

Тема 2.1 Физические основы электроники. Электронные приборы

Строение и электропроводность полупроводников

Наряду с электронными лампами в устройствах электроники все шире используются полупроводниковые диоды и триоды.

Их работа основана на физических свойствах полупроводников — кристаллических твердых тел.

Характерной особенностью металлических проводников является наличие свободных электронов. В диэлектрике — изоляторе свободных электронов нет и поэтому он тока не проводит. Полупроводники получили свое название потому, что они обладают промежуточными свойствами между проводниками, имеющими большую электропроводность, и диэлектриками, которые тока не проводят.

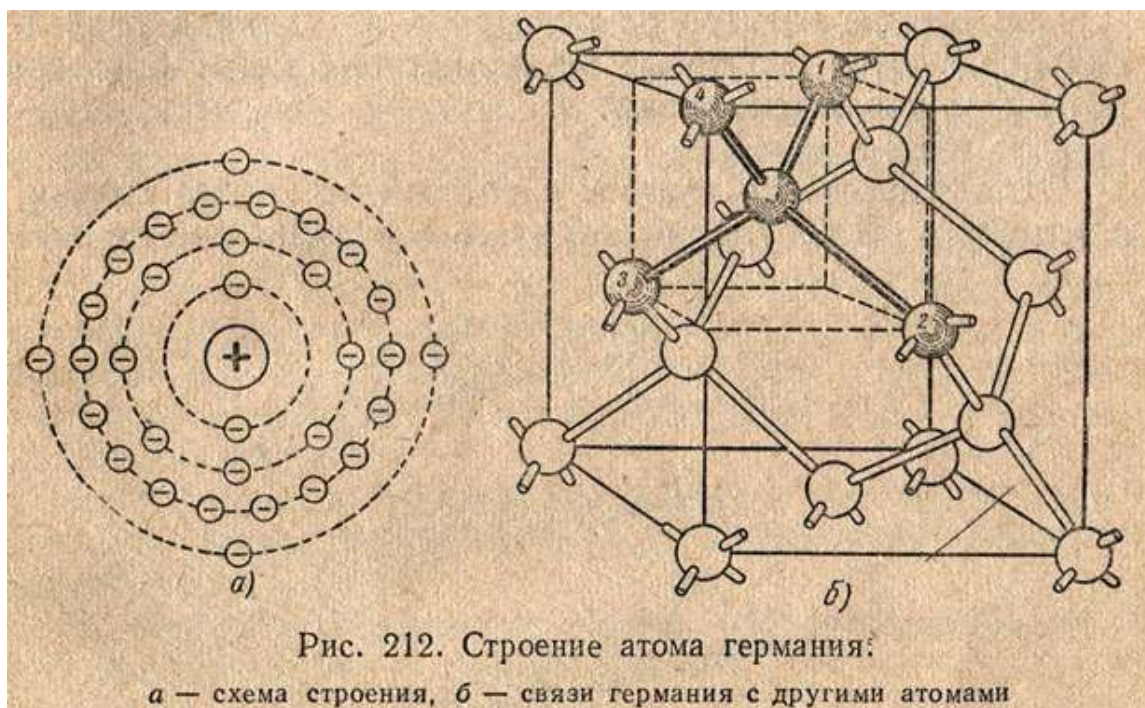
К полупроводникам относятся такие химические элементы, как германий, кремний, селен и многие другие твердые вещества, обладающие кристаллическим строением, окислы металлов, сернистые соединения и соединения селена.

Основным свойством полупроводников является изменение их электропроводности под действием температуры, света, давления и при наличии незначительных примесей.

Другой особенностью полупроводников является то, что их электропроводность связана с перемещением в них не только отрицательных зарядов — электронов, но и положительных зарядов — дырок.

Рассмотрим строение типичного полупроводника — германия.

