

Лекция 4.

Назначение и классификация диодов. Общие параметры диодов

Полупроводниковым диодом называют электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним электрическим переходом, имеющий два вывода.

В зависимости от области применения полупроводниковые диоды делятся на следующие основные группы: выпрямительные, универсальные, импульсные, сверхвысокочастотные, варикапы, туннельные, обращенные, фото- и излучательные, стабилитроны.

По типу *p-n*-перехода различают полупроводниковые диоды плоскостные и точечные. Плоскостным называют *p-n*-переход, линейные размеры которого, определяющие его площадь, значительно больше толщины. К точечным относят переходы, размеры которых, определяющие их площадь, меньше толщины области объемного заряда. Система обозначений полупроводниковых диодов состоит из буквенных и цифровых элементов. Для диодов, разработанных после 1964 г., в качестве первого элемента обозначения используют букву или цифру, определяющую исходный материал, из которого изготовлен диод: «Г» или 1 — германий или его соединения, «К» или 2 — кремний или его соединения, «А» или 3 — соединения галлия. Вторым элементом служит буква, определяющая подкласс прибора (выпрямительные — «Д», стабилитроны — «С» и др.).

После второго элемента идет число, характеризующее назначение прибора, номер разработки. Обозначение заканчивается буквами русского алфавита, характеризующими специальные параметры диода.

Система обозначений диодов, разработанных до 1964 г., состоит из двух или трех элементов. Первым элементом является буква «Д». Вторым элементом служит число, указывающее классификационную группу диода. Третьим элементом является буква, характеризующая разновидность диода в данной группе.

Свойства полупроводниковых диодов оценивают параметрами. Различают общие параметры, которыми характеризуется любой полупроводниковый диод, специальные параметры, присущие только отдельным диодам.

К общим параметрам диодов относят: допустимую температуру перехода, допустимую мощность, рассеиваемую диодом, допустимые прямой ток и обратное напряжение.

Когда через диод проходит ток, при заданном напряжении на диоде выделяется мощность $P_d = UI$. Выделение этой мощности сопровождается нагреванием диода, что приводит к росту обратного тока и увеличению вероятности возникновения теплового пробоя *p-n*-перехода. Для исключения теплового пробоя температура *p-n*-перехода должна быть меньше допустимой

температуры перехода $T_{п\text{ max}}$. Как правило, эта температура для германиевых диодов составляет 70°C , а для кремниевых — 125°C . Выделяемая теплота рассеивается диодом в окружающую среду, имеющую температуру $T_{ср}$.

Перепад температур между переходом и средой определяется выражением

$$T_{п} - T_{ср} = R_{т} P_{д}, \quad (3.1)$$

где $R_{т}$ — тепловое сопротивление, характеризующее условия отвода теплоты от диода (конструкцию корпуса, наличие радиаторов и т.д.). Величина $R_{т}$ определяется экспериментально и приводится в справочниках.

При допустимой температуре перехода на диоде выделяется допустимая рассеиваемая мощность $P_{д\text{ max}} = (T_{п\text{ max}} - T_{ср}) / R_{т}$. Режим диода необходимо выбирать из условия $UI \leq P_{д\text{ max}}$.

Температура диода зависит от прямого тока. Прямой ток, при котором температура p - n -перехода диода достигает значения $T_{п\text{ max}}$, называют допустимым прямым током и обозначают $I_{пр\text{ max}}$.

Важным параметром диодов является допустимое обратное напряжение $U_{обр\text{ max}}$, при котором не происходит пробоя p - n -перехода. Обычно $U_{обр\text{ max}} \leq 0,8U_{проб}$.

