

Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации

Санкт-Петербургская государственная академия
холода и пищевых технологий

Кафедра электротехники

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Часть 1

Методические указания
для самостоятельного изучения
дисциплины “Электротехника и электроника”
для студентов всех специальностей

Санкт-Петербург 1998

УДК 621.3

Элементная база современных электронных схем. Ч. 1: Метод. указания для самостоятельного изучения дисциплины “Электротехника и электроника” для студентов всех спец. / Евстигнеев А. Н., Кузьмина Т. Г., Новотельнова А. В., Потоцкий А. П. – СПб.: СПбГАХИПТ, 1998. – 25 с.

Рассмотрены основные параметры и характеристики пассивных элементов электронных схем. Дан анализ работы полупроводниковых приборов – диодов и стабилитронов.

Рецензенты

Доктор техн. наук, проф. Г. А. Жодзижский
Канд. техн. наук, доц. Ю. А. Рахманов

Утверждены методической комиссией факультета техники пищевых производств

ВВЕДЕНИЕ

Любой прибор, входящий в состав электронной аппаратуры, в свою очередь, состоит из большого числа деталей. Каждая из этих деталей выполняет в аппаратуре определенную функцию. Часть деталей служит для придания аппаратуре определенных механических и конструктивных свойств. К таким деталям относятся шасси и корпус прибора, платы, крепежные детали. С помощью других деталей в аппаратуре производятся различные преобразования электрической энергии, ее регулирование и распределение. Благодаря этим деталям электронная аппаратура обладает свойствами, позволяющими использовать ее для практических целей. Такие детали аппаратуры, выполняющие определенные функции по отношению к электрической энергии, принято называть компонентами электронной аппаратуры.

Компоненты электронной аппаратуры разделяют на активные и пассивные. Характерной особенностью активных компонентов является способность усиливать или преобразовывать входной электрический сигнал. К активным компонентам относят электронные лампы, транзисторы, микросхемы и другие полупроводниковые приборы. Пассивные компоненты предназначены для перераспределения электрической энергии. К ним относят конденсаторы, резисторы, индуктивные и коммутационные элементы. От электрических характеристик пассивных компонентов во многом зависят свойства электронной аппаратуры в целом, так как их количество в электронной аппаратуре обычно в несколько раз больше, чем количество активных компонентов.

1. ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

1.1. Резисторы

Резисторы в электронной аппаратуре используются в качестве нагрузочных и ограничивающих ток компонентов, добавочных сопротивлений, делителей напряжений и пр. В радиоэлектронной аппаратуре находят применение *линейные* резисторы, протекающий ток в которых подчиняется закону Ома, и *нелинейные*.

Условные графические обозначения резисторов на принципиальных схемах приведены на рис. 1.

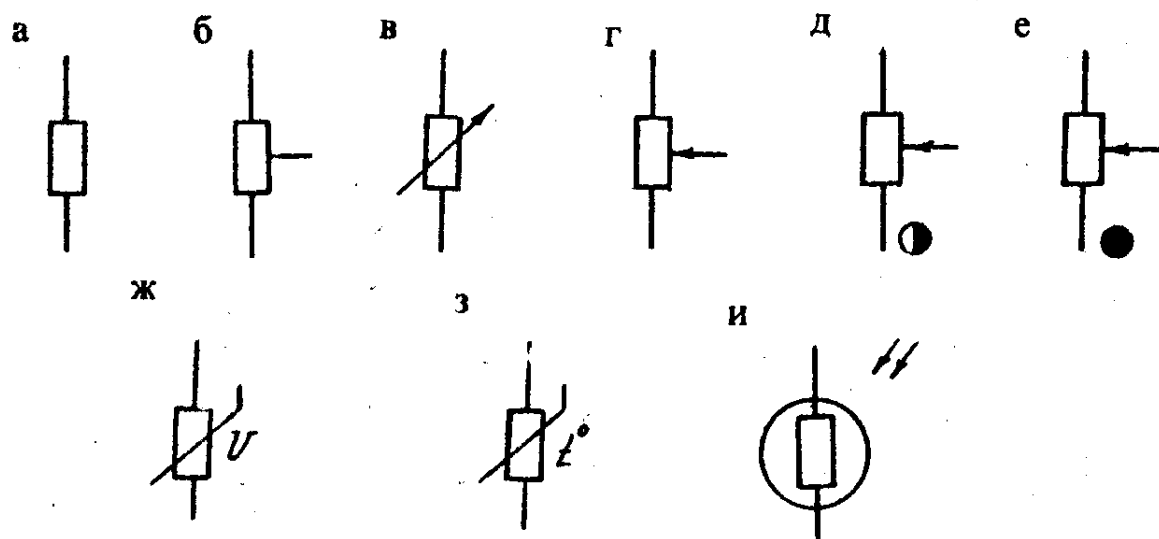


Рис. 1.

Рис. 1.

Резисторы, сопротивление которых нельзя изменить в эксплуатации, называются постоянными резисторами. Условное изображение таких резисторов приведено на рис. 1, а, б.

Резисторы, с помощью которых осуществляют различные регулировки в аппаратуре путем изменения их сопротивления, называют переменными резисторами, или потенциометрами (рис. 1, в, г).

Резисторы, сопротивление которых изменяют только в процессе настройки аппаратуры, называют регулируемыми (рис. 1, д, е).

По типу резистивного элемента (токопроводящей части резисторов) линейные резисторы разделяются на металлофольговые, проволочные и непроволочные. В последних токопроводом являются полупроводниковые материалы или специальные металлические сплавы с высоким удельным сопротивлением. Непроволочные резисторы разделяются по основному конструктивному признаку на пленочные и объемные. В пленочных резисторах полупроводниковый материал или металлический сплав напылен на поверхность керамики или иного изоляционного материала в виде тонкого слоя — пленки. Токопроводящая часть объемного непроволочного резистора представляет собой стержень из полупроводникового материала. Наиболее распространены в радиоэлектронной аппаратуре непроволочные пленочные резисторы, обладающие линейной вольт-амперной характеристикой. Резисторы этого типа обладают следующими преимуществами: малые размеры и масса; незначительная индуктивность и собственная емкость; постоянство

сопротивления в широком диапазоне частот; дешевизна и простота изготовления.

Нелинейные резисторы изготавливают из однородных полупроводниковых материалов. Сопротивление варисторов сильно зависит от приложенного напряжения (рис. 1, ж). Электрические характеристики терморезисторов сильно зависят от температуры (рис. 1, з), фоторезисторов – от освещенности (рис. 1, и), тензорезисторов – от механических напряжений. Нелинейные резисторы используют в аппаратуре в качестве первичных преобразователей неэлектрических величин в электрические (датчиков давления, температуры и т.п.).

Основные характеристики резисторов

Номинальные сопротивления резисторов составляют 10^{-2} – 10^{11} Ом. Для резисторов установлено шесть рядов номинальных сопротивлений: Е6, Е12, Е24, Е48, Е96, Е192. Число, стоящее после символа Е, определяет количество номинальных величин в ряду. Каждый ряд задается числовыми коэффициентами, умноженными на 10^n , где n – целое положительное или отрицательное число. Резисторы изготавливают с номинальными сопротивлениями, соответствующими одному из числовых коэффициентов. Наиболее распространенными являются ряды Е6, Е12, Е24, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Ряд	Числовые коэффициенты						Допустимые отклонения, %
Е6	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	± 20%
Е12	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	± 10%
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	
Е24	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	± 5%
	1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5	
	1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	
	1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1	

Допустимое отклонение от номинала нормализовано и соответствует ряду: ±0,01; ±0,02; ±0,05; ±0,1; ±0,2; ±0,5; ±1,0; ±2,0; ±5,0; ±10; ±20; ±30%.