Германий является элементом четвертой группы периодической системы Менделеева и имеет во внешней оболочке (рис. 212) атома четыре валентных электрона, участвующих в химических реакциях и процессах электропроводности. Остальные электроны атомов германия тесно связаны с ядрами.



Каждый атом германия стремится образовать связи с четырьмя другими атомами. В такой ячейке кристалла атом расположен на одинаковом расстоянии от других атомов, находящихся в вершинах правильного многогранника — тетраэдра (см. рис. 212).

В образовании связей между атомами германия от каждого из них участвует по одному электрону. Таким образом, связь атома германия с ближайшим соседним атомом осуществляется двумя электронами.

Подобная связь называется двухвалентной. Несвязанных свободных электронов германий практически не имеет. Число свободных электронов в его атомах составляет примерно один электрон на 10 млрд. атомов.

Понятие об электронной и дырочной проводимости

Заметная электропроводимость в кристалле германия может возникнуть, если нарушить связи между атомами. Например, свет или тепло могут сообщить некоторым электронам энергию, достаточную для отрыва их от атомов. При этом в кристалле появляются свободные электроны, которые перемещаются беспорядочно, подобно молекулам газа.

Если такой кристалл поместить в электрическое поле, то свободные электроны будут перемещаться в направлении сил поля и в кристалле возникнет электрический ток.

Электропроводимость, осуществляемая свободными электронами, называется *электронной проводимостью* полупроводника.

Электронная проводимость называется *n-проводимостью* (от французского слова «negative» — отрицательный).

При отрыве электронов от атомов германия в последних образуются свободные места, которые могут быть заняты другими электронами. Такие свободные места получили название дырок.

Появление дырки связано с потерей электрона атомом, а потому в области образования ее возникает избыточный положительный заряд. Таким образом, наличие дырки равноценно положительному заряду.

Схема образования и заполнения дырок условно показана на рис. 213. На каждой подставке, установленной наклонно, имеется четыре отверстия (четыре дырки). В них расположено четыре шара (четыре электрона). Если шар 1 сместится вправо, он освободит отверстие (дырку) и упадет с подставки, тогда в отверстие, которое занимал этот шар, переместится шар 2. Свободное отверстие (дырку) этого шара займет шар 3, а отверстие последнего — шар 4.

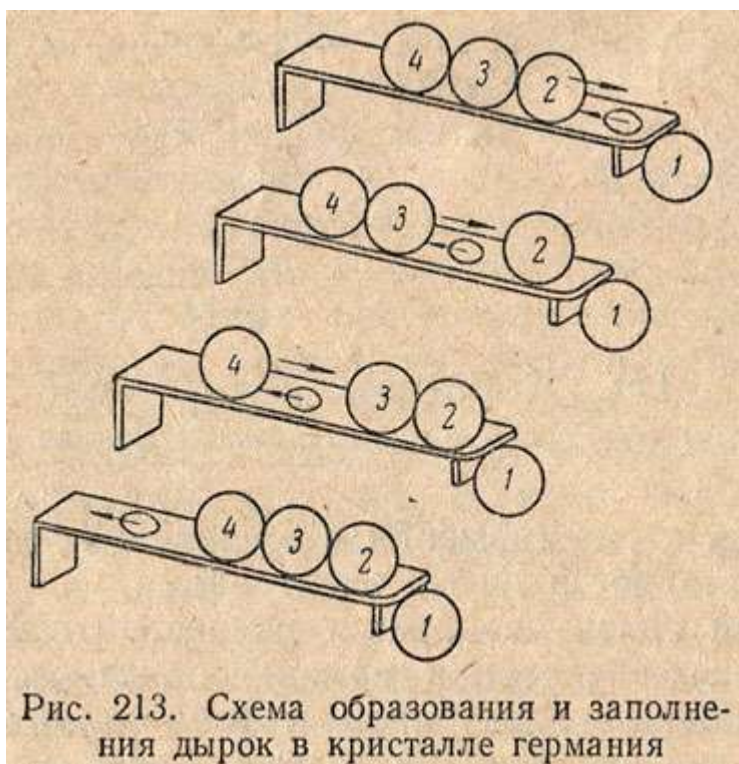


Рис. 213. Схема образования и заполнения дырок в кристалле германия

Из этой схемы видно, что шары (электроны) перемещаются в одном направлении — вправо, а отверстия (дырки) — в противоположном

направлении, т. е. влево. Кроме того, заполнение дырки сопровождается появлением новой дырки в соседнем атоме.