Кроме вышеперечисленных, общими для всех диодов считаются параметры, определяемые по вольт-амперным характеристикам (рис. 3.1)

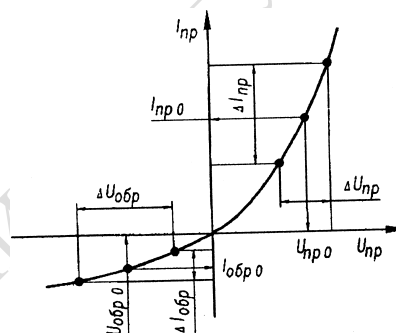


Рис. 3.1. Иллюстрация к определению приращений токов и напряжений по вольт-амперной характеристике диода

Прямое и обратное сопротивления диода постоянному току выражаются следующими соотношениями:

$$r_{пр.} = \frac{U_{пр0}}{I_{пр0}}, \quad r_{обр.} = \frac{U_{обр0}}{I_{обр0}}, \quad (3.2)$$

Прямое и обратное дифференциальные сопротивления (сопротивления переменному току):

$$r_{диф.пр.} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}}; \quad r_{диф.обр.} = \frac{\Delta U_{обр}}{\Delta I_{обр}} \quad (3.3)$$

Выпрямительные диоды

Выпрямительными называют диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока. Принцип действия выпрямительного диода основан на односторонней проводимости p - n -перехода. Условное графическое изображение выпрямительного диода приведено на рис. 3.2.

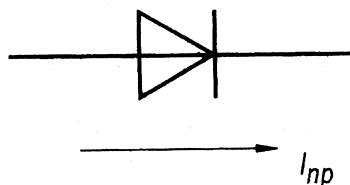


Рис. 3.2. Графическое изображение выпрямительного диода

Выпрямительные диоды малой мощности

К ним относятся диоды, поставляемые промышленностью на прямой ток до 300 мА. Справочным параметром выпрямительных диодов малой мощности является допустимый выпрямленный ток (допустимое среднее значение прямого тока), который определяет в заданном диапазоне температур допустимое среднее за период значение длительно протекающих через диод импульсов прямого тока синусоидальной формы при паузах в 180° (полупериод) и частоте 50 Гц. Максимальное обратное напряжение этих диодов лежит в диапазоне от десятков вольт до 1200 В. На более высокие напряжения промышленностью выпускаются выпрямительные столбы, использующие последовательное соединение диодов. Обратные токи не превышают 300 мкА для германиевых диодов и 10 мкА для кремниевых. С точки зрения частотных свойств диоды рассматриваемого типа подразделяют на низкочастотные (до 400 Гц) и высокочастотные (10—20 кГц). Конструкция выпрямительных диодов малой мощности приведена на рис. 3.3, а на примере сплавного германиевого диода Д7Ж ($I_{a, \text{ср. доп}} = 300$ мА, $U_{b, \text{доп}} = 700$ В), а его вольт-амперная характеристика — на рис. 3.3, б.

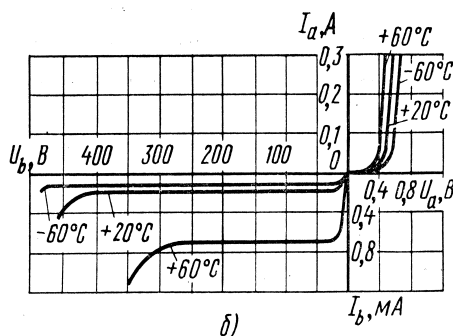
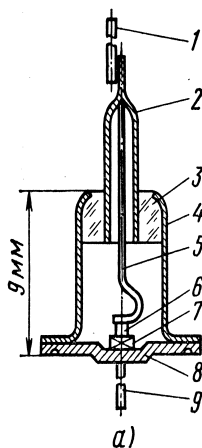


Рис. 3.3. Конструкция маломощных германиевых выпрямительных диодов

Д7А — Д7Ж (а):

- 1 — внешний вывод (анод); 2 — трубка (штенгель); 3 — стеклянный изолятор; 4 — корпус;
5 — внутренний вывод анода; 6 — таблетка индия; 7 — кристалл германия;
8 — кристаллодержатель; 9 — внешний вывод (катод). Вольт-амперная характеристика диода Д7Ж (б)

Выпрямительные диоды средней мощности

К этому типу относятся диоды, допустимое среднее значение прямого тока которых лежит в пределах 300 мА — 10 А. Большой прямой ток этих диодов по сравнению с маломощными диодами достигается увеличением размеров кристалла, в частности рабочей площади p - n -перехода. Диоды средней мощности выпускаются преимущественно кремниевыми. В связи с этим обратный ток этих диодов при сравнительно большой площади p - n -перехода достаточно мал (несколько десятков микроампер). Теплота, выделяемая в кристалле от протекания прямого и обратного токов в диодах средней мощности, уже не может быть рассеяна корпусом прибора.