Постоянные резисторы широкого применения изготавливаются с наибольшими допускаемыми отклонениями от номинального значения сопротивления ± 5 ; ± 10 ; $\pm 20\%$.

Для прецизионных резисторов шаг в ряду берется значительно чаще.

Номиналы и допуски малогабаритных и миниатюрных резисторов обозначают в соответствии с буквенной системой кодирования: Е – омы, К – килоомы, М – мегаомы, Г – гигаомы, Т – тераомы.

Малогабаритные и миниатюрные резисторы имеют сокращенное обозначение. Если сопротивление резистора выражается целым числом, обозначение единицы этой величины пишут после него. Например, 47Е – 47 Ом, 51К – 51 кОм, 47М – 47 МОм.

Если значение сопротивления дробное, то буквенное обозначение ставят вместо запятой. Например, 4К7 – 4,7 кОм.

Буквенные обозначения допусков малогабаритных резисторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Допустимое отклонение от номинала, %	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20	± 30
Условное обозначение	Ж	У	Д	Р	Л	И	С	В	Ф

Например, резистор сопротивлением 2,2 кОм при допустимом отклонении от номинала $\pm 5\%$ маркируют как 2К2И.

Номинальная мощность резистора – предельная мощность, рассеиваемая резистором в процессе эксплуатации в заданных условиях в течение наработки, если температура окружающей среды не превышает номинальную. Резисторы широкого применения могут иметь номинальную мощность рассеяния 0,125, 0,25, 0,5, 1,0, 2,0, 5,0, 10,0 Вт. Номинальная мощность рассеяния указывается в обозначении резистора. Так, например, обозначение ОМЛТ-0,125 означает, что на этом резисторе может рассеиваться мощность не более чем 0,125 Вт.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) характеризует изменение сопротивления резистора при изменении температуры на 1°C . Если при повышении температуры сопротивление увеличивается, то ТКС имеет положительный знак, если сопротивление уменьшается, то отрицательный. Величина ТКС у резисторов широкого применения 0,1–0,3% / $^\circ\text{C}$, у прецизионных резисторов 0,01–0,1%/ $^\circ\text{C}$.

Промышленность выпускает множество типов резисторов. Наиболее часто используются постоянные резисторы МЛТ*, С2-13**, С2-18, С2-23, С2-29.

* МЛТ – металлизированные лакированные теплостойкие

** С – постоянные.

Переменные резисторы (например, типы СП5-3*, СП3-1, СП2-2, СП2-1) отличаются как конструктивными особенностями, так и точностными характеристиками при нормальных условиях и климатических воздействиях.

1.2. Электрические конденсаторы

Электрические конденсаторы – это радиокомпоненты, широко используемые в радиоэлектронной аппаратуре и реализующие физическое свойство – емкость, характеризующееся как

$$C = QU,$$

где C – емкость, Ф; Q – заряд, Кл; U – напряжение, В.

Для простейшего конденсатора, состоящего из двух плоских пластин одинакового размера, разделенных диэлектриком толщиной d , емкость C , Ф, определяется выражением

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума; ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S – площадь пластины.

По виду диэлектрика конденсаторы подразделяются на пять групп:

1. Конденсаторы с газообразным диэлектриком: воздушные, газонаполненные, вакуумные.

2. Конденсаторы с жидким диэлектриком.

3. Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком: керамические, стеклокерамические, стеклоэмалевые, стеклопленочные, слюдяные.

4. Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком: бумажные, пленочные, тонкопленочные, лакопленочные.

5. Конденсаторы с оксидным диэлектриком: алюминиевые, танталовые, ниобиевые: электролитические, оксидно-полупроводниковые, оксидно-металлические.

Условные графические обозначения электрических конденсаторов на принципиальных схемах приведены на рис. 2.

* СП – переменные

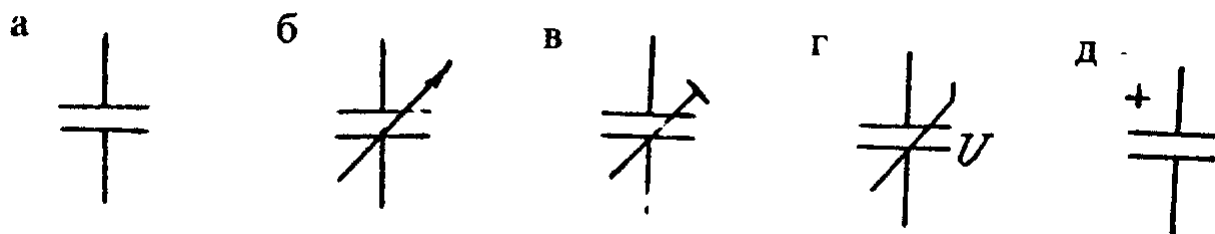


Рис. 2.

Рис. 2.

По своему функциональному назначению конденсаторы подразделяют на постоянные (рис. 2, а), переменные (рис. 2, б), подстроечные (рис. 2, в), вариконды (рис. 2, г) и др.

На обозначении и маркировке *полярных* конденсаторов устанавливается требуемая полярность напряжения (рис. 2, д). Полярные конденсаторы предназначены для работы только в цепях постоянного тока с определенной пульсацией и в импульсных режимах. Представителями полярных конденсаторов являются алюминиевые К51-, танталовые электролитические К52- и оксидно-полупроводниковые К53-, полистирольные К71- и др. Эти конденсаторы следует устанавливать строго в соответствии с обозначенной на корпусе полярностью. В противном случае возможен отказ изделия.

Неполярные конденсаторы устанавливаются без учета полярности используемого участка цепи. Примерами неполярных конденсаторов являются керамические К10-, поликарбонатные К72-, слюдяные К30-, с диэлектриком на основе стекла К20- и др.

Основные характеристики электрических конденсаторов

Номинальная емкость ($C_{\text{ном}}$) – величина, которая указывается на конденсаторе или в сопроводительной документации и является началом отсчета допустимого отклонения от номинала ΔC .

Номиналы емкостей конденсаторов, так же как и номиналы сопротивлений резисторов, устанавливаются в соответствии со шкалой ГОСТа. Отклонения от номинала стандартизированы и устанавливаются в соответствии с рядом, приведенным выше для резисторов.

Для конденсаторов установлено три ряда номинальных емкостей: Е6, Е12, Е24. Каждый ряд задается теми же, что и для резисторов, числовыми коэффициентами (см. табл. 1). Значения номинальных емкостей должны соответствовать произведению числовых коэффициентов, приведенных в табл. 1 на 10^n , где $n = \dots -2, -1, 0, 1, 2, 3$.

Номинальную емкость конденсатора указывают в долях фарад: мкФ (10^{-6} Ф), нФ (10^{-9} Ф) и пФ (10^{-12} Ф).

