке с проводимостью  $n(+)$  сформированы  $i$ -слой чистого (нелегированного) полупроводника с очень малой собственной проводимостью и слой с проводимостью  $p(+)$  толщиной до 0,3 мкм. При подаче обратного напряжения смещения обедненным оказывается весь  $i$ -слой. В результате емкость перехода уменьшается, расширяется область поглощения падающего светового потока и повышается чувствительность прибора. Пин-фотодиоды могут регистрировать излучение мощностью около 10 нВт. Сопротивление нагрузки для них выбирают равным 50 Ом, что позволяет получить постоянную времени  $\theta = 0,05 \dots 0,1$  нс и обеспечить прием сигналов с частотой соответственно 20 и 10 ГГц.

В лавинном фотодиоде излучение также поглощается в обедненном слое  $p^{(-)}$ . Для создания ударной ионизации фотовозбужденными носителями зарядов рядом с  $p-n$ -переходом формируют слаболегированную область  $p^{(-)}$  с высокой напряженностью электрического поля (более  $10^5$  В/см). Под воздействием света в ней возникают возбужденные электроны и дырки. Электроны ускоряются электрическим полем, соударяются с атомами полупроводника, и происходит лавинное умножение носителей зарядов. Коэффициент умножения при напряжении смещения, близком к напряжению пробоя, может достигать 1 000, благодаря чему лавинный фотодиод позволяет регистрировать сигналы мощностью около 1 нВт. Значения коэффициента умножения и напряжение пробоя зависят от температуры. Постоянная времени лавинного фотодиода при рабочем напряжении 100...150 В оказывается равной примерно 0,3 нс, что позволяет работать с частотами до 3 ГГц.

Для уменьшения отражения света поверхность окна в фотодиодах покрывают просветляющей пленкой. По периметру рабочей поверхности формируют металлическое кольцо, создающее равномерное распределение электрического поля. Недостатком лавинного фотодиода является необходимость работы при большом напряжении ( $\approx 100$  В), что требует наличия специального источника питания.

**Фототранзисторы.** Полупроводниковые приемники излучения, по структуре подобные транзистору (биполярному или полевому), обеспечивают внутреннее усиление сигнала.

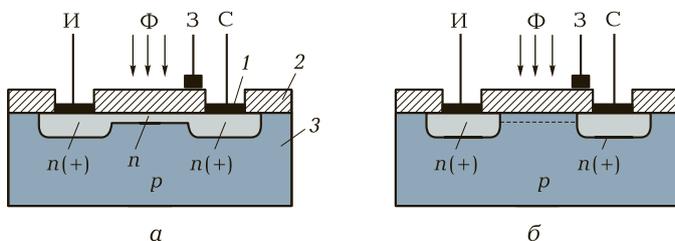


**Рис. 5.5.** Структура фототранзистора (а) и его ВАХ при разных световых потоках (б)

Полупроводниковая структура биполярного фототранзистора показана на рис. 5.5, а, а его ВАХ зависимости от светового потока  $\Phi$  приведены на рис. 5.5, б. В корпусе прибора предусмотрено прозрачное окно, через которое световой поток попадает на область базы транзистора. База при этом может быть отключенной.

При освещении в базе образуются носители зарядов (электронно-дырочные пары). Так же, как в фотодиоде, пары, достигшие в результате диффузии коллекторного перехода, разделяются полем перехода: дырки (в  $p-n-p$ -транзисторе) движутся в коллектор, увеличивая его ток, а электроны остаются в базе, понижая ее потенциал. На эмиттерном переходе создается дополнительное прямое напряжение, вызывающее дополнительную инжекцию дырок из эмиттера в базу и соответствующее увеличение тока коллектора.

Фототранзисторы могут быть и на полевых МДП- или МОП-структурах. На рис. 5.6 показаны два вида МДП-структур фототранзисторов: с встроенным и индуцированным каналами.



**Рис. 5.6.** Структуры МДП-фототранзисторов с встроенным (а) и индуцированным (б) каналами проводимости:

1 — металл; 2 — диэлектрик; 3 — полупроводник

МДП-транзистор с встроенным каналом (см. рис. 5.6, а) создается на подложке из полупроводникового материала с  $p$ -проводимостью, в которой формируются канал  $n$  и две области  $n^{(+)}$ , выполняющие функции его токосъемов. Одна из этих областей является истоком, другая — стоком. Затем структуру покрывают слоем диэлектрика. Над  $n$ -каналом на диэлектрик наносят металлический электрод — затвор. При подаче на затвор отрицательного напряжения  $n$ -канал обедняется электронами и сопротивление его растет. При подаче на затвор положительного напряжения  $n$ -канал обогащается электронами и его сопротивление уменьшается; соответственно изменяется ток между истоком и стоком.

В МДП-фототранзисторе второго вида (см. рис. 5.6, б) канал проводимости не встраивают. При нулевом напряжении на затворе токосъемы из материала с проводимостью  $n(+)$  разъединены обедненной областью с проводимостью  $p$  и ток между ними не протекает. При положительном напряжении на затворе концентрация дырок у поверхности уменьшается, количество электронов в приповерхностном слое становится больше, чем количество дырок. При этом полупроводник приобретает проводимость, т. е. образуется индуцированный проводящий канал проводимости  $n$ -типа. В отличие от транзистора с встроенным каналом такой транзистор работает только при положительном напряжении на затворе. Освещение канала также приводит к увеличению его проводимости за счет фотоиндуцированных носителей зарядов. При освещении зависимость тока от напряжения на затворе максимальна, после чего ток падает.

Фототранзисторы используют в качестве ключей для видимой и ближней ИК-областей спектра, а также в оптопарах (узлах запуска тиристоров, мультивибраторах, генераторах колебаний сложной формы и т. п.).

Необходимо отметить, что фототранзисторы имеют, как правило, слаботочное исполнение, так как от них требуются высокое быстродействие и регистрация слабых световых потоков. Следовательно, используются они совместно с усилительными или ключевыми каскадами.

Фототранзисторы хорошо сочетаются с логическими элементами. При сопряжении фототранзисторов с полевыми транзисторами, входное сопротивление которых очень велико, усилитель практически не потребляет ток и реагирует на изменение напряжения на фотоприемнике.

**Фототиристоры.** Фототиристор представляет собой полупроводниковый приемник излучения, содержащий четырехслойную

$p-n-p-n$ -структуру тиристора (см. подразд. 1.8), которая обеспечивает переключающие свойства прибора.

Полупроводниковая четырехслойная  $p-n-p-n$ -структура фототиристора имеет три  $p-n$ -перехода, один из которых смещен в прямом направлении, а два — в обратном. При таком включении переходов фототиристор можно представить как два последовательно включенных транзистора  $p-n-p$  и  $n-p-n$  с положительной обратной связью через общий коллектор. Сильная положительная обратная связь приводит к появлению на ВАХ фототиристора участка с отрицательным динамическим сопротивлением.

Фототиристор может находиться в одном из двух устойчивых состояний, соответствующих положению рабочей точки: либо ниже прямой тока срыва  $I_{cp}$  (фототиристор закрыт), либо выше ее (фототиристор открыт). Переход из одного устойчивого состояния в другое происходит скачком, когда напряжение на управляющем электроде (УЭ) или освещенность превышает некоторое пороговое значение. При этом переходе сопротивление фототиристора и ток через него изменяются в  $10^6 \dots 10^7$  раз. При темновом сопротивлении примерно от  $10^7$  Ом, ток в закрытом состоянии фототиристора составляет около  $10^{-6}$  А. В открытом состоянии ток фототиристора равен 0,1 ... 1,0 А. Таким образом, фототиристор, имея очень высокие коэффициенты усиления по току и мощности, может быть хорошим ключевым устройством.