Для улучшения условий теплоотвода в этих диодах применяют дополнительные охладители-радиаторы. Радиаторы изготавливают из металла, обладающего хорошей теплопроводностью (обычно сплавы алюминия) и развитой поверхностью для лучшей передачи теплоты в окружающую среду. Для улучшения излучающей способности радиаторы часто подвергают чернению. В качестве радиатора иногда может быть использовано шасси прибора. Для крепления радиатора корпус диода имеет стержень с винтовой нарезкой. Диоды с плоским основанием корпуса крепят (прижимают) к радиатору с помощью фланцевого соединения. Пример возможной конструкции выпрямительных диодов средней мощности приведен на рис. 3.4, а На рис. 3.4, б приведена вольт-амперная характеристика диода Д205 ($I_{a, \text{ср. доп}} = 400 \text{ мА}$, $U_{b, \text{доп}} = 400 \text{ В}$).

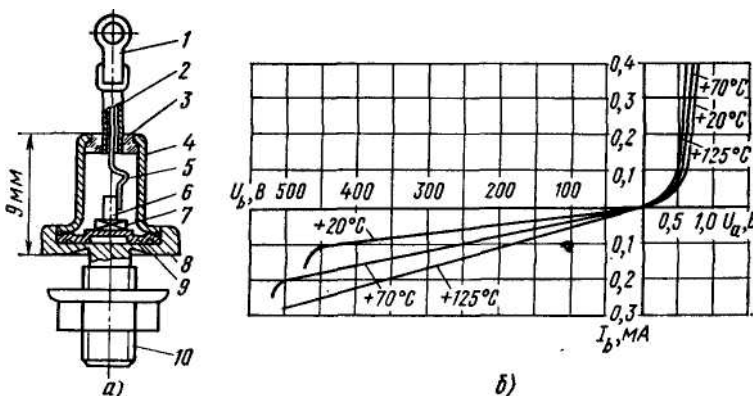


Рис. 3.4. Конструкция кремниевых выпрямительных диодов средней мощности Д202 — Д205 (а): 1 — внешний вывод (анод); 2 — трубка

(штенгель); 3 — стеклянный изолятор; 4 — корпус;
5 — внутренний вывод анода; 6 — алюминий; 7 — кристалл кремния; 8 —
теплоотводящее основание; 9 — кристаллодержатель; 10 — внешний вывод
(катод).

Вольт-амперная характеристика диода Д205 (б)

Мощные (силовые) диоды

К данному типу относятся диоды на токи от 10 А и выше. Отечественная промышленность выпускает силовые диоды на токи 10, 16, 25, 40 и т. д. до 1000 А и обратные напряжения до 3500 В. Силовые диоды имеют градацию по частоте и охватывают частотный диапазон применения до десятков кГц.

Мощные диоды изготовляют преимущественно из кремния. Кремниевая пластина с *p-n*-переходом, создаваемым диффузионным методом, для таких диодов представляет собой диск диаметром 10—100 мм и толщиной 0,3—0,6 мм. Пример возможной конструкции мощного диода показан на рис. 3.5.

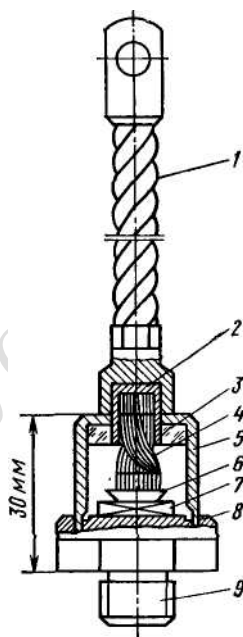


Рис. 3.5. Конструкция мощного кремниевого диода ВЛ-200: 1 — внешний гибкий вывод (анод); 2 — стакан; 3 — стеклянный изолятор; 4 — внутренний гибкий вывод анода; 5 — корпус;
6 — чашечка; 7 — кристалл с *p-n*-переходом; 8 — кристаллодержатель (катод);
9 — шпилька для крепления к радиатору

Рассмотрим некоторые специфические особенности мощных диодов.