Для малогабаритных и миниатюрных конденсаторов принята буквенно-цифровая маркировка: М – микрофарад, Н – нанофарад, П – пикофарад. Например, 33П – 33 пФ, 47Н – 47 нФ. На корпусе конденсаторов, емкость которых выражается десятичной дробью больше единицы, буквенное обозначение ставится вместо запятой. Например, 6П8 – 6,8 пФ, 1М2 – 1,2 мкФ.

Для самых мелких изделий, которые невозможно промаркировать буквенно-цифровой маркировкой, применяют маркировку с помощью цветового кода.

Номинальное напряжение конденсатора характеризует электрическую прочность изделия и соответствует напряжению, при котором конденсатор может работать в течение указанного срока службы и более длительно с соблюдением условий эксплуатации.

Пример обозначения конденсатора: танталовый электролитический конденсатор типа К52-9 емкостью 33 мкФ с допуском отклонения от номинального значения емкости $\pm 10\%$, может быть обозначен: К52-9 33 мкФ $\pm 10\%$ 100 В.

Температурный коэффициент емкости (ТКЕ) характеризует зависимость емкости конденсатора от температурных условий эксплуатации. ТКЕ равен относительному изменению емкости при изменении температуры окружающей среды на 1 К:

$$\text{ТКЕ} = \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dT}.$$

ТКЕ может быть положительным, отрицательным и близким к нулю.

Для обозначения группы температурной стабильности конденсатора используют условные обозначения в виде букв, обозначающих знак (М – минус, П – плюс, МП – близко к нулю), и цифр, указывающих значение ТКЕ

в миллионных долях, а также цветную кодировку. Так, можно встретить следующие кодировки групп ТКЕ: П100, П60, П33, МП0, М33, М47, М75, М150, М220, М330, М470, М750, М1500, М2200.

При установке конденсаторов на печатные платы нужно соблюдать требования технических условий, а именно: не превышать максимально допустимое напряжение между выводами, максимальный диапазон температур окружающей среды, соблюдать требования к монтажу и пайке и т.д.

1.3. Провода и кабели

Провода, локализованные в одном жгуте и заключенные в общую изоляционную оболочку, носят название кабелей. Они применяются для электрического соединения блоков и узлов радиоэлектронной аппаратуры. Кабели могут иметь в своем составе от 2–3 до 40–50 проводов. По виду поперечного сечения они бывают круглыми и плоскими.

В зависимости от назначения и особенностей эксплуатации монтажных проводов и кабелей предъявляются требования к их конструктивным размерам и массе, электрическим, механическим, климатическим характеристикам и надежности.

Требования к конструктивным и электрическим характеристикам определяются назначением монтажных проводов, а остальные требования определяются областью их применения, т.е. допустимыми условиями монтажа и эксплуатации.

Помехозащищенность электрических цепей, т.е. выделение полезного сигнала на фоне помехи, накладывает требования и на конструкцию монтажных проводов и кабелей. Для увеличения помехозащищенности провода монтируют в жгуты, причем главным требованием в данном случае является симметричность изготовления. Наилучшая помехозащищенность обеспечивается при помещении каждого отдельного провода в металлизированный экран, что, однако, не всегда реализуемо из-за требований минимизации массы, габаритов и стоимости.

Работоспособность проводов, т.е. их способность выполнять свои функции в составе различной аппаратуры, целиком определяется величинами электрических параметров. Потеря работоспособности происходит при электрическом пробое изоляции, обрыве токопроводящих жил и т.п.

Основные характеристики кабелей и проводов

Электрическое сопротивление жилы кабеля R при температуре T , °С

$$R_t = \frac{\rho_{20}}{q} [1 + \alpha (T - 20)],$$

где q – номинальное сечение жилы, мм²; ρ_{20} – удельное сопротивление при 20°С, нОм·м; α – температурный коэффициент сопротивления, равный для меди и алюминия приблизительно 0,004°С⁻¹. Измеряя сопротивление жилы, определяют место повреждения кабеля.

Электрическое сопротивление изоляции кабелей $R_{из}$. Этот параметр в значительной мере определяется свойствами диэлектрических материалов, используемых в качестве изоляции кабелей и проводов. Основные свойства различных материалов, применяемых для изоляции электрических кабелей и проводов, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Материал изоляции	Удельное объемное сопротивление, Ом·м	Электрическая прочность, МВ/м	Нагревостойкость, °С
Полиэтилен	10^{14} – 10^{15}	40–150	105–130
Поливинилхлорид	10^{12} – 10^{13}	20–50	60–80
Кремнийорганическая резина	10^{12}	10–20	220
Фторопласт-4	10^{14} – 10^{16}	40–250	300

Выбор марки провода (кабеля) осуществляется исходя из величины допустимой токовой нагрузки с учетом допустимого падения напряжения (в случае длинных соединений), а также условий эксплуатации.

Наиболее часто используют следующие марки проводов с многопроволочной жилой: МГТФ – фторопластовая изоляция, МГШБ – волокнистая и поливинилхлоридная изоляция, МПО – полиэтиленовая изоляция.

В соответствии с ГОСТ установлен следующий ряд сечений жил кабелей и проводов, мм²: 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,50; 0,75; 1,0; 1,2;

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500; 625; 800; 1000.

1.4. Печатные платы

Для создания конкретной электронной схемы радиокомпоненты (микросхемы, транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы) локализуются на специальном конструктивном модуле – печатной плате. Соединения между элементами, соответствующие принципиальной схеме устройства, реализуются в виде металлизированных проводников на поверхности платы, тем самым исключая необходимость в дополнительной распайке проводников.

Технология изготовления печатных плат заключается в следующем. По принципиальной электрической схеме производится разработка топологии печатной платы, т.е. нанесение в определенном масштабе соединений между выводами компонентов и определение мест их локализации. По топологическому чертежу изготавливается фотошаблон, т.е. пластинка из непрозрачного материала (например, из целлулоида), на которой намечаются участки для последующего травления печатной платы. Затем проводится процесс фотолитографии, т.е. на фольгированный материал (текстолит, гетинакс и др.), покрытый фоточувствительным слоем, производится проецирование рисунка фотошаблона. В процессе проявления участки платы, свободные от металлизации, остаются открытыми, а металлизированные проводники покрываются защитным слоем окисла. В процессе травления в растворе хлорного железа металл на незащищенных участках разрушается, и остаются лишь металлизированные дорожки между элементами. После этого платы очищаются от окисла, проводится металлизация отверстий и устанавливаются необходимые крепежные детали. Необходимые радиокомпоненты устанавливаются на печатную плату в процессе монтажа.

Основными параметрами при конструировании печатных плат являются плотность монтажа, количество внешних выводов, ширина и шаг трассировки печатных проводников, диаметр контактных площадок, число проводников, которое можно провести между двумя соседними отверстиями, число слоев печатной платы с металлизацией.

При расчете элементов печатного монтажа следует учитывать и технологические особенности производства, допуски на отклонения параметров элементов печатного монтажа, установочные характеристики корпусов интегральных микросхем, требования по организации связей, вытекающие из схемы функционального узла.