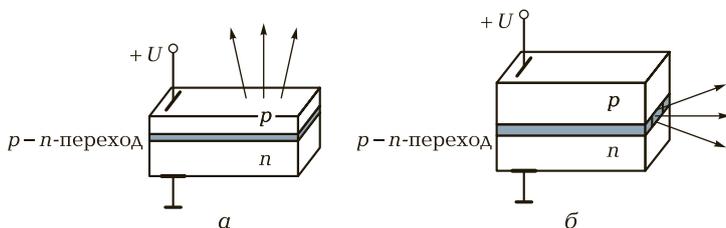
Фототиристоры используют для прямого оптического управления мощными электрическими устройствами в цепях постоянного и переменного токов как оптоэлектронные ключи.

## 5.2. СВЕТОДИОДЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Фотоприемные устройства часто применяются совместно с источниками света. В качестве источников света могут использоваться лампы накаливания, газоразрядные лампы, светодиоды и полупроводниковые лазеры. Наиболее совместимыми с элементами ТГА-технологии по мощности, быстродействию и КПД являются светодиоды и полупроводниковые лазеры.

Конструкции светодиодов и полупроводниковых лазеров схематически представлены на рис. 5.7.

Светодиоды имеют ту же полупроводниковую структуру, что и обычные диоды или фотодиоды. При их прямом включении



**Рис. 5.7.** Схематическое представление конструкции GaAs светодиода (а) и лазерного диода (б)

электроны проходят через  $p$ — $n$ -переход и рекомбинируют (объединяются) с дырками. При этом излучается световая энергия в определенном частотном диапазоне. Если полупроводниковый материал прозрачен для этого диапазона, то излучение будет выходить из области рекомбинации наружу и светодиод будет излучать свет с поверхности (рис. 5.7, а). Современные светодиоды с высоким коэффициентом полезного действия (КПД) преобразования электрической энергии в световую ( $\approx 35\%$ ) создаются на полупроводниковых структурах арсенида галлия (GaAs). В зависимости от количества и типа легирующих присадок получают светодиоды с интенсивным излучением на длинах волн в диапазоне от 0,6 до 1,7 мкм, причем спектральная ширина излучения конкретного светодиода составляет 5... 10 нм.

Особенность структуры светодиодов для видимого диапазона излучения заключается в том, что она должна состоять из полупроводников с высокой энергией носителей зарядов (более 1,8 эВ), которые создают видимое свечение с длиной волны менее 750 нм. К таким полупроводникам относятся: фосфид галлия (GaP), арсенид галлия (GaAs), арсенид—галлий—алюминий (GaAlAs), карбид кремния (SiC). Изменением типа полупроводника и введением легирующих присадок получают нужный цвет свечения (белый, красный, желтый, зеленый, синий).

Если полупроводниковую структуру светодиода обработать определенным образом и на торцах создать зеркальные отражатели (один полупрозрачный), то в области излучения сформируется оптический резонатор и на выходе полупрозрачного зеркала будет наблюдаться лазерное излучение (рис. 5.7, б). Это излучение характеризуется более высокой яркостью, узкой шириной спектра длин волн ( $\approx 0,1$  нм) и меньшей угловой расходимостью. Для полупроводниковых лазеров характерны малые потребляемая мощность (0,1... 1 Вт) и габаритные размеры, а также низкое напряжение

питания. Они хорошо встраиваются в современную малогабаритную электронную аппаратуру. Сейчас выпускается много видов полупроводниковых лазеров с излучением в видимом и ИК-диапазонах. Наиболее широко они используются в линиях связи, системах управления, системах сбора информации и в медицине.

Для современных многоканальных волоконно-оптических систем передачи информации требуются линейки лазеров, строго настроенные по частотной сетке стандартов. Их реализуют методами нанотехнологии, включающей технологию молекулярно-лучевой эпитаксии наноразмерных гетероструктур с ограничениями токового и волноводного канала, как показано на рис. 5.7, б. Излучение лазера исходит из волноводного канала, расположенного в  $p$ — $n$ -переходе.

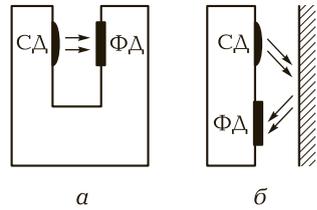
### 5.3. ОПТОПАРЫ, ОПТРОНЫ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Успехи освоения технологии изготовления светодиодов и фотодиодов привели к повышению их надежности и снижению цены, это, в свою очередь, создало условия для их широкого применения в приборостроении, автоматике и других областях техники. Особенно успешным стало применение сочетаний светодиодов и фотодиодов в виде оптопар и оптронов.

Оптопары с открытым каналом, включающие в себя светодиод и фотодиод, часто используются в схемах автоматики как отдельно взятые пары излучатель—фотоприемник, например, на конвейерах для подсчета деталей, в счетчиках оборотов и для выполнения угловых отсчетов, т. е. в схемах, действующих на принципе прерывания светового луча в момент его пересечения каким-либо предметом или специальной шторкой (пластиной). Для угловых отсчетов применяют диск с отверстиями (окнами) для регистрации числа световых импульсов или их положения.

Примеры конструктивных решений при использовании оптопар приведены на рис. 5.8. В первом случае (рис. 5.8, а) оптопара используется как датчик для подсчета оборотов или определения скорости вращения маховика с лепестком, перекрывающим кратковременно свет к фотодиоду при каждом обороте. Во втором случае (рис. 5.8, б) показан сенсорный датчик. При легком нажатии на мембрану справа отраженный свет не попадает на фотодиод и датчик регистрирует нажатие.

**Рис. 5.8.** Схематическое изображение оптопары с открытым каналом (а) и с отражательным каналом (б)

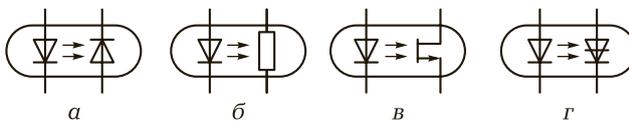


Оптопары с открытым оптическим каналом позволяют создавать различные оптоэлектронные датчики. Они упрощают контроль параметров сред: температуры, давления, влажности, уровня и цвета жидкости, концентрации пыли, вредных паров, газов и т. п.

Оптопары применяются также в качестве элементов оптического бесконтактного управления сильноточными и высоковольтными устройствами. На основе оптопар удобно строить узлы запуска мощных тириатронов, распределительных и релейных устройств, устройств коммутации электропитания и т. д. С точки зрения функциональных возможностей оптопары позволяют решать те же задачи, что и отдельно взятые пары излучатель—фотоприемник, однако на практике они, как правило, более удобны, поскольку в них оптимально подобраны характеристики излучателя и фотоприемника и их взаимное расположение.

**О п т р о н ы** — это оптопары, выполненные в виде закрытой микросхемы, включающей в себя излучатель и фотоприемник. Они применяются в качестве устройств связи между блоками аппаратуры, находящимися под различными потенциалами, и для сопряжения микросхем, имеющих различные значения электрических уровней. В этих случаях оптрон (оптопара) передает информацию между блоками, не имеющими электрической связи. Условные графические отображения оптронов с разными оптопарами приведены на рис. 5.9. Они хорошо отражают разное конструктивное исполнение оптронов.