Работа при больших токах и высоких обратных напряжениях связана с выделением значительной мощности в *p-n*-переходе. В связи с этим здесь должны предусматриваться эффективные методы отвода теплоты. В установках с мощными диодами применяют воздушное и жидкостное

охлаждение. При воздушном охлаждении отвод теплоты производится с помощью радиатора и проходящего вдоль его теплоотводящих ребер потока воздуха. При этом охлаждение может быть естественным, если отвод теплоты в окружающую среду определяется естественной конвекцией воздуха, или принудительным, если используется принудительный обдув корпуса прибора и его радиатора с помощью вентилятора.

При жидкостном охлаждении в радиатор по специальным каналам пропускается теплоотводящая жидкость, например, вода, антифриз, трансформаторное масло, синтетические диэлектрические жидкости. В последние годы широкое применение получило испарительное охлаждение, основанное на отводе теплоты за счет образования пузырей пара у теплоотводящей поверхности охладителя. Образовавшийся пар поступает в теплообменник, связанный с внешней средой. Система испарительного охлаждения основана на принципе непрерывного замкнутого цикла: испарение жидкости в корпусе диода в результате его нагрева в процессе работы — конденсация паров в теплообменнике вследствие охлаждения — поступление охлажденной жидкости вновь к нагретой поверхности. В качестве жидкости при испарительном охлаждении применяют воду, этиловый спирт, фреон.

Другая особенность мощных диодов — необходимость их защиты от кратковременных перенапряжений, возникающих при резких сбросах нагрузки, коммутационных и аварийных режимах, а также атмосферных воздействиях. При этом к диоду прикладывается в обратном направлении помимо напряжения, обусловленного схемой (на которое производится выбор диодов), дополнительный импульс напряжения. При отсутствии защитных мер диод может выйти из строя.

Выход диода из строя связан вначале с электрическим пробоем p - n -перехода, который затем переходит в тепловой пробой, происходящий часто не внутри p - n -перехода, а в месте выхода его на поверхность кристалла. Причина заключается в том, что в реальном диоде в месте выхода p - n -перехода на поверхность имеются участки, в которых существенно сужена область объемного заряда. Это обуславливается рядом факторов (нарушение структуры кристалла, различные загрязнения поверхности и т. д.). Естественно, что напряженность поля в этих участках выше, а напряжение электрического пробоя ниже, чем внутри p - n -перехода. Поэтому при перенапряжениях возникает электрический пробой p - n -перехода в этих участках и весь обратный ток проходит через них. Плотность тока достигает достаточно больших значений даже при сравнительно небольших обратных токах. Температура в участке пробоя резко повышается, что в конечном счете приводит к тепловому пробую и расплавлению кремния вблизи участка пробоя.

Таким образом, защита силового диода от перенапряжений заключается в переводе возможного электрического пробоя p - n -перехода с поверхностных участков в объемные. Поверхностный пробой устраняют за счет создания косого среза (фаски) по поверхности пластины монокристалла и применения

так называемого метода защитного кольца. Метод основан на внесении меньшей концентрации акцепторной примеси в периферийную кольцевую часть монокристалла по сравнению с внутренней. В связи с этим концентрация основных носителей заряда в периферийной части p -области будет меньшей, а толщина слоя объемного заряда (ширина p - n -перехода) — большей, чем в центральной части. Благодаря указанным мерам напряженность поля на наружной поверхности p - n -перехода будет существенно меньшей, чем в его внутренней области. При наличии перенапряжений возможный электрический пробой p - n -перехода может произойти только в объемной части, причем пробой носит лавинный характер. Поэтому силовые диоды с такой p - n -структурой называют лавинными.

Перенос возможного электрического пробоя в объемную часть перехода обеспечивает не только повышение и стабильность уровня напряжения лавинного пробоя U_L , но и значительное повышение мощности прибором при обратном напряжении благодаря его способности пропускать достаточно большой обратный ток без перегрева локальных участков. Последнее достигается тем, что лавинный пробой p - n -перехода носит объемный характер, распределяясь по большому числу микроканалов. Лишь при значительном обратном токе, когда пробой охватывает всю объемную часть перехода, в принципе возможен перегрев прибора и выход его из строя вследствие теплового пробоя. Поэтому действие импульсов перенапряжения должно быть кратковременным даже в случае применения лавинных диодов.