Расстояние между двумя центрами двух соседних отверстий в плате (A) условно делят на зоны контактной площадки D , зона одного печатного

проводника W , зона зазора между соседними печатными элементами S . Тогда расстояние между двумя соседними отверстиями, лимитирующее в основном плотность монтажа, вычисляется по формуле

$$A = D + nW + (n + 1) S \leq ka_0,$$

где n – число проводников между двумя соседними отверстиями; $a_0 = 2,5$ мм – шаг основной координатной сетки; $k = 0, 1, 2, \dots$ – коэффициент шага основной координатной сетки.

Диаметр контактной площадки D_k не может быть меньше величины, обеспечивающей гарантированную ширину полосы металла вокруг отверстия, и определяется как

$$D_k = D_c + 2B_{\min},$$

где D_c – диаметр зоны сверления; $B_{\min} = 0,1 \dots 0,15$ мм – минимальная ширина на гарантированной полосе металла.

Минимальный шаг трассировки для печатных плат составляет 1,25 мм.

Более сложен расчет компоновки многослойных печатных плат, так как металлизированные дорожки проходят не только на двух поверхностях платы, но и внутри ее. Топология соединения в этом случае чаще всего рассчитывается на ЭВМ, каждый слой конструируется отдельно, и на этапе сборки все слои соединяются вместе и производится металлизация отверстий. На многослойной печатной плате удастся осуществить более плотную компоновку элементов, т.е. создать на той же площади более сложный функциональный узел. Однако и стоимость такой платы в несколько раз выше односторонней или двусторонней однослойной.

1.5. Разъемные соединения

Разъемные соединения необходимы для электрического и механического контакта различных узлов и блоков электронных устройств.

К разъемным соединениям относятся соединительные и установочные изделия. Соединительные изделия предназначены для быстрого электрического и механического соединения проводов, жгутов, кабелей, печатных плат и т.д.

Установочные изделия предназначены для установки и крепления электровакуумных, полупроводниковых приборов, реле, предохранителей, конденсаторов и т.д.

В зависимости от вида соединяемых цепей соединительные изделия подразделяются на: низкочастотные низковольтные соединители (разъемы),

высоковольтные соединители, радиочастотные соединители и комбинированные соединители.

Низкочастотные низковольтные соединители предназначены для соединения в цепях с частотой от 3 МГц и напряжением до 1,5 кВ. Они подразделяются на приборные, для печатного монтажа и специальные. Приборные соединители предназначены для электрического соединения между собой узлов и блоков аппаратуры. Соединители для печатного монтажа применяются для электрического соединения узлов аппаратуры на печатных платах. Они бывают торцевыми и навесными.

Контактный узел разъемных соединителей (разъемов) состоит из штыря и гнезда. Электрическое соединение в сочлененном контакте осуществляется соприкосновением поверхностей штыря и гнезда с определенным усилием, которое создается соответствующими пружинами.

К контактам разъемов предъявляются следующие требования. Они должны иметь низкое и стабильное переходное сопротивление и достаточно малое усилие сочленения и расчленения. По геометрическому виду приборные разъемы подразделяются на цилиндрические и прямоугольные.

Наиболее применяемые в настоящее время разъемы серий РС, РСГС, 2РМ, 2РМД, РМГК, 2РМГСД, РМГ, ШР, СШР, ШРН, 2РТ состоят из двух частей – блочной и кабельной. Блочной частью является вилка, кабельной – розетка. Буква Г указывает на герметизацию блочной части разъема.

Прямоугольные разъемы подразделяются на серии РП-3, РП-10, РП-14, РША, РПКМ, РПМ, РПММ1, ГРПМ2. Соединители не имеют кожуха и могут иметь кабельные зажимы 5, 7, 9, 11, 12, 15, 18, 22, 30, 32, 42 контактов в один, два и три ряда. Наиболее часто применяемые из малогабаритных – это разъемы ГРПМ с 30, 46, 62, 90 и 122 контактами. Для соединения элементов печатного монтажа в настоящее время применяются малогабаритные разъемы типа МРН и типов СНО, СНП. Разъемы типа МРН бывают однорядными, трехрядными, с количеством контактов 4, 6, 8, 12, 14, 22. Разъемы СНО, СНП обычно также имеют от одного до трех рядов с числом контактов от 48 до 96.

2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Полупроводниковые приборы – это общее название разнообразных приборов, действие которых основано на свойствах полупроводников. В полупроводниковых приборах используются различные явления, связанные с чувствительностью полупроводников к внешним воздействиям (изменению температуры, действию света, электрических и магнитных полей и др.), а также поверхностные свойства полупроводников (контакт полупроводник–металл, полупроводник–диэлектрик и их сочетаний).

Прежде чем перейти к изучению полупроводниковых приборов, необходимо рассмотреть основные положения, связанные с механизмом протекания электрического тока в полупроводниковых материалах.

2.1. Электропроводность полупроводниковых материалов

К полупроводникам относится большое количество твердых кристаллических веществ с электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре находится между значениями удельных сопротивлений проводников и диэлектриков, как это видно из табл. 4.

Таблица 4

Класс материалов	Удельное сопротивление при 20°C, Ом·м	Тип электропроводности
Проводники	$10^{-8}-10^{-5}$	Электронная
Полупроводники	$10^{-6}-10^{+8}$	"
Диэлектрики	$10^{+7}-10^{+17}$	Ионная и электронная

В электронной технике используются элементарные полупроводниковые материалы (Ge, Si); полупроводниковые соединения ($A^{III}B^V$, $A^{III}B^{VI}$, $A^{IV}B^{IV}$, $A^{II}B^{IV}C_2^V$); аморфные полупроводники, органические полупроводники и пр.

2.2. Электронно-дырочный переход

Электронно-дырочный, или *p-n*-переход, образуется между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электронную, а другая – дырочную электропроводность (рис. 3). На практике *p-n*-переход получают не механическим соединением двух кристаллов *p* и *n* типа, а введением на определенном участке в примесный полупроводник дополнительной легирующей примеси.

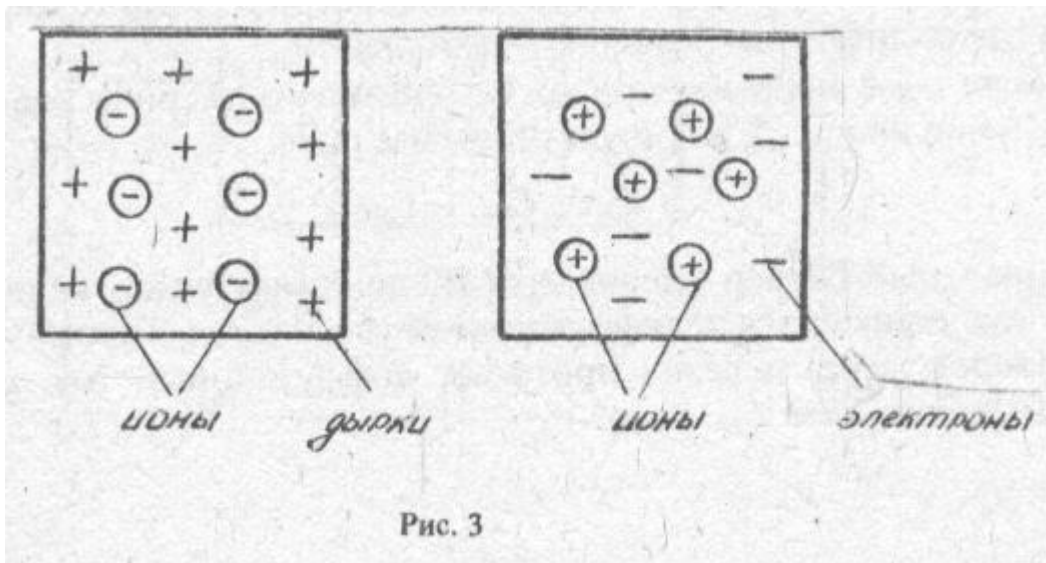


Рис. 3

На границе раздела p - и n -области в результате диффузии (диффузионного тока) электронов ($-$) в p -область и дырок ($+$) в n -область происходит рекомбинация дырок в p -полупроводнике и электронов в n -полупроводнике. Диффузия будет происходить до тех пор, пока не установится постоянное динамическое равновесие. Вблизи границы раздела образуется область с некомпенсированными объемными зарядами соответствующего знака (рис. 4).