Пример гальванической развязки, реализуемой с помощью оптрона, заложен в конструкциях входных устройств компьютеров,



**Рис. 5.9.** Условные графические отображения оптронов с фотодиодной (а), фоторезисторной (б), фототранзисторной (в) и фототиристорной (г) оптопарой

где развязка входной телефонной линии с электронной схемой ЭВМ позволяет избежать разрушения элементов схем. В таких узлах удобно использовать дифференциальные оптопары КОД301А, КОД303А.

Оптроны необходимы для межблочной гальванической развязки в электронной и электротехнической аппаратуре. Другой пример — схемы гальванической развязки двух блоков, работающих с разными напряжениями питания. В этом случае сигнал с выхода первого блока передается на вход второго блока через диодную оптопару.

Оптроны и оптоэлектронные микросхемы используют в устройствах передачи информации между блоками, не имеющими замкнутых электрических связей. Применение оптронов существенно повышает помехоустойчивость каналов связи, устраняет нежелательное взаимодействие развязываемых устройств по цепям питания и общему проводу. Цепи сопряжения с применением оптопар широко используют в вычислительной, измерительной технике и устройствах автоматики, особенно когда датчики или другие приемные устройства работают в пожаро- и взрывоопасных условиях, где необходимо выполнение требований искробезопасности.

Оптроны упрощают проблемы сопряжения блоков, разнородных по функциональному назначению и характеру питания (например, исполнительных механизмов, питаемых от сети переменного тока, и цепей формирования управляющих сигналов, питаемых от низковольтных источников постоянного тока).

Гальваническая развязка часто необходима на практике, например, при использовании медицинской диагностической аппаратуры, в случаях, когда датчик прикрепляется к телу человека, а измерительные устройства, усиливающие и преобразующие сигналы этого датчика, подключены к сети. При неисправности измерительной аппаратуры может возникнуть опасность поражения человека электрическим током, поэтому датчик питается от отдельного низковольтного источника (батарейки) и подключается к измерительному блоку через развязывающий оптрон или оптопару.

Оптроны и оптопары необходимы и в случаях, когда по требованиям повышенной безопасности «незаземленные» входы устройства приходится соединять с «заземляемыми» выходными устройствами. Например, при соединении линии телетайпной связи с дисплеем, автоматическим секретарем, модемом, подключаемым к телефонной линии, и т. п.

В настоящее время выпускаются оптоэлектронные микросхемы, включающие в себя несколько оптронов в сочетании с другими микроэлектронными элементами и обеспечивающие вы-

полнение ряда функциональных задач, в частности включение импульсных усилителей, ключей и цифровых логических элементов. Как правило, оптоэлектронные микросхемы удовлетворяют требованиям совместимости с другими стандартными элементами по уровням входных, выходных сигналов и питающего напряжения.

Выпускаются также микросхемы фотодиодов и фототранзисторов в сочетании с транзисторными каскадами усиления.

## 5.4. УСТРОЙСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Создание современных автоматизированных систем сбора и обработки информации, цифровых систем управления, телеметрической и другой контрольно-измерительной и регистрирующей аппаратуры привело к появлению большого класса устройств, воспроизводящих информацию на экранах электронных устройств, измерительных приборов, калькуляторов и табло в форме, оптимальной для зрительного восприятия. Эти устройства (приборы отображения информации, или индикаторные устройства) подразделяют на буквенно-цифровые, в которых информация представляется в виде строки букв и цифр, и дисплейные, в которых информация отображается на экране в виде любого двумерного изображения. В приборах отображения информации различной технической реализации используются разные физические явления и формы представления информации.

В настоящее время применяются самые разные формы визуального отображения информации: буквенная, цифровая, буквенно-цифровая, графическая, символическая и др. При этом используются индикаторные устройства, работа которых основана на различных физических принципах. Наиболее широко применяются газоразрядные, электролюминесцентные, светодиодные и жидкокристаллические индикаторные устройства. Информация представляется в виде изображений на экранах телевизоров и мониторах компьютеров, которые могут быть выполнены с применением электронно-лучевых трубок, а также в виде плазменных, светодиодных и жидкокристаллических панелей. В зависимости от решаемых задач экраны могут иметь разные размеры и различное оформление (от миниатюрных индикаторов на ручных часах до больших информационно-рекламных щитов и панелей).

Основным требованием, предъявляемым к системам отображения информации, является их способность хорошо воспроизводить

информацию и работать при разном освещении в реальном масштабе времени, т. е. иметь необходимое быстродействие для преобразования цифровой информации в визуальную. Развитие устройств отображения информации идет по пути создания все более экономичных, надежных и приемлемых по качеству получаемого изображения воспроизводящих устройств. Современные индикаторные устройства должны работать в условиях сильной и слабой освещенности, иметь хорошие яркость и контрастность, высокую чувствительность к управляющему сигналу и малую потребляемую мощность. Они также должны быть надежными, долговечными, работать в широком диапазоне температур и выдерживать механические нагрузки.

Среди устройств отображения информации особое место занимают жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ), работа которых основана на электрооптических эффектах (ЭОЭ) в жидких кристаллах (ЖК). Они удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к современным индикаторным устройствам, являются наиболее экономичными и хорошо совместимы с современной электронной аппаратурой на интегральных микросхемах.

Рассмотрим индикаторные устройства на основе ЖК, которые являются наиболее перспективными и экономичными средствами отображения информации. Формирование изображения в индикаторных устройствах на газоразрядных индикаторах и светодиодах происходит аналогично, хотя физический механизм работы другой.

Научно-техническое направление, связанное с применением свойств ЖК в различных устройствах, в последнее десятилетие получило широкое развитие. Индикаторные устройства на основе ЖК и светодиодов обладают рядом достоинств: малой потребляемой мощностью, приемлемыми размерами, невысокой стоимостью, а также непосредственной совместимостью с МДП-схемами управления.

Индикаторные устройства на ЖК и светодиодах позволяют осуществлять:

- считывание показаний с индикатора в широком интервале яркостей (т. е. и при ярком солнечном освещении, и в сумерках);
- реализацию одноцветных и многоцветных индикаторов;
- запись и длительное хранение информации (причем в период хранения информации они не нуждаются в электрической энергии);
- воспроизведение информации в полутонах;

- многоцветную индикацию;
- создание панелей, управляемых непосредственно логическими цепями.

Индикаторы на ЖК и светодиодах имеют низкую потребляемую мощность (около 0,1 мВт/см<sup>2</sup>) и высокую разрешающую способность (до 400 линий на 1 мм).

Характерные особенности индикаторов на ЖК и светодиодах:

- отсутствие механически движущихся деталей;
- малый объем плоской конструкции, определяемый в основном размерами показываемых знаков;
- возможность отображения информации на больших площадях;
- низкая стоимость исходных материалов и простота технологии изготовления;
- значительный срок службы (более 10 000 ч).

Разработкой и практическим использованием индикаторов и мониторов в настоящее время занимаются научные центры России, США, Европы, Японии. Так, отечественной промышленностью освоен выпуск ЭВМ пятого поколения и микрокалькуляторов с индикаторами на ЖК. Налажен серийный выпуск электронных часов с жидкокристаллическими устройствами индикации.

Несмотря на определенные успехи в изучении и применении приборов отображения информации на их основе является одним из новых направлений. Сейчас интенсивно ведутся работы по разработке больших телевизионных и информационных экранов с достаточными яркостью, цветопередачей и быстродействием.

**Свойства жидких кристаллов и устройство ЖКИ.** Все жидкие кристаллы состоят из молекул удлинённой формы, упорядоченное расположение которых обеспечивается относительно слабыми дальнедействующими силами. Поскольку межмолекулярные силы довольно малы, структура ЖК в значительной степени зависит от воздействия внешних факторов: температуры, механических деформаций, электрических и магнитных полей, ультразвука и т. п. Реакция ЖК на эти воздействия в основном проявляется в изменении их оптических свойств (светопропускание, цвет, поляризация), что может использоваться для управления световым излучением, а также для приема, хранения и отображения информации.