В результате перемещения электронов в полупроводнике создается возможность заполнения одних дырок и образования других. Возникновение каждой новой дырки сопровождается появлением свободного электрона, т. е. непрерывно идет образование пар: электрон — дырка. В свою очередь, заполнение дырок приводит к уменьшению числа свободных электронов.

Таким образом, в кристалле, помещенном в электрическое поле, происходит не только перемещение электронов, имеющих отрицательный электрический заряд, но и перемещение дырок — положительных зарядов. При этом направление перемещения дырок противоположно направлению движения электронов.

Электропроводимость, возникающая в результате перемещения дырок в полупроводнике, называется *дырочной проводимостью*.

Дырочная проводимость называется *p-проводимостью* (от слова «positive» — положительный).

Примесная проводимость полупроводника

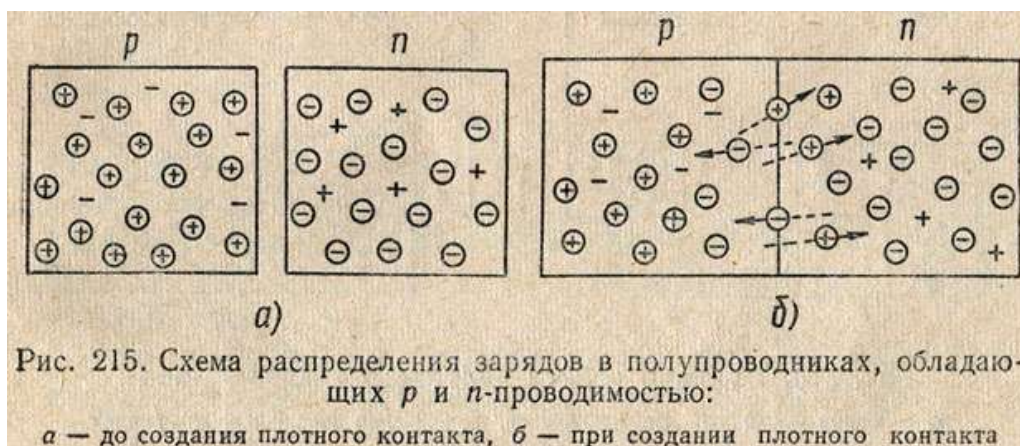
Электропроводимость полупроводников германия и кремния резко возрастает, когда к ним добавляют примеси в ничтожно малых, но в строго определенных количествах. К таким примесям, прибавляемым к германию и носящим название донорных, относятся сурьма и мышьяк. Это пятивалентные химические элементы, имеющие по пять электронов на наружной оболочке атома.

Нетрудно понять, что примесные электроны образуют с соседними атомами такие же связи, как и германий, причем используются в этом случае лишь четыре электрона, а пятый (рис. 214, а) оказывается лишним, слабо связанным и может легко быть оторван от своего атома.

Образование электронно-дырочного перехода

Рассмотрим процесс, который происходит в месте соприкосновения полупроводника, обладающего электронной n -проводимостью с полупроводником, обладающим p -проводимостью.

Такая пара полупроводников образует полупроводниковый диод. В нем часть поверхностных электронов из области n -проводимости проникает в поверхностный слой p -проводимости. Вследствие уменьшения количества электронов на границе контакта в полупроводнике с n -проводимостью появится положительный заряд (рис. 215). Поле образовавшегося положительного заряда отталкивает положительные заряды (дырки) полупроводника с p -проводимостью и они перемещаются от границы соприкосновения в глубь полупроводника.