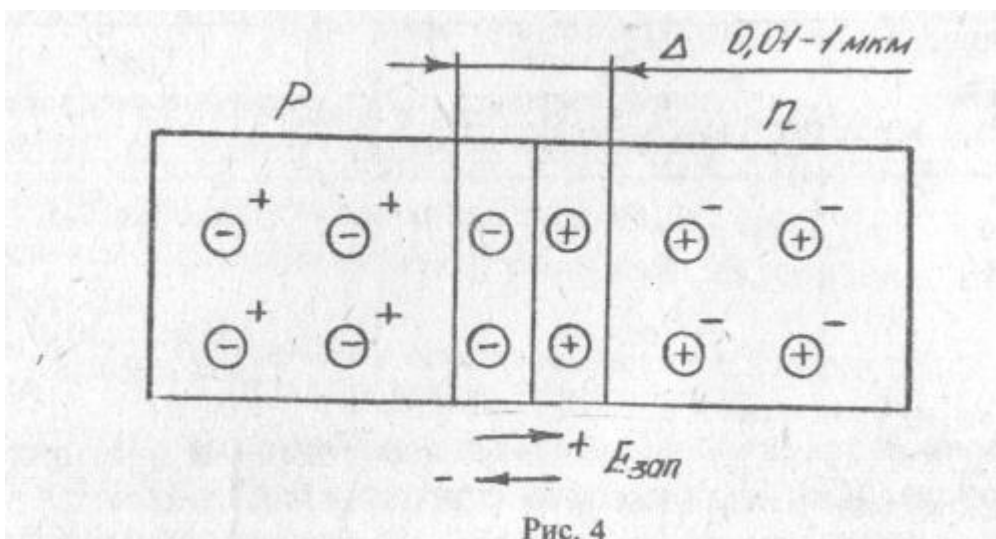


Рис. 4

В граничном слое образуется электрическое поле, направленное от n -области к p -области. Это поле называют запирающим $E_{\text{зап}}$. Запирающее

поле вызывает встречный ток неосновных носителей (дырок из n -области и электронов из p -области). Этот ток называется дрейфовым и направлен встречно к диффузионному. Результирующий ток через $p-n$ -переход равен нулю. Равенство токов устанавливается при определенной разности потенциалов, которая называется контактной разностью потенциалов ϕ_k . ϕ_k составляет десятые доли вольта. Значение ϕ_k определяет высоту потенциального барьера $p-n$ -перехода, который препятствует диффузии основных носителей.

Если к $p-n$ -переходу приложить внешнее электрическое поле так, как показано на рис. 5, то результирующее поле

$$E_{рез} = E_{зап} - E_{вн}.$$

Потенциальный барьер уменьшится (поле станет ускоряющим), дрейфовый ток уменьшится, а диффузионный увеличится. Такое включение, при котором через переход протекает диффузионный ток, называют прямым включением.

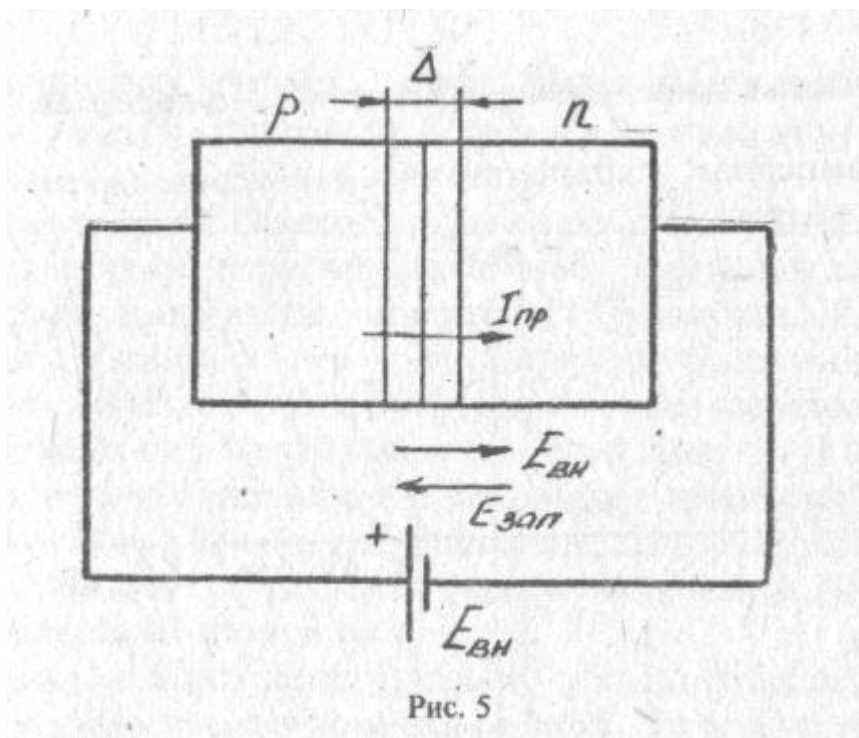


Рис. 5

При обратном включении $p-n$ -перехода (рис. 6) $E_{рез} = E_{зап} + E_{вн}$. Ширина запирающего слоя Δ увеличится. Потенциальный барьер на границе слоев увеличится. Диффузионный ток уменьшится, а дрейфовый ток увеличится. Так как дрейфовый ток обусловлен неосновными носителями, концентрация которых намного меньше концентрации основных носителей, то

ток через переход невелик, т.е. он существенно (на несколько порядков) меньше прямого тока. Этим и объясняется вентиляльный эффект $p-n$ -перехода (т.е. способность проводить ток только в одном направлении).