Жидкокристаллическое состояние вещества (мезофаза, или промежуточная фаза) существует в определенном, четко ограниченном для каждого соединения, температурном интервале. В мезофазе вещество по механическим свойствам относится к жидкостям, т. е.

характеризуется текучестью, поверхностным натяжением и вязкостью. Вместе с тем для ЖК в мезофазе характерны дальний ориентационный порядок молекул и анизотропия (неодинаковость по разным направлениям) магнитных, диэлектрических и оптических свойств, присущих кристаллам.

Жидкости, кристаллы и жидкие кристаллы различаются степенью свободы молекул. В жидкости молекулы подвижны в трех измерениях и могут вращаться вокруг трех взаимно-перпендикулярных осей. В кристаллах молекулы фиксированы и вращение их невозможно. В жидких кристаллах молекулы подвижны в двух измерениях и могут вращаться вокруг одной оси. При изменении температуры меняется структура ЖК. При низких температурах центры их молекул образуют кристаллическую решетку, а молекулярные оси имеют однородную ориентацию. При повышении температуры происходит плавление, т.е. вместо трехмерной кристаллической решетки образуется одномерная. При дальнейшем повышении температуры полностью исчезает дальний координационный порядок молекул, но сохраняется их дальний ориентационный порядок, т.е. локальная однородная ориентация длинных осей. При еще более высокой температуре происходит полное плавление и образуется изотропная жидкость.

Температуру перехода вещества из кристаллической фазы в мезофазу называют температурой плавления  $T_{пл}$ , а температуру, при которой вещество из мезофазы переходит в обычное жидкое состояние, — температурой просветления  $T_{пр}$ . Последняя так называется потому, что в мезофазе в той или иной степени вещества рассеивают свет и являются мутными, а в истинно жидком состоянии они прозрачны.

Температуры  $T_{пл}$  и  $T_{пр}$  имеют широкий диапазон: от  $-20$  до  $+250$  °С. Температурные интервалы существования мезофаз ( $\Delta T = T_{пл} - T_{пр}$ ) у ЖК и их смесей самые разные: у одних веществ они достаточно велики ( $20 \dots 70$  °С), а у других — очень малы ( $2 \dots 7$  °С).

Свойства ЖК обусловлены строением их молекул, имеющих удлинненную (палочкообразную) форму. В зависимости от взаимного расположения молекул ЖК подразделяют на смектические, нематические и холестерические.

В смектических жидких кристаллах молекулы расположены параллельно и имеют упорядоченную структуру, т.е. упорядоченную ориентацию длинных осей и центров тяжести молекул. Такие ЖК соответствуют двумерным кристаллам.

В нематических жидких кристаллах молекулы расположены параллельно, но их центры тяжести смещены относи-

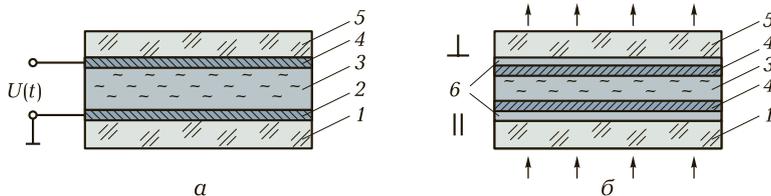
тельно друг друга. Такие ЖК соответствуют одноосным кристаллам и являются менее упорядоченными по сравнению со смектическими. Весь их объем состоит из областей, различающихся направлением ориентации осей молекул. Поэтому нематические ЖК сильно рассеивают свет, т. е. являются мутными на просвет и в отраженном свете. Вместе с тем их молекулы легко поддаются ориентации электрическим полем, и, следовательно, ЖК просветляются под его действием. При этом соответствующим расположением электродов можно добиться планарной (плоской) ориентации молекул (т. е. параллельно ограничивающим пластинам) и гомеотропной (перпендикулярно ограничивающим пластинам).

Холестерические жидкие кристаллы являются разновидностью нематических. Они характеризуются спиральным закручиванием направлений ориентации молекул в различных плоскостях, параллельных плоскостям ограничивающих пластин. При этом наблюдается также вращение плоскости поляризации проходящего света. Шаг спирали, или период повторения ориентации молекул, составляет от 0,2 до 20 мкм. Используя пленочные поляризаторы на входе и выходе жидкокристаллической пластины, можно получать ее просветление при подаче напряжения, причем проходящий свет будет иметь характерную окраску.

Жидкие кристаллы представляют собой различные соединения органических веществ, имеющих структуру длинных молекул с двойной связью. В настоящее время известно много таких веществ и они хорошо изучены. Разработаны также методы их синтеза и очистки. В основном в индикаторах используются ЖК, имеющие нематическую фазу в области температур эксплуатации приборов (от  $-10$  до  $+60$  °С). Для получения таких ЖК подобраны соединения веществ с разными свойствами. В некоторых случаях (например, для создания нужного цвета ЖК) используются легирующие цветные добавки (присадки) в количестве 3...5 % объема ЖК.

Холестерические кристаллы имеют собственные цвета: от синего до желтого и красного. При смешивании нематических кристаллов с холестерическими полученная смесь приобретет свойства последних, т. е. будет обладать оптической активностью. Обычно смеси нагревают до температуры, на  $10...20$  °С превышающей температуру просветления, для обеспечения полного перемешивания и получения однородного соединения.

**Физические принципы работы ЖКИ.** Структуры элементов (элементов) ЖКИ, работающих при индикации на отражение и просвет, приведены на рис. 5.10. В схеме, приведенной на рис. 5.10, а, свет отражается от металлической пленки — электрода 2, расположен-



**Рис. 5.10.** Структуры сегментов ЖК-индикаторов, работающих на отражение [а] и просвет [б]:

1 — стеклянная подложка; 2 — металлический электрод-отражатель; 3 — слой жидких кристаллов; 4 — прозрачный электрод; 5 — стеклянное окно; 6 — пленки поляризаторы

ного на стеклянной подложке 1. Затем он проходит слой жидких кристаллов 3 и проводящий прозрачный слой — электрод 4, нанесенный на стеклянное окно 5. При подаче напряжения молекулы нематических ЖК выстраиваются вдоль силовых линий электрического поля и жидкий кристалл просветляется, создавая изображение электрода 2. В результате на светлом фоне нематического кристалла появится темно-синее изображение пленки на подложке.

Структура сегмента индикатора на ЖК, работающего на просвет (поляризационного типа), показана на рис. 5.10, б. Здесь дополнительно с двух сторон от слоя ЖК установлены пленки-поляризаторы 6 с поляризационными осями, ориентированными под углом  $90^\circ$ . Свет, подаваемый снизу, поляризуется первой пленкой 6 и, пройдя через слой прозрачного электрода 4 и слой ЖК 3, гасится второй пленкой 6, которая не пропускает свет ортогональной поляризации (так как ее плоскость повернута на  $90^\circ$ ). Скрещенные поляризаторы пропускают свет, если между ними имеется тонкий слой ЖК, разворачивающий плоскость поляризации при подаче напряжения на электроды. Если на электроды элемента с холестерическим ЖК подать напряжение, то свет будет проходить через него и формируемое изображение можно будет увидеть или спроектировать на экран.

Рассмотрим оптические явления, используемые в жидкокристаллических индикаторах.

**Интерференция** — явление, заключающееся в наложении волн разной длины, прошедших через слой ЖК, расположенный между скрещенными или параллельными поляризаторами. В этом случае при освещении белым светом изображение выглядит ярко окрашенным.