Рассмотрим подробнее параметры, характеризующие загрузку мощных диодов по току и напряжению и являющиеся важнейшими при их применении.

Токовая загрузка диода зависит от теплового режима работы его полупроводниковой структуры и характеризуется максимально допустимым средним значением прямого тока $I_{a \text{ max доп.}}$. В справочниках на диоды указывается предельный прямой ток I_n , который представляет собой среднее за период значение длительно протекающего через диод импульсов тока синусоидальной формы при паузах в 180° (полупериод) и частоте 50 Гц. Току I_n соответствует максимально допустимая температура нагрева полупроводниковой структуры в условиях охлаждения, оговариваемых в справочниках на диоды.

Поскольку основным критерием токовой загрузки диода является допустимая температура его полупроводниковой структуры, отличие $I_{a \text{ max доп.}}$ от I_n зависит от конкретных условий охлаждения в реальном устройстве. Важную роль при выборе токовой нагрузки играет форма кривой тока, протекающего через диод, и частота. Так, например, при той же форме кривой прямого тока, для которой указывается ток I_n , но частоте, много меньшей 50 Гц, существенно будут сказываться колебания температуры полупроводниковой структуры, обуславливаемые повышением температуры при протекании импульсов тока и ее понижением при охлаждении в токовых паузах. Максимальное значение температуры может превысить допустимое,

что приводит нередко к повреждению прибора. При этом ток $I_{a \text{ max доп}}$ следует выбирать меньше тока I_p . Данные для выбора диодов по току, соответствующие конкретным видам кривой протекающего тока, приводятся в справочниках. В основу расчетов положена мощность потерь в полупроводниковой структуре диода в процессе его работы. В подавляющем большинстве случаев ток I_p является предельно допустимым параметром использования диода по току при длительной работе.

Мощные диоды характеризуются также токовыми параметрами режима перегрузки и аварийного режима (ток рабочей перегрузки, ток аварийной перегрузки, ударный ток). Током рабочей перегрузки $I_{p.p}$ называют среднее значение тока диода, не вызывающего превышения максимально допустимой температуры полупроводниковой структуры из-за малого (указываемого в справочниках) времени его протекания ($I_{p.p} > I_{a \text{ max доп}}$). Току аварийной перегрузки $I_{a.p}$ соответствует среднее значение прямого тока, воздействие которого допускается лишь ограниченное число раз за время службы прибора ($I_{a.p} > I_{p.p}$). При этом предполагается принятие защитных мер от выхода диода из строя. Ударный ток $I_{уд}$ определяет максимальную амплитуду импульса аварийного тока синусоидальной формы длительностью 10 мс при нормируемой начальной температуре полупроводниковой структуры без последующего приложения обратного напряжения ($I_{уд} > I_{a \text{ max доп}}$). При этом предполагается, что ко времени окончания действия ударного тока средства защиты успевают исключить дальнейшее протекание тока через диод.

Специфика работы мощных диодов проявляется и в необходимости более тщательного подхода к их выбору по обратному напряжению.

В процессе работы к диоду могут прикладываться периодически повторяющиеся дополнительные перенапряжения, обусловливаемые внутренними факторами (например, при переходе диода из открытого состояния в закрытое), а также случайные неповторяющиеся перенапряжения, вызываемые внешними причинами (атмосферными воздействиями или перенапряжениями в питающей сети). В связи с этим для выбора диода по напряжению используют три каталожных параметра: рекомендуемое рабочее напряжение U_p , определяющее максимально допустимое обратное напряжение диода без учета возможных перенапряжений; повторяющееся напряжение U_n и неповторяющееся напряжение U_{np} , характеризующие значения обратного напряжения с учетом соответственно внутренних и внешних факторов ($U_{np} > U_n > U_p$).

В ряде мощных преобразовательных установок требования к среднему значению прямого тока, обратному напряжению (или к обоим параметрам), превышают номинальные значения параметров существующих диодов. В этих случаях задача решается параллельным или последовательным (а при необходимости и параллельно-последовательным) соединением диодов.