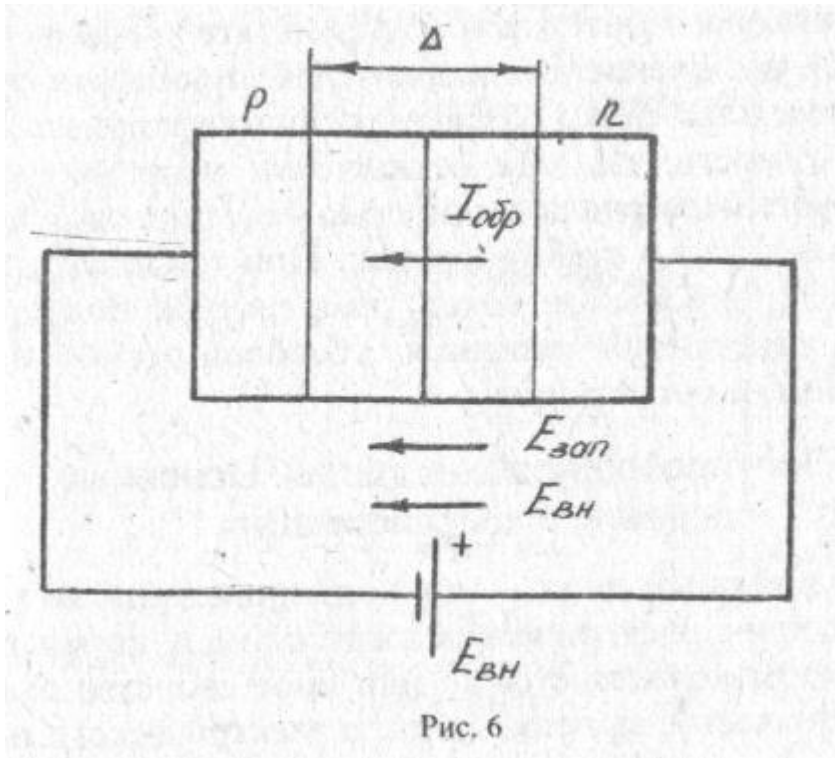


Рис. 6

Рис. 6

Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода

Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода имеет прямую и обратную ветви (рис. 7)

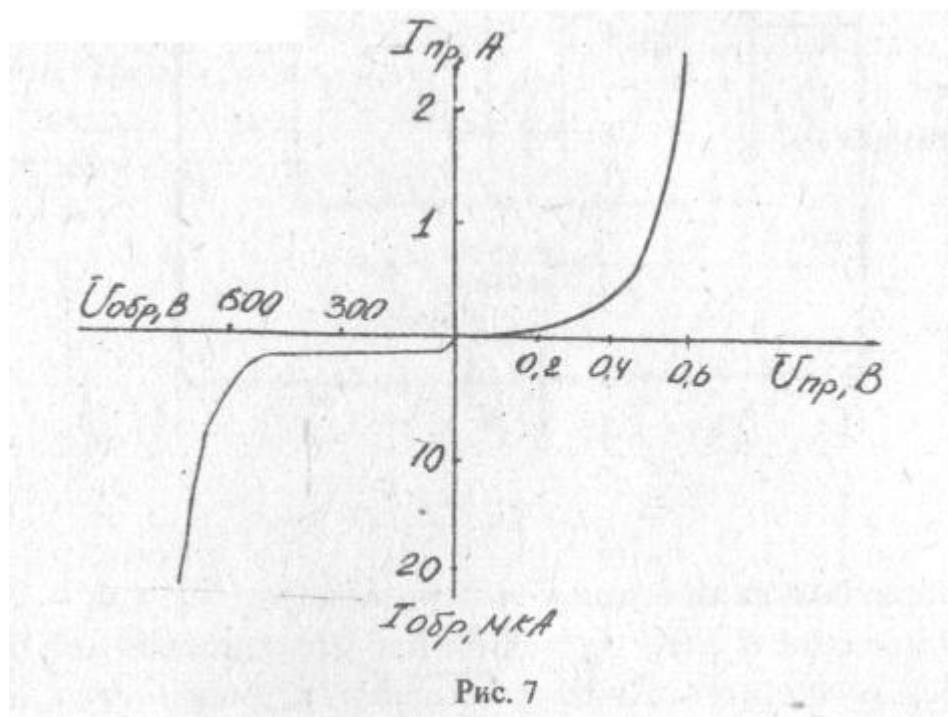


Рис. 7

При увеличении $U_{пр}$ ток возрастает, причем возрастание тока начинается при равенстве $U_{пр} = E_{зап}$. При увеличении $U_{обр}$ ток вначале очень мал и растет незначительно, а при достижении напряжения пробоя $U_{проб}$ резко увеличивается.

Различают пробое электрические и тепловые. При пробое неосновные носители получают достаточную энергию для ионизации атомов полупроводникового материала. В результате ударной ионизации начинается резкое увеличение числа носителей, процесс носит лавинообразный характер, и ток резко возрастает. Для электрического пробоя характерна обратимость, т.е. при отключении напряжения свойства полупроводникового материала полностью восстанавливаются. Этот вид пробоя используется в стабилитронах. При тепловом пробое, который наступает при больших токах, температура полупроводника увеличивается, и кристалл разрушается. Тепловой пробой необратим, поэтому этот режим не допускается.

2.3. Полупроводниковые диоды. Основные сведения и классификация

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя внешними выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего перехода. В качестве выпрямляющего электрического перехода в полупроводниковых

диодах может быть использован электронно-дырочный переход $p-n$ -переход), гетеропереход или контакт металл–полупроводник.

Выпрямляющий переход кроме эффекта выпрямления обладает и другими свойствами: нелинейностью вольт-амперной характеристики; явлением ударной ионизации атомов полупроводника при относительно больших для данного перехода напряжениях; явлением туннелирования носителей сквозь потенциальный барьер перехода при определенных условиях; барьерной емкостью. Эти свойства используются для создания различных видов полупроводниковых диодов: выпрямительных диодов, стабилизаторов, стабилитронов, лавинно-пролетных диодов, туннельных диодов, обратных диодов, варикапов, фотодиодов, светодиодов, диодов Шоттки и пр.

В зависимости от конструктивно-технологических особенностей различают плоскостные и точечные диоды. Точечные диоды предназначены для работы на сверхвысоких частотах.

2.3.1. Выпрямительные диоды

Основные сведения и характеристики

Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока. На рис. 8, а приведено условное обозначение выпрямительного диода, а также его вольт-амперная характеристика (ВАХ) – рис. 8, б. Выпрямительные свойства прибора определяются нелинейностью его ВАХ. Если к диоду приложено прямое напряжение (плюс на аноде, минус на катоде), что соответствует первому квадранту ВАХ, сопротивление диода мало и даже при малых значениях прямого напряжения $U_{пр}$ протекает большой ток $I_{пр}$, обусловленный основными носителями заряда. Если к диоду приложить напряжение обратной полярности $U_{обр}$, то сопротивление прибора велико, и даже при больших значениях $U_{обр}$ протекает маленький ток $I_{обр}$, обусловленный неосновными носителями заряда.