**Плеохроизм** — явление неодинакового поглощения света различных длин волн, приводящее к тому, что ЖК при пропускании

через них белого поляризованного света кажутся окрашенными по-разному в разных направлениях.

Рассеяние света в нематических ЖК сильное. Слой ЖК толщиной в несколько миллиметров уже непрозрачен. В более тонких пленках свет также рассеивается, создавая молочную или слабую цветовую окраску. При подаче напряжения молекулы вещества перестраиваются и ЖК становится прозрачным в области электродов.

Вращение плоскости поляризации (оптическая активность) наблюдается в тонких пленках ЖК холестерического типа. Луч поляризованного света, прошедший через слой ЖК толщиной  $h$ , на выходе имеет плоскость поляризации, повернутую относительно плоскости входного луча на угол  $\alpha = \rho h$  (где  $\rho$  — удельное вращение плоскости поляризации в веществе). В ЖК значение  $\rho$  значительно выше, чем в кварце ( $15,5^\circ/\text{мм}$ ): оно достигает  $70\,000^\circ/\text{мм}$ .

Электрооптический эффект «гость — хозяин» проявляется в том, что молекулы нематического ЖК, в электрическом поле, взаимодействуя с молекулами плехроического красителя, выстраиваются в цепочку и гасят цвет красителя.

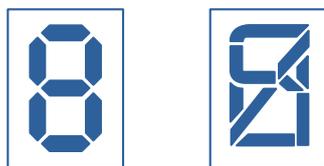
Элементы индикаторов строятся на различных оптических эффектах ЖК. Например, в цифровых индикаторах калькуляторов используется свойство просветления, т.е. в этом случае визуально воспринимается свет, отраженный от металлической подложки.

Для приборов и индикаторных панелей, работающих в ночное время, используют ячейки ЖК с подсветкой и восприятием проходящего света.

Существуют также жидкокристаллические устройства, усиливающие яркость изображения, и проекционные системы, увеличивающие размеры изображения, а также устройства, сохраняющие изображение на длительное время. Сохранение изображения обеспечивается введением между электродами сегнетоэлектрика. При подаче напряжения сегнетоэлектрик поляризуется и даже после снятия напряжения создает ориентирующее поле для ЖК.

**Конструкции цифровых и буквенных ЖКИ.** Буквенно-цифровые индикаторы состоят из набора типовых ячеек с несколькими сегментами, позволяющими сформировать необходимую букву, цифру или символ (запятую, знак и т.п.).

Расположение элементов в ячейках буквенно-цифрового индикатора показано на рис. 5.11. Для отображения цифр в калькуляторах применяют наиболее простые семисегментные и девяти сегментные ячейки. Для буквенных индикаторов используют более сложные ячейки с множеством сегментов. При подаче напряжения



а

б

Рис. 5.11. Семисегментная (а) и девяти- сегментная (б) ячейки индикатора

на набор сегментов появляется изображение требуемой цифры, буквы или символа.

Во многих случаях жидкокристаллические индикаторы приборов и калькуляторов выполняются в виде комбинации мозаичных и символьных изображений, представленных на одной панели. Виды таких панелей показаны на рис. 5.12. Мозаичные точечные индикаторы позволяют формировать большое количество изображений букв, цифр и символов. Для отображения более сложной информации используют матричные индикаторы.

Матричные индикаторы представляют собой панель с тонким слоем нематического ЖК, расположенным между двумя стеклянными пластинами с нанесенными на них рядами линейчатых электродов из прозрачных проводящих пленок. Причем проводящие линейки на противоположных пластинах расположены взаимно перпендикулярно, т. е. образуют растр. Время включения и выключения элемента растра зависит от длительности подачи перепада напряжений. В некоторых случаях для сохранения изображения на

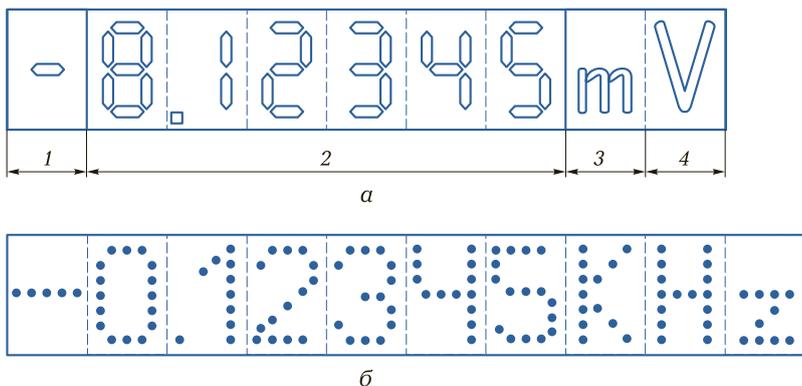
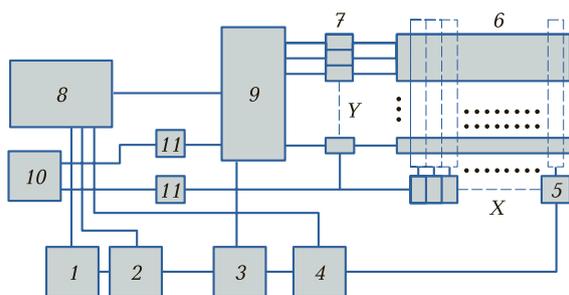


Рис. 5.12. Приборные индикаторные панели из семисегментных (а) и мозаичных (б) индикаторных ячеек:

1 — место для знака; 2 — место для цифр; 3 — место для множителя; 4 — место для размерности

панель подается постоянное напряжение смещения. Использование смеси жидких кристаллов позволяет получать немигающий матричный индикатор  $100 \times 160$  элементов с временем переключения элемента 50 мс и возможностью сохранения кадра в течение 100 мс. Для обеспечения более длительного сохранения информации на одну из пластин с пленочными электродами наносится слой сегнетозлектрика. При подаче напряжения на встречные электроды сегнетозлектрик поляризуется, устанавливая определенную ориентацию молекул. При выключении напряжения поляризация сегнетозлектрика остается, сохраняя ориентацию ЖК и изображения. В этом случае для «стирания» изображения на все электроды подается деполяризующее напряжение.

Структурная схема устройства управления матричной индикаторной панелью представлена на рис. 5.13. Устройство работает следующим образом. Результаты измерения поступают из источника данных 1 в память БИС 2. Генератор символов 3 и сдвигающий регистр 4 формируют цифры. Схема 5 управления X-проводниками подает напряжение на разъем X матричной жидкокристаллической панели. Схема 7 управления Y-проводниками подает напряжение на разъем Y. Управляющая схема 8 формирует импульсы напряжения для генератора адресных сигналов 9, на который подаются также тактовые импульсы от задающего генератора 10 через делитель частоты 11. Запись изображения осуществляется путем приложения напряжения к проводникам X (развертки) и напряжения, сдвинутого по фазе на  $180^\circ$ , к проводникам Y (формирующим изо-



**Рис. 5.13.** Структурная схема устройства управления матричной индикаторной панелью:

1 — источник данных; 2 — память БИС на МДП-структурах; 3 — генератор символов; 4 — сдвигающий регистр; 5 — схема управления X-проводниками; 6 — матричная панель; 7 — схема управления Y-проводниками; 8 — управляющая схема; 9 — генератор адресных сигналов; 10 — задающий генератор; 11 — делитель частоты

бражение). Для запоминания изображения на электроды X и Y подается постоянное напряжение смещения.