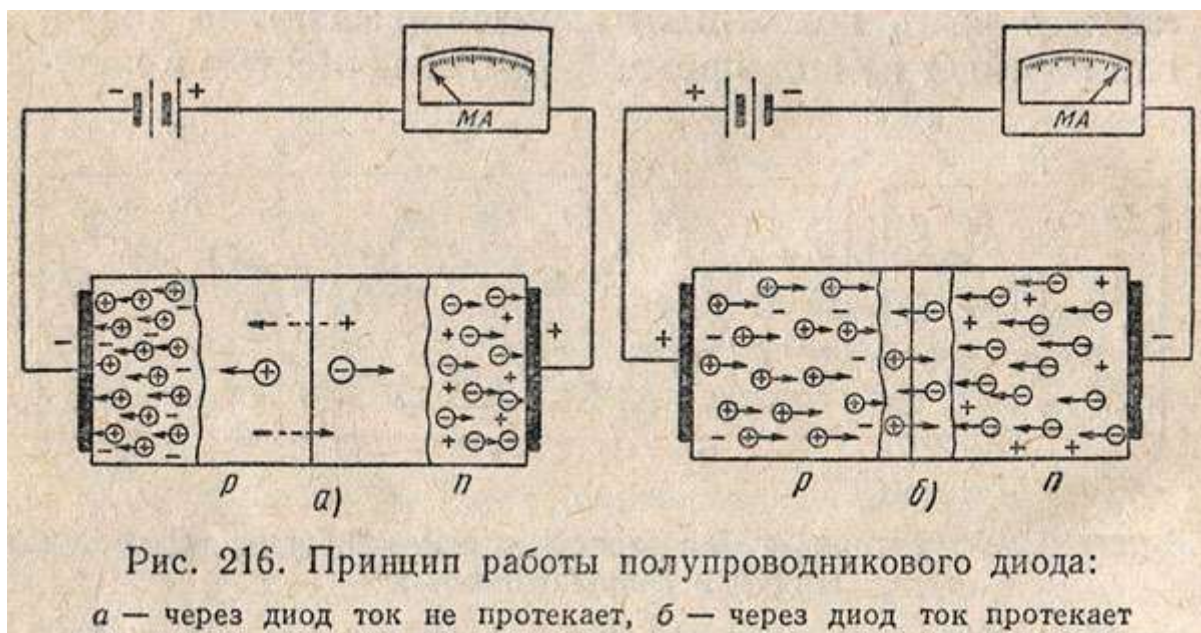


Одновременно с переходом электронов из области n в область p часть положительных зарядов (дырок) по аналогии перейдет из полупроводника с p -проводимостью в полупроводник с n -проводимостью. Вследствие уменьшения количества положительных зарядов на границе контакта в полупроводнике с p -проводимостью появится отрицательный электрический заряд. Поле этого заряда будет отталкивать отрицательные заряды (электроны) полупроводника с n -проводимостью и они переместятся от границы соприкосновения в глубь проводника.

Таким образом, на границе двух полупроводников образуется слой, обедненный носителями зарядов (электронами и дырками), который обладает повышенным сопротивлением. Этот слой принято называть p — n -переходом

или электронно-дырочным переходом. P — n -переход практически составляет доли микрона.

Предположим, что к рассмотренным полупроводникам подключен источник электрической энергии так, что к области p -проводимости присоединен отрицательный полюс источника, а к области n -проводимости — положительный полюс (рис. 216, а). В этом случае под влиянием поля внешнего напряжения электроны и дырки будут в большом количестве соответственно отталкиваться в глубь полупроводников. P — n -переход увеличится, его сопротивление возрастет и в цепи полупроводникового диода электрического тока практически не будет. Однако незначительному количеству неосновных носителей зарядов (положительных) из n -области и (отрицательных) из p -области, имеющих большие скорости, удастся проскочить P — n -переход и в цепи будет протекать весьма небольшой ток, называемый *обратным током*.