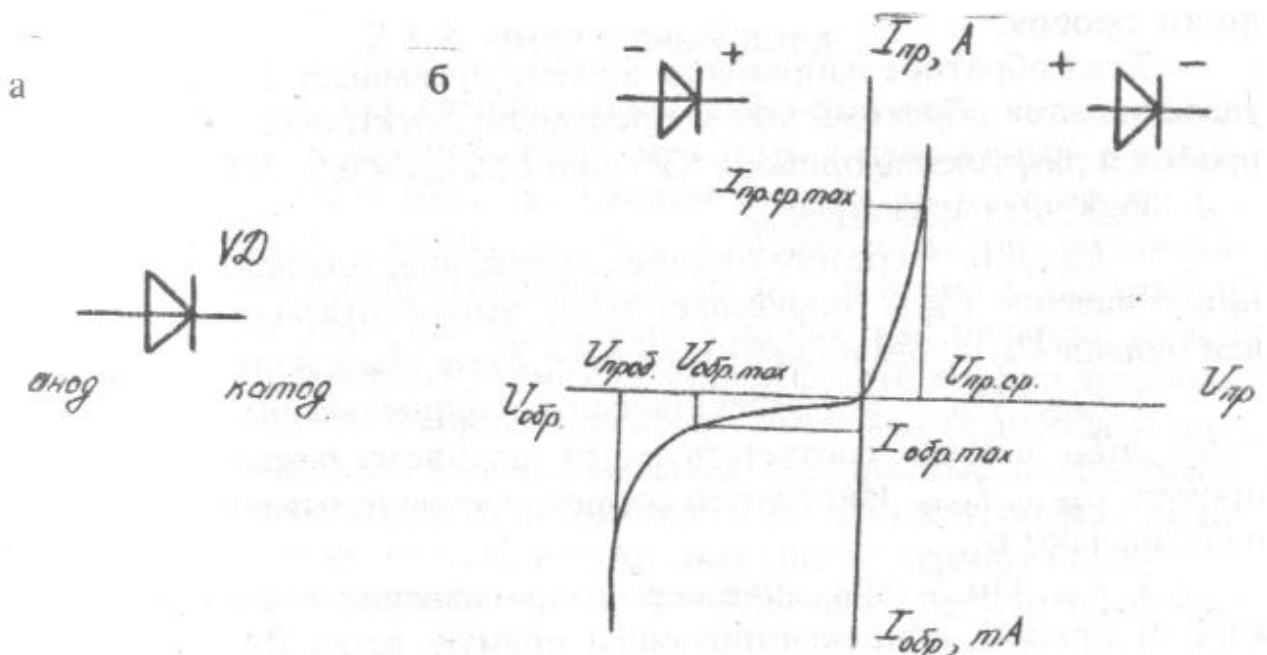


Рис. 8

а – условное обозначение выпрямительного диода; б – вольт-амперная характеристика

Рис. 8

а – условное обозначение выпрямительного диода; б – вольт-амперная характеристика

Основные параметры диодов

Предельно допустимые характеристики:

1. $I_{пр.ср.мах}$, А, – максимально допустимый средний прямой ток. Это значение определяется мощностью, рассеиваемой на диоде, и может указываться для случаев работы без радиатора и со стандартным радиатором, а также для работы в цепях постоянного тока и импульсных режимах.

По максимально допустимому току диоды разбиты на три группы:

диоды малой мощности ($I_{пр.ср.мах} \leq 0,3$ А);

диоды средней мощности ($0,3$ А < $I_{пр.ср.мах} < 10$ А),

мощные (силовые) диоды ($I_{пр.ср.мах} \geq 10$ А).

2. $U_{обр.мах}$, В, – максимально допустимое обратное напряжение, которое может выдержать диод данного типа, не подвергаясь опасности пробоя.

Если обратное напряжение в схеме превышает $U_{обр.мах}$, то резко увеличивается обратный ток и происходят электрический и тепловой пробой и разрушение прибора. Обычно $U_{обр.мах} = 0,5 \dots 0,8 U_{проб}$.

Рабочие параметры:

1. $U_{\text{пр.ср}}$, В, – среднее прямое напряжение, соответствующее току $I_{\text{пр.ср}}$. Значение $U_{\text{пр.ср}}$ определяет к.п.д. выпрямительного устройства: чем меньше $U_{\text{пр.ср}}$, тем ниже потери $\Delta P = U_{\text{пр.ср}} \cdot I_{\text{пр.ср}}$ и выше к.п.д.

2. $r_{\text{диф}}$, Ом, – дифференциальное сопротивление диода, $r_{\text{диф}} = \Delta U_{\text{пр}} / \Delta I_{\text{пр}}$ в точке, соответствующей заданному режиму работы, например, $U_{\text{пр.ср}}$, $I_{\text{пр.ср}}$. Иногда это сопротивление называют статическим и обозначают $r_{\text{ст}}$.

3. $r_{\text{дин}}$, Ом, – динамическое сопротивление – определяется наклоном прямой, аппроксимирующей прямую ветвь ВАХ в заданной точке.

4. Интервал температур окружающей среды (для кремниевых приборов обычно от минус 60 до 125°C) и максимальная температура корпуса.

5. Предельная (граничная) частота $f_{\text{гран}}$ выпрямительных диодов невысока, как правило, не превышает 500 Гц–20 кГц.

Выбор типа диода

Выбор типа диода производится по справочнику. При этом определяющими являются два параметра: $I_{\text{пр.ср max}}$ и $U_{\text{обр max}}$, которые должны превышать соответствующие параметры схемы выпрямления. У подобранного таким образом диода одновременно определяется $U_{\text{пр.ср}}$.

Выпрямительные диоды изготавливают из кремния, германия, арсенида галлия и других материалов.

Германиевые диоды имеют более простую по сравнению с кремниевыми приборами конструкцию и меньше прямое падение напряжения $U_{\text{пр.ср}}$. Однако по всем другим параметрам кремниевые диоды лучше – обратный ток $I_{\text{обр}}$ на 1–2 порядка меньше, чем у германиевых, шире рабочий диапазон температур, больше допустимое обратное напряжение, в 2–3 раза выше предельная рабочая частота. Промышленностью выпускаются неуправляемые выпрямительные диоды на токи до 10 000 А с допустимым обратным напряжением до 4000 В, а также столбы и блоки, состоящие из нескольких диодов.

2.3.2. Импульсный диод

Импульсный диод – это полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы (вплоть до наносекундного диапазона). Качество импульсного диода характеризует время восстановления обратного сопротивления диода $t_{\text{вос}}$ и время установления прямого сопротивления $t_{\text{уст}}$. Импульсные диоды, как правило, имеют малую емкость $C_{\text{д}}$, измеряемую между анодом и катодом при заданном обратном напряжении. В справочниках для импульсных диодов указываются также $U_{\text{пр.ср}}$, $I_{\text{пр.ср}}$, $U_{\text{обр max}}$, $I_{\text{пр.имп max}}$.

Импульсные диоды имеют точечную или плоскостную конструкцию. Подобно другим маломощным выпрямительным диодам, импульсные диоды герметизируются в стеклянные, металлоглазненные, металлокерамические или пластмассовые корпуса.

2.3.3. Стабилитроны

Стабилитроном называется полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя при обратном включении слабо зависит от тока в заданном диапазоне. Эти приборы предназначены для стабилизации напряжения. Рабочая ветвь стабилитрона – обратная (рис. 9), следовательно, они работают в режиме пробоя.