В настоящее время разработано много разных типов приборных буквенно-цифровых информационных индикаторных панелей с подсветкой и без подсветки, работающих на просвет и отражение. Также разработаны и используются жидкокристаллические индикаторные панели с цветным изображением, для которых характерны малые управляющее напряжение (3...8 В), потребляемая мощность (10 мкВт/см<sup>2</sup>) и время переключения (10 мс) при контрастности 1 000:1. Срок службы индикаторных устройств на ЖК составляет несколько десятков тысяч часов.

**Светодиодные индикаторы.** Конструкции монолитных и гибридных светодиодных цифровых одноразрядных семисегментных индикаторов типа ИПЦ02А-1/7КЛ, а также матричных индикаторов и индикаторных панелей формируют из устройств, подобных светодиодам, описанным ранее. Управление светодиодными индикаторами, как и жидкокристаллическими, осуществляется подачей на их элементы статического (постоянного) или импульсного напряжения от внешней или встроенной схемы управления. В структуру светодиодных индикаторов должны входить полупроводники с высокой энергией носителей зарядов (более 1,8 эВ), которые дают видимое свечение с длиной волны менее 750 нм. К таким полупроводникам относятся фосфид галлия (GaP), арсенид галлия (GaAs), арсенид-галлий-алюминий (GaAlAs), карбид кремния (SiC). Изменением состава и введением легирующих присадок обеспечивают нужный цвет свечения (красный, желтый, зеленый, синий).

Схема управления семисегментного элемента содержит преобразователь двоично-десятичного кода в позиционный семисегментный код с ограничительными резисторами (дешифратор-формирователь ИМС 564ИД5). Управляющими сигналами в этой схеме являются импульсы четырехразрядного двоично-десятичного кода, которые подаются на вход дешифратора.

Встроенные схемы статического управления применяются в цифровых одноразрядных полупроводниковых индикаторах 490ИП1 и 490ИП2.

Мультиплексорное управление осуществляется последовательным переключением излучающих диодов с частотой 60...100 Гц и длительностью импульсов ≈20 мс. Задающее устройство формирует управляющие сигналы дешифраторам управления строками и столбцами. Дешифратор управления строками определяет, какие диоды должны подключаться в данный момент к столбцу, на который подано напряжение.

Яркость светодиодных индикаторов примерно пропорциональна подаваемому на них току и ее можно регулировать в зависимости от общей освещенности рабочего места оператора.

Значения параметров светодиодных индикаторов следующие: яркость — до 5 000 кд/м<sup>2</sup>; сила света — 1... 1 000 мкд (кд — кандела  $\approx$  1 свече); инерционность — до 10 нс; рабочее напряжение — 1,5... 5 В; потребляемый ток — 5... 10 мА; КПД — 5... 10 %; диапазон рабочих температур — от  $-60$  до  $+85$  °С; минимальная наработка — 25... 50 тыс. ч.

Благодаря высоким яркостным характеристикам, низкому питающему напряжению и малому потреблению энергии полупроводниковые индикаторные панели разных размеров и конструкций находят широкое применение в приборостроении и используются в самых различных областях техники.

## 5.5.

### ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

В XX в. возросла потребность в передаче больших объемов информации за короткие промежутки времени. Устаревшее оборудование и методы передачи информации перестали удовлетворять этим условиям. Это привело к разработке и широкому внедрению волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) на основе оптических кабелей (ОК). Наиболее сильное увеличение доли ОК в системах передачи информации, несомненно, пришлось на начало XXI в. В наше время все больше организаций, деятельность которых связана с передачей данных, отказываются от использования металлических кабелей и аналоговых устройств и переходят на цифровые волоконно-оптические линии связи. Такие системы передачи входят составной частью в вычислительные комплексы и системы обработки и хранения данных, являясь неотъемлемой частью оборудования телекоммуникационных систем широкого применения и информационных технологий.

Достоинствами оптических кабелей по сравнению с применяемыми традиционными металлическими кабелями являются следующие:

- экономия меди (в оптическом волокне используют плавный кварц высокой чистоты, которого в природе много);
- возможность создания волокон с большой информационно-пускной способностью (скорости до нескольких Тбит/с);

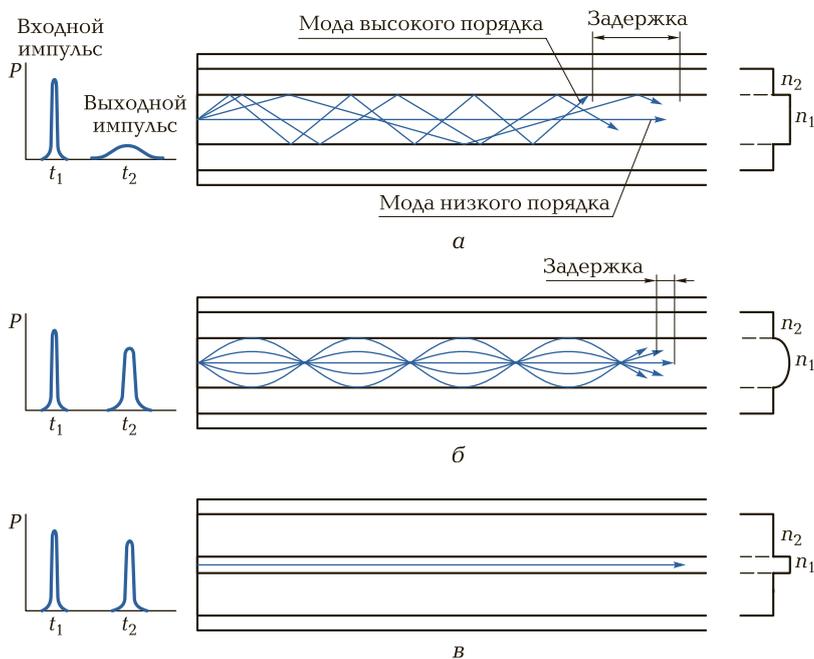
- широкая полоса пропускания, обусловленная большой несущей частотой — до  $10^{14}$  Гц;
- малое затухание сигнала (0,2...0,5) позволяет создавать линии большой протяженности без ретрансляторов (до 200 км);
- высокая помехозащищенность;
- высокая защищенность от внешних воздействий;
- малые габариты и масса;
- малое потребление энергии (по сравнению с радиорелейными, телефонными и спутниковыми системами);
- высокая надежность (долгое время безаварийной работы)
- высокая экологичность и безопасность.

Прорывом в построении ВОЛС стала разработка и применение одномодовых оптических волокон, имеющих минимальные потери и малую дисперсию на длинах волн в области 1,3...1,6 мкм. Применение их позволило увеличить расстояние участков без ретрансляторов до 200 км и создавать линии передачи с общей длиной до 10 000 км и пропускной способностью до 2 Тбит/с. На базе ВОЛС развивается единая интегральная сеть многоцелевого назначения — для телефонной и цифровой связи, телевидения, передачи данных по сети Интернет. Перспективно применение оптических систем в цифровом кабельном телевидении, которое обеспечивает высокое качество изображения и существенно расширяет возможности информационного обслуживания абонентов.

**Принцип работы оптического волокна.** Оптическое волокно представляет собой диэлектрический волновод, изготовленный из кварцевого стекла. Он имеет световедущую сердцевину с показателем преломления света  $n$ , окруженную оболочкой с показателем преломления  $n_2$ , причем  $n > n_2$ . Конструкция волокна приведена на рис. 5.14.

**Типы волокон.** Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые MMF (multi mode fiber) и одномодовые SMF (single mode fiber). В оптике оптической модой называют луч под определенным углом с оси световода.

