

Лекция №14. Полупроводниковые диоды

Цель: ознакомиться с устройством, принципом действия, характеристиками, классификацией и применением трансформаторов

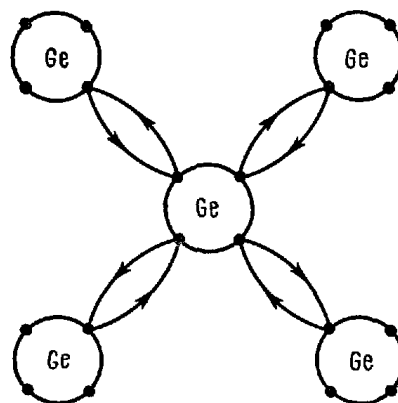
Естественные полупроводники

Электроника – наука о взаимодействии заряженных частиц с электромагнитными полями и методах создания электронных приборов и устройств, работа которых основана на прохождении электрического тока в твердом теле, вакууме и газах. Соответственно, электронные приборы называются полупроводниковыми, электронно-вакуумными и газоразрядными. В настоящее время электронно-вакуумные и газоразрядные приборы применяются только в специальных случаях и рассматриваться здесь не будут.

Полупроводники – материалы, занимающие промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Особенностью металлических проводников является наличие свободных электронов – носителей электрических зарядов. В диэлектриках свободных электронов нет и поэтому они не проводят тока.

Почти вся окружающая нас природа состоит из полупроводящих веществ. Окислы металлов, сульфиды, теллуриды и селениды многих металлов имеют полупроводниковые свойства. К типичным представителям полупроводников относятся германий, кремний и теллур.

Германий – один из наиболее широко применяемых полупроводниковых элементов. 32 электрона его атома распределены таким образом, что на внешней оболочке имеется 4 валентных электрона. В кристалле германия электроны соседних атомов вступают в химические, или ковалентные, связи (см. рис.), так что «свободных» электронов при $T = 0$ К в чистом германии нет. Поэтому он должен быть хорошим изолятором. Германий весьма рассеян в природе и является дорогостоящим элементом.

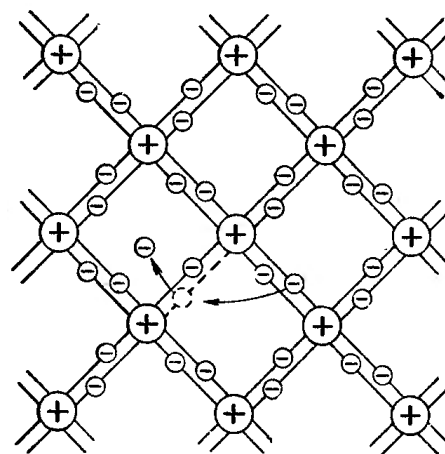


Большое значение в современной полупроводниковой технике имеет кремний. 14 электронов его атома распределены так, что 4 из них, как и у германия, находятся на внешней оболочке. Они также вступают в химические связи с электронами соседних атомов.

Замечательным свойством полупроводников, которое используется в ряде чувствительных приборов, является сильное уменьшение их электрического

сопротивления с повышением температуры. В этом отношении они ведут себя противоположно металлам.

Если в электрически нейтральном веществе один из электронов оставляет свое место и переходит в другое, например, к другому иону, то в оставленном им месте возникает избыток положительного заряда, или, как принято говорить, «положительная дырка» (см. рис.). Эта «дырка» ведет себя как положительный заряд, равный по величине заряду электрона. На освобожденное электроном место («дырку») может переместиться соседний электрон, а это равносильно тому, что переместилась «положительная дырка»: она появится в новом месте, откуда ушел электрон. В результате дырка начинает также странствовать по кристаллу, как и освободившийся электрон.



Во внешнем электрическом поле электроны движутся в сторону, противоположную направлению напряженности электрического поля, а положительные дырки – в направлении напряженности, т.е. в ту сторону, куда под действием поля перемещался бы положительный заряд. Электропроводность полупроводника, обусловленную перемещением дырок, принято называть *дырочной проводимостью*, а обусловленную перемещением электронов – *электронной проводимостью*.