Изменим полярность источника электрической энергии, подключенного к диоду (рис. 216, б). Теперь электроны n -области и дырки p -области будут взаимно притягиваться и перемещаться к границе этих полупроводников. P — n -переход сужается, его сопротивление резко уменьшается и создаются условия для перехода большого количества электронов из n -области в p -область, а следовательно для перехода дырок в противоположном

направлении. При таком включении полупроводникового диода в цепи появится значительный электрический ток, носящий название *прямого тока*.

Сила прямого тока в полупроводниках зависит от величины приложенного к ним напряжения.

Из описания процесса, происходящего на границе двух полупроводников с различной по знаку проводимостью, следует, что они обладают, как и электронная лампа — диод, односторонней проводимостью. Это значит, что при одном направлении электрического поля, создаваемого приложенным к полупроводникам прямым напряжением, диод пропускает ток и сопротивление его мало, а при обратном направлении этого поля, создаваемого приложенным к полупроводникам обратным напряжением, сопротивление диода велико, а ток в его цепи весьма мал.

На рис. 217 показана типичная характеристика германиевого диода. Для большей наглядности кривая прямого тока (правая часть графика) и кривая обратного тока (левая часть графика) построены в различных масштабах.



Из графика видно, что при напряжении 1 В на зажимах германиевого диода в его цепи проходит большой ток, зато при напряжении даже минус 10, 20, 30 и 40 В диод практически не пропускает тока.

Это свойство полупроводниковых диодов используется для выпрямления переменного тока в постоянный.

Полупроводниковые диоды

В технике применяют кремниевые, селеновые, германиевые и другие полупроводниковые диоды.

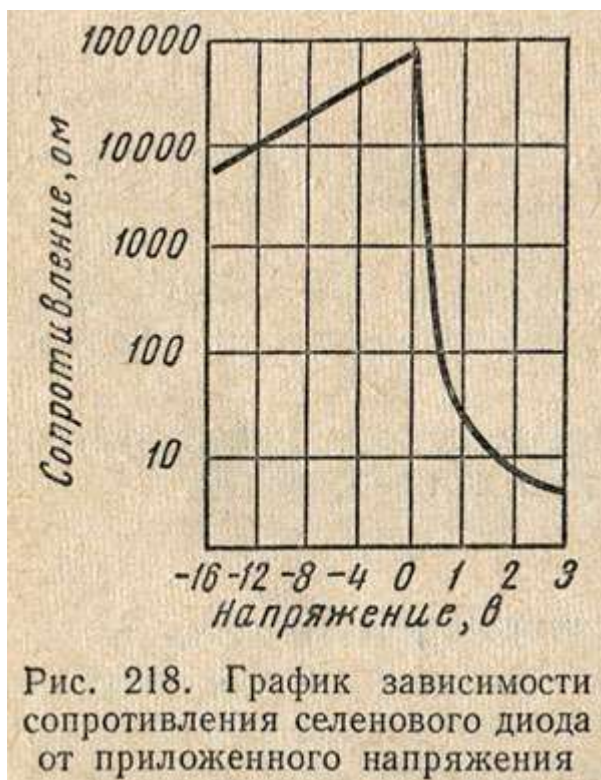
Селеновый диод представляет собой стальную или алюминиевую, или никелированную шайбу, покрытую слоем селена, обладающего дырочной p -проводимостью.

Селен, применяемый при производстве диодов, по своим химическим свойствам близок к сере. Он имеет свинцово-серый цвет и кристаллическое строение.

На слой селена наносят в расплавленном состоянии сплав олова с кадмием. При этом вследствие проникновения (диффузии) атомов кадмия в селен на поверхности последнего создается слой селенистого кадмия; имеющего электронную n -проводимость. Между селеном и селенистым кадмием образуется p — n -переход.