В одномодовом волокне за счет конструкции (малая сердцевина и малая разница показателей преломления сердцевины и оболочки) поддерживается только один луч вдоль оси волокна. За счет этого снижаются потери и увеличивается пропускная способность. Однако ввести свет можно только от лазера, стоимость аппаратуры при этом возрастает. Это волокно применяют только для дальних и высокоскоростных линий связи.

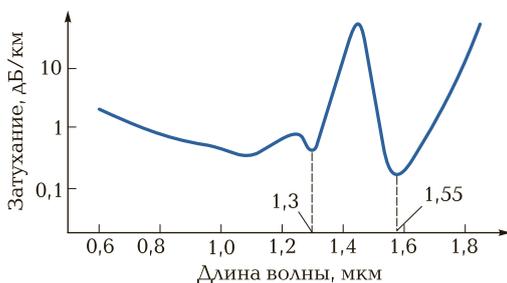


**Рис. 5.14.** Типы оптических волокон, их профили показателя преломления и уширение оптического импульса:

а — ступенчатое; б — параболическое (градиентное); в — одномодовое

Многомодовые волокна подразделяются на ступенчатые (*step index multi mode fiber*) и градиентные (*graded index multi mode fiber*). Эти волокна имеют сравнительно большой диаметр сердечника (50 или 65 мкм) и большую апертуру (0,24). Поэтому в них можно вводить свет от светодиодов. Аппаратура упрощается, однако информационно-пропускная способность резко уменьшается. В настоящее время применяют только градиентные волокна для локальных телекоммуникационных систем с расстояниями до 5 км и пропускной способностью до 100 Мбит/с.

**Затухание сигнала, окна прозрачности.** Окно прозрачности (англ. *Transmission Window, Telecom Window*) — диапазон длин волн оптического излучения, в котором имеет место меньшее, по сравнению с другими диапазонами, затухание излучения в среде, в частности — в оптическом волокне. Стандартное ступенчатое оптическое волокно (SMF) имеет три окна прозрачности: 850, 1310 и 1550 нм.



**Рис. 5.15.** Спектральное затухание в оптическом волокне

Неоднородность затухания света в оптическом волокне в разных диапазонах длин волн обусловлено неидеальностью среды, наличием примесей, поглощающих свет на разных частотах и рассеянием.

Затухание в разных окнах прозрачности неодинаково. График зависимости затухания в кварцевом волокне от длины волны излучения и три окна прозрачности приведены на рис. 5.15.

Наименьшая величина потерь — 0,22 дБ/км наблюдается на длине волны 1 550 нм, поэтому третье окно прозрачности используется для организации связи на большие расстояния. Во втором окне прозрачности (1 310 нм) затухание выше, однако для этой длины волны характерна нулевая дисперсия, поэтому второе окно используется на городских и зонавых сетях небольшой протяженности. Первое окно прозрачности используется в офисных оптических сетях; использование этого окна прозрачности незначительно.

**Влияние дисперсии на пропускную способность канала.** Дисперсия — это уширение импульса с расстоянием. Она отрицательно влияет на пропускную способность канала. Дело в том, что современные оптоволоконные технологии используют цифровой способ передачи информации. Световой сигнал поступает импульсами. Чем сильнее расширен (размыт) по времени импульс на выходе (за счет дисперсии), тем большие требуются интервалы между передаваемыми сигналами, чтобы они различались. Это и ограничивает, в свою очередь, пропускную способность канала связи. Поэтому необходимо уменьшать величину дисперсии, тем самым, увеличивая прохождение возможного количества информационных сигналов в единицу времени.

Основная дисперсия (модовая) связана с разными путями прохождения различных угловых мод. Поэтому для снижения диспер-

сии необходимо пытаться сократить число распространяющихся одновременно мод (лучей) в световоде. В одномодовом волокне модовая дисперсия устранена и, потому его пропускная способность в сотни раз выше, чем у многомодовых.

**Волоконно-оптические кабели.** Оптические волокна имеют малые размеры: сердцевина диаметром 8..9 мкм, кварцевая оболочка 125 мкм, волокно в упрочняющем лаковом покрытии 210 мкм. Оно достаточно прочно на разрыв (выдерживает вес до 7 кгс) и изгиб (до  $R = 5$  мм), однако для обеспечения хорошей защиты линии его применяют только в оптическом кабеле (ОК).

В зависимости от условий прокладки и для достижения разных целей используются разные типы ОК, в частности, с металлическими элементами (проводники, оболочки из стальных проволок, стальных и алюминиевых лент, закрытые полиэтиленовой оболочкой) и полностью диэлектрические — без металла.

Достоинства первых — это высокая механическая прочность и влагостойкость. По медным проводникам можно осуществлять служебную связь, применять их для дистанционного электропитания линейных регенераторов. Вторая разновидность кабелей свободна от электромагнитных воздействий, механически менее прочна, менее влагостойка и подвержена повреждениям грызунами. Для упрочнения используют синтетические полимерные нити и стекловолоконные тросы.

В некоторых случаях используют оптический кабель, встроенный в грозозащитный трос. Он подвешивается на опорах высоковольтных линий передачи с применением специальных зажимов и соединительной арматуры. Часто используемые на железной дороге кабели ОКМС-А-6(2,4) и Сп-24(2) являются самонесущими и применяются для подвески на опоры контактной сети напряжением до 110 кВ, что является вполне допустимым. Данный ОК является износостойким и может применяться в большом диапазоне температур от  $-60$  до  $+70$  °С.

**Волоконно-оптические системы связи с разделением по длинам волн.** Спектральное уплотнение каналов (англ. *Wavelength-division multiplexing*, WDM, буквально мультиплексирование с разделением по длинам волн) — технология, позволяющая одновременно передавать несколько информационных каналов по одному оптическому волокну на разных длинах волн (разных оптических несущих частотах).

Технология WDM позволяет существенно увеличить пропускную способность канала, использовать уже проложенные волоконно-оптические линии. Благодаря WDM удастся организовать двусто-

ронную многоканальную передачу потока (трафика) десятков оптических информационных каналов по одному волокну.

В простейшем случае каждый лазерный передатчик генерирует сигнал на определенной частоте из частотного плана. Все эти сигналы перед тем, как вводятся в оптическое волокно объединяются мультиплексором (MUX). На приемном конце сигналы аналогично разделяются демультиплексором (DEMUX). В сетях с WDM обратимый мультиплексор является ключевым элементом. Он же является демультиплексором при обратной передаче сигналов.

**Синхронная цифровая иерархия (SDH).** Синхронная цифровая иерархия (СЦИ; англ. SDH — *Synchronous Digital Hierarchy*) — технология транспортных телекоммуникационных сетей. Стандарты СЦИ определяют характеристики цифровых сигналов, включая структуру фреймов (циклов), метод мультиплексирования, иерархию цифровых скоростей и кодовые шаблоны интерфейсов и т. д.

Стандартизация интерфейсов определяет возможность соединения оборудования от разных производителей. Система SDH обеспечивает универсальные стандарты для сетевых узловых интерфейсов, включая стандарты на уровне цифровых скоростей, структуру фрейма, метод мультиплексирования, линейные интерфейсы, мониторинг и управление. Поэтому SDH-оборудование от разных производителей может легко соединяться и устанавливаться в одной линии, что наилучшим образом демонстрирует системную совместимость.

Система SDH обеспечивает стандартные уровни информационных структур, то есть набор стандартных скоростей. Базовый уровень скорости STM-1 — 155,52 Мбит/с. Цифровые скорости более высоких уровней определяются умножением скорости потока STM-1, соответственно, на 4, 16, 64 и т. д.: 622 Мбит/с (STM-4), 2,5 Гбит/с (STM-16), 10 Гбит/с (STM-64) и 40 Гбит/с (STM-256).