Процесс перемещения дырок в направлении напряженности внешнего электрического поля, а электронов – в противоположном направлении происходит во всей массе полупроводника.

Таким образом, при электронной проводимости один свободный электрон проходит весь путь в кристалле, а при дырочной проводимости большое число электронов поочередно замещают друг друга в ковалентных связях и каждый из них проходит свой отрезок пути.

В кристалле чистого полупроводника при нарушении ковалентных связей возникает одинаковое число свободных электронов и дырок. Одновременно с этим происходит обратный процесс – рекомбинация, при которой свободные электроны заполняют дырки, образуя нормальные ковалентные связи. При определенной температуре число свободных электронов и дырок в единице объема полупроводника в среднем остается постоянным. При повышении температуры число свободных электронов и дырок сильно возрастает и проводимость германия значительно увеличивается. Электропроводность полупровод-

ника при отсутствии в нем примесей называется его *собственной электропроводностью, которая носит смешанный электронно-дырочный характер.*

Все сказанное выше относится к химически чистым полупроводникам, технология изготовления которых, в частности кремния, представляет большие трудности.

Примесные полупроводники

В реальной решетке кристалла всегда имеются дефекты, приводящие к нарушению идеальной периодичности. Можно отметить три главных вида дефектов:

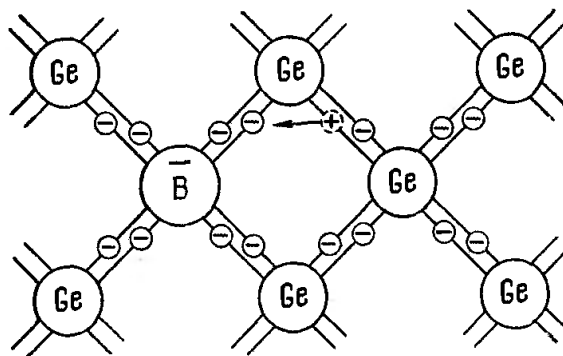
- а) отсутствие ионов или атомов в некоторых узлах решетки;
- б) наличие лишних атомов между узлами решетки;
- в) некоторые узлы решетки заняты не атомами основного вещества, а атомами другого вещества.

Все данные дефекты называются примесями.

Примеси могут играть двойную роль. Они могут служить, с одной стороны, дополнительными поставщиками электронов в кристалл, с другой стороны – центрами «прилипания» имеющихся в кристалле электронов. Рассмотрим, например, что произойдет, если в решетке германия один его атом будет замещен атомом примеси, обладающим пятью валентными электронами (фосфор, мышьяк, сурьма). Четыре электрона примесного атома будут находиться в химической связи с соседними атомами германия, а пятый электрон не может образовать валентную связь и окажется свободным (см. рис.). Поэтому такая примесь увеличивает *электронную проводимость* (проводимость *n*-типа) и называется *донорной*. Полупроводники такого типа называются *электронными* (или полупроводниками *n*-типа).

Предположим теперь, что в решетку германия введен примесный атом с тремя валентными электронами (бор, алюминий, индий). Такой атом не может сформировать полного комплекта необходимых связей в решетке германия, так как у него для этого не хватает одного электрона. Однако он сможет насытить все связи, если позаимствует электрон у ближайшего атома германия (см. рис.).

Тогда на месте электрона, ушедшего из атома германия, появится положительная дырка», которая будет заполняться электроном из соседнего атома германия. Процесс последовательного заполнения свободной связи эквивалент-



тен движению дырки в полупроводнике. Примеси с меньшим числом валентных электронов в атоме по сравнению с атомом данного полупроводника вызывают преобладание *дырочной проводимости* (проводимости *p*-типа) и называются *акцепторными*. Полупроводники такого типа называются *дырочными* (или полупроводниками *p*-типа).

Носители заряда, определяющие вид проводимости в примесном полупроводнике, называются *основными* (дырки в *p*-полупроводнике и электроны в *n*-полупроводнике), а носители заряда противоположного знака