Селеновый диод оказывает малое сопротивление току, идущему от селена к сплаву. В обратном направлении, от сплава к селену, диод имеет большое сопротивление.

На рис. 218 приведен график зависимости сопротивления селенового диода от приложенного напряжения при прямом и обратном направлениях тока. При напряжении 3 в прямое сопротивление селенового диода мало, с уменьшением напряжения оно возрастает. При изменении знака приложенного напряжения сопротивление диода достигает наибольшего значения. Предельное обратное напряжение, которое можно подавать на один элемент селенового диода, равно 20 в.



Величина предельно допустимой плотности тока для селеновых диодов составляет 70 ма на 1 см^2 рабочей поверхности, т. е. поверхности селенового слоя. Если величина выпрямляемого тока превышает допустимое для одного элемента значение, то шайбы соединяют параллельно, так как при этом возрастает их рабочая поверхность.

Ввиду того что на один выпрямительный элемент (шайбу) допускается подавать напряжение до 20 в , для выпрямления большого напряжения отдельные шайбы соединяют последовательно. Например, при последовательном соединении двух элементов на них можно подать напряжение $U = 20 \cdot 2 = 40 \text{ в}$, трех элементов — $U = 20 \cdot 3 = 60 \text{ в}$ и т. д. Последовательное соединение шайб в столбики достигается путем плотного соприкосновения тыловой части одной шайбы с рабочей поверхностью следующей шайбы и т. д.

Срок службы селеновых диодов $20 — 30 \text{ тыс. ч}$. Допустимый нагрев их $+ 70^\circ \text{ С}$.

Полупроводниковые диоды необходимо содержать в чистоте, предупреждать возможность их перегрева. Пропускать по цепи диода силу тока, большую чем та, на которую он рассчитан, не рекомендуется.

Германиевые диоды изготовляют двух видов: точечные и плоскостные.

Точечный контактный германиевый диод (рис. 219, а) состоит из керамического цилиндра 2, металлических контактодержателей 1, контактной пружины 6, кристаллодержателя 4, кристалла германия 5 и выводных проводников 3. Кристалл имеет электронную проводимость, а под контактным острием в результате специальной обработки создается область с дырочной проводимостью. В настоящее время эти диоды почти вытеснены плоскостными.