Поскольку низкоскоростные сигналы SDH мультиплексируются в структуру фрейма высокоскоростных сигналов SDH посредством метода побайтового мультиплексирования, их расположение во фрейме высокоскоростного сигнала фиксировано и определено (предсказуемо). Поэтому низкоскоростной сигнал SDH, например 155 Мбит/с (STM-1), может быть напрямую добавлен или выделен из высокоскоростного сигнала, например 2,5 Гбит/с (STM-16). Это упрощает процесс мультиплексирования и демультиплексирования сигнала и делает SDH иерархию особенно подходящей для высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи, обладающих большой производительностью.

Таким образом, современные ВОЛС работают в режиме спектрального уплотнения (WDM) и в режиме временного уплотнения (SDH).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Какие фоточувствительные приборы вы знаете?
2. Какие диапазоны излучений относятся к оптическим, каковы длины их волн и как они регистрируются?
3. Что представляет собой полупроводниковая структура фотодиода? Как он работает в фотогальваническом и фотодиодном режимах?
4. В чем состоит различие кремниевых и германиевых фотодиодов?
5. Какими достоинствами обладают фототранзисторы?
6. Где применяются оптопары с открытым каналом?
7. Назовите приборы отображения информации. Какие физические принципы используются для отображения информации?
8. Какими достоинствами обладают светодиодные, газоразрядные (плазменные) и жидкокристаллические ячейки для отображения информации?
9. В каких устройствах используются ЖК-индикаторы?
10. Как устроены ячейка и сегмент ЖКИ?
11. Как устроен матричный ЖКИ?
12. Как формируются изображения цифр и букв в ячейках мозаичного ЖКИ?
13. Поясните принципы отображения информации на приборной жидкокристаллической панели и перечислите виды отображаемых на ней знаков.
14. Какие преимущества имеют светодиодные индикаторные панели по сравнению с жидкокристаллическими и плазменными?

## Список литературы

*Берикашвили В. Ш.* Импульсная техника / В. Ш. Берикашвили. — М. : Изд. центр «Академия», 2003. — 186 с.

*Берикашвили В. Ш.* Электронная техника / В. Ш. Берикашвили, А. К. Черепанов. — М. : Изд. центр «Академия», 2008. — 286 с.

*Корнеев В. В.* Современные микропроцессоры / В. В. Корнеев, А. В. Киселев. — СПб. : БХВ — Петербург, 2004. — 448 с.

Микропроцессоры и микроконтроллеры / В. И. Бойко, А. Н. Гурджий, В. Я. Жуйков и др. — СПб. : БХВ—Петербург, 2004. — 464 с.

Основы микроэлектроники / И. А. Аваев, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин. — М. : Радио и связь, 2001. — 324 с.

*Нефедов В. И.* Основы радиоэлектроники и связи / В. И. Нефедов. — М. : Высшая школа, 2002. — 520 с.

Электронные приборы и устройства на их основе. Справочная книга / Ю. А. Быстров, С. А. Гамкрелидзе, Е. Б. Иссерлин, В. П. Черепанов. — М. : РадиоСофт, 2002. — 656 с.

*Яблонский Ф. М.* Средства отображения информации / Ф. М. Яблонский, Ю. В. Троицкий. — М. : Высшая школа, 2005. — 200 с.

Введение.....	4
<b>Глава 1. Физические принципы работы и элементная база электронных приборов .....</b>	<b>6</b>
1.1. Основные определения, области применения и история развития электронной техники .....	6
1.2. Материалы, используемые в электронной технике.....	9
1.3. Образование и свойства $p-n$ -перехода .....	15
1.4. Электронные вакуумные приборы .....	21
1.5. Полупроводниковые диоды.....	28
1.6. Биполярные транзисторы.....	40
1.7. Полевые транзисторы .....	46
1.8. Тиристоры, динисторы и симисторы.....	50
<b>Глава 2. Аппаратные средства информационной электроники .....</b>	<b>56</b>
2.1. Электронные усилители.....	56
2.1.1. Виды, параметры и области применения электронных усилителей.....	56
2.1.2. Транзисторный усилительный каскад .....	57
2.1.3. Транзисторный усилительный каскад переменного напряжения.....	59
2.1.4. Резонансные усилители .....	64
2.1.5. Обратная связь в усилителях.....	66
2.1.6. Усилители постоянного тока.....	68
2.1.7. Операционные усилители.....	71
2.1.8. Усилительные каскады с ИМС ОУ .....	76
2.1.9. Компараторы на основе ИМС ОУ.....	78
2.1.10. Усилители мощности .....	80
2.2. Электронные генераторы.....	86
2.2.1. Принципы автогенерации.....	86
2.2.2. Транзисторный генератор гармонических колебаний .....	87
2.2.3. Кварцевые резонаторы.....	90

2.2.4. Генераторы линейно изменяющихся напряжений .....	91
2.3. Импульсные устройства.....	93
2.3.1. Представление информации в импульсном цифровом виде .....	94
2.3.2. Электронные ключи .....	97
2.3.3. Импульсные генераторы .....	102
2.3.4. Мультивибратор на транзисторах .....	103
2.3.5. Симметричный триггер на транзисторах ( <i>RS</i> -триггер) .....	104
2.3.6. Блокинг-генераторы.....	106
<b>Глава 3. Основы микропроцессорной техники.....</b>	<b>110</b>
3.1. Микроэлектроника и интегральные микросхемы .....	110
3.1.1. Микросборки и интегральные микросхемы .....	111
3.1.2. Технологические процессы изготовления ИМС.....	115
3.2. Базовые элементы и устройства цифровой электроники .....	121
3.2.1. Логические элементы и устройства.....	121
3.2.2. Интегральные микросхемы триггеров.....	126
3.2.3. Мультивибраторы на логических элементах.....	129
3.2.4. Регистры памяти, кодеры и мультиплексоры .....	132
3.2.5. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи .....	135
3.3. Микропроцессоры, микроЭВМ и персональные компьютеры.....	137
3.4. Информационные и управляющие системы .....	143
<b>Глава 4. Аппаратные средства энергетической электроники.....</b>	<b>147</b>
4.1. Источники питания и выпрямители .....	147
4.2. Сглаживающие фильтры.....	152
4.3. Стабилизаторы напряжения и тока.....	155
4.4. Инверторы, преобразователи напряжения и частоты.....	164
4.5. Импульсные стабилизаторы напряжения.....	167
<b>Глава 5. Оптоэлектронные приборы и приборы отображения         информации .....</b>	<b>170</b>
5.1. Фоточувствительные приборы.....	170
5.2. Светодиоды и полупроводниковые лазеры.....	180
5.3. Оптопары, оптроны и оптоэлектронные микросхемы.....	182
5.4. Устройства отображения информации.....	185
5.5. Волоконно-оптические телекоммуникационные системы .....	195
Список литературы.....	202

*Учебное издание*

**Берикашвили Валерий Шалвович**  
**Основы электроники**

**Учебник**

2-е издание, стереотипное

Редактор *Е. Н. Соколова*  
Технический редактор *Н. И. Горбачева*  
Компьютерная верстка: *Г. Ю. Никитина*  
Корректоры *А. П. Сизова, И. А. Ермакова*

Изд. № 702216577. Подписано в печать 15.07.2015. Формат 60×90/16.  
Гарнитура «Балтика». Усл. печ. л. 13,0.

ООО «Издательский центр «Академия». [www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)  
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.  
Тел./факс: (495)648-0507, 616-0029.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 16679 от 25.05.2015.