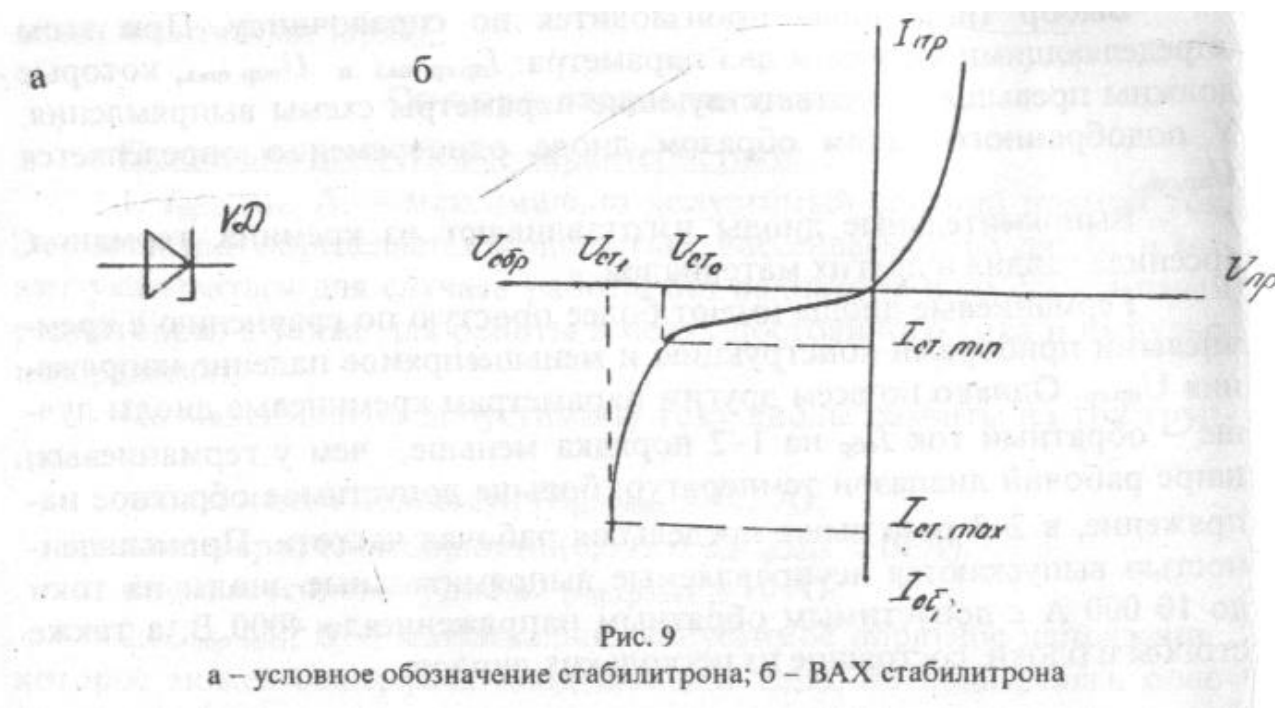


Рис. 9

а – условное обозначение стабилитрона; б – ВАХ стабилитрона

При электрическом пробое стабилитрон сохраняет работоспособность, если ток не превышает $I_{ст\ max}$. Эффект стабилизации достигается при токах $I_{ст\ min} \leq I_{ст} \leq I_{ст\ max}$. При этом падение напряжения на стабилитроне меняется в небольших пределах от $U_{ст.0}$ до $U_{ст.1}$.

Кремниевые стабилитроны выпускаются с напряжением стабилизации от единиц до сотен вольт, токи стабилизации – до десятков ампер. При-

боры имеют температурный коэффициент изменения напряжения стабилизации ТКН от минус 6 до 288 мВ/°С. При выборе стабилитрона следует отдавать предпочтение приборам с меньшим ТКН и малым дифференциальным сопротивлением $r_{\text{диф}} = \Delta U_{\text{ст}}/\Delta I_{\text{ст}}$.

Разновидностью кремниевых стабилитронов являются стабисторы. В этих диодах для стабилизации низких напряжений (до 1 В) используется прямая ветвь ВАХ.

2.3.4. Диоды Шоттки

Диод Шоттки – это полупроводниковый прибор, использующий выпрямительные свойства контакта металл–полупроводник. Так как в приборе отсутствует накопление неосновных носителей заряда, диод Шоттки используют в качестве элемента интегральных микросхем и для импульсных сверхвысокочастотных устройств. Силовые (мощные) диоды Шоттки для силовой электроники изготавливаются на основе кремния *n*-типа. Они имеют рабочие токи до нескольких сот ампер, исключительно высокое быстродействие, однако их рабочее напряжение $U_{\text{обр max}}$ мало и не превышает нескольких десятков вольт. Обратные токи диодов Шоттки на 3–4 порядка больше обратных токов диодов с *p-n*-переходом, а прямые напряжения для диодов Шоттки значительно ниже. В настоящее время силовые диоды Шоттки наиболее эффективны как низковольтные быстродействующие диоды на большие токи.

Список литературы

1. **Забродин Ю. С.** Промышленная электроника. – М.: Высш. шк., – 1982.
2. Основы промышленной электроники: Учеб. для неэлектротехнических спец. вузов /В. Г. Герасимов, О. М. Князьков, А. Е. Краснопольский, В. В. Сухоруков; Под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., – 1986. – 336 с.
3. **Пасынков В. В., Чиркин Л. К., Шинков А. Д.** Полупроводниковые приборы. – М.: Высш. шк., 1981. – 431 с.
4. Электротехнический справочник: В 3 тт. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712 с.
5. Основы радиоэлектроники: Учеб. пособие /Ю. И. Волощенко, Ю. Ю. Мартюшев, И. Н. Никитина и др.; Под ред. Г. Д. Петрухина. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 416 с.
6. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники: В 3 тт.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – Т. 1. 598 с.
7. **Барков В. А.** Электроника робототехнических систем. Электронные элементы полупроводниковых устройств. Силовые полупроводниковые приборы.: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГТУ, 1992. – 144 с.
8. **Овечкин Ю. А.** Полупроводниковые приборы. – М.: Высш. шк., 1974. – 303 с.
9. Справочник по электрическим конденсаторам /Под ред. В. В. Ермуратского. – Кишинев.: Штинца, 1982. – 310 с.
10. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справ. /А. В. Баюков, А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев и др.; Под ред. Н. Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 744 с.

Содержание

Введение	3
1. ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ	3
1.1. Резисторы	3
1.2. Электрические конденсаторы	7
1.3. Провода и кабели	10
1.4. Печатные платы	11
1.5. Разъемные соединения	13
2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РАЗЪЕМЫ	14
2.1. Электропроводность полупроводниковых материалов	15
2.2. Электронно-дырочный переход	15
2.3. Полупроводниковые диоды. Основные сведения и клас- сификация	18
2.3.1. Выпрямительные диоды	19
2.3.2. Импульсный диод	21
2.3.3. Стабилитроны	22
2.3.4. Диоды Шоттки	22
Список литературы	23

Евстигнеев Анатолий Николаевич
Кузьмина Татьяна Георгиевна
Новотельнова Анна Владимировна
Потоцкий Андрей Петрович

Элементная база современных электронных схем

Часть 1

Методические указания
для самостоятельного изучения дисциплины
“Электротехника и электроника”
для студентов всех специальностей

Редактор Е. Л. Масальцева

Корректор Н. И. Михайлова

ЛР № 020414 от 12.02.97

Подписано в печать 06.98. Формат 60x84 1/16. Бум. писчая

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,4. Печ. л. 1,5. Уч. -изд. л. 1,2

Тираж 500 экз. Заказ № С 18.

СПб ГАХПТ.191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9
ИПЦ СПбГАХПТ, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9