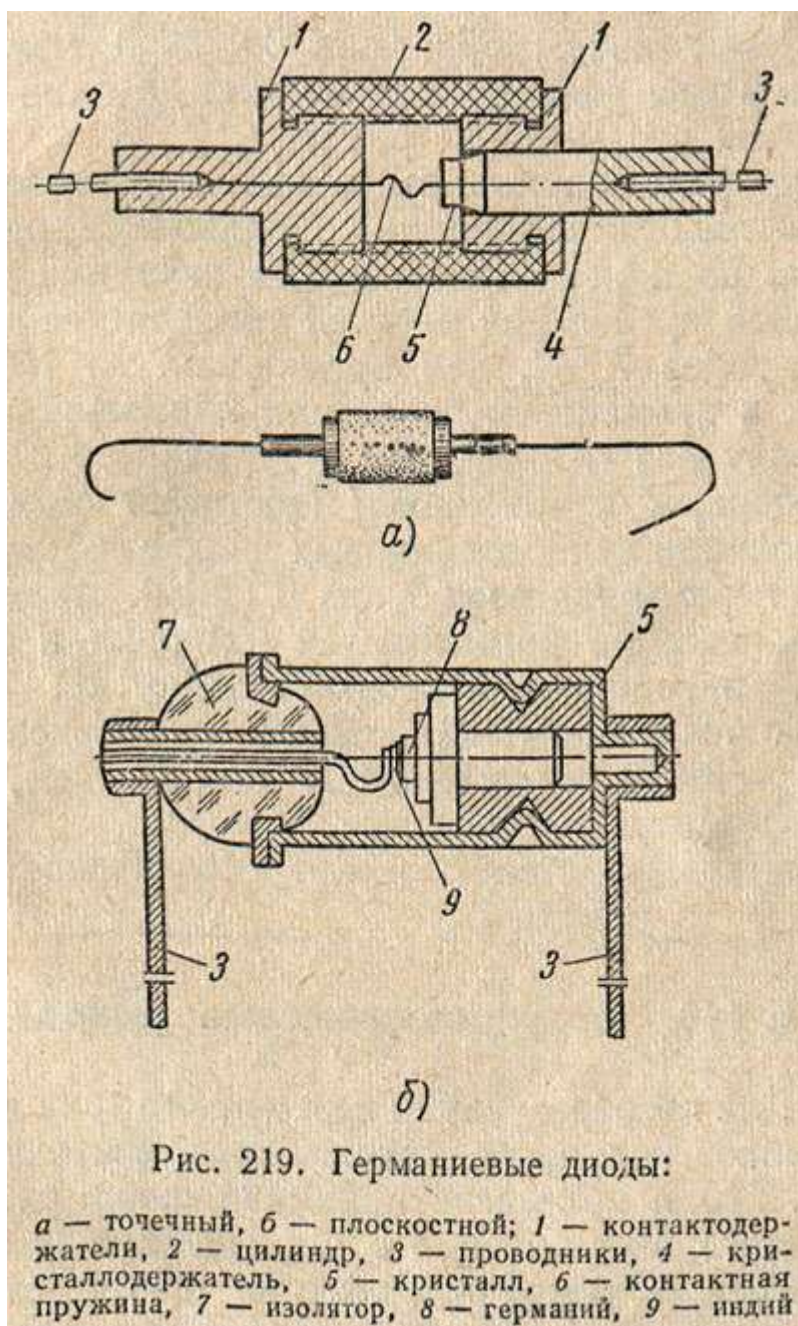


Рис. 219. Германиевые диоды:

а — точечный, б — плоскостной; 1 — контактодержатели, 2 — цилиндр, 3 — проводники, 4 — кристаллодержатель, 5 — кристалл, 6 — контактная пружина, 7 — изолятор, 8 — германий, 9 — индий

На рис. 219, б показана одна из конструкций плоскостного германиевого диода. Два латунных ниппеля с винтовой нарезкой запрессовываются в пластмассу. Перед запрессовкой на один из ниппелей напаивают кристалл, а сквозь отверстие в другом ниппеле пропускают проводник 3, припаянный к электроду, изготовленному из индия. Другой конец проводника запаивают на конце ниппеля.

Германиевые диоды типа Д7Ж, применяемые в выпрямителях, выдерживают обратное напряжение 400 в и пригодны для выпрямления тока 300 ма. Диоды типа Д7А выдерживают обратное напряжение 50 в и пропускают выпрямленный ток 300 ма.

Германиевые диоды обладают большой механической прочностью и при равной с селеновыми диодами мощности имеют в сотни раз меньшие размеры.

Наша промышленность выпускает кремниевые диоды. Они отличаются от германиевых не только материалом полупроводника, но и некоторыми преимуществами, а именно: более высокой предельной рабочей температурой (для германиевых диодов 70° С, для кремниевых до 150° С); обратный ток в кремниевом диоде при нормальной температуре в тысячу раз меньше, чем в германиевом; более высоким пробивным напряжением (достигает сотни вольт).

Маркировка полупроводниковых диодов состоит из двух элементов: первым является буква Д (диод), вторым — число, указывающее на применяемый материал и конструкцию диода. Так, например, диоды означают: Д1 — Д100 — германиевые точечные, Д101 — Д200 — кремниевые точечные, Д201 — Д300 — германиевые плоскостные, Д301 — Д400 — кремниевые плоскостные.

Выпрямительные столбы имеют обозначение Д1001 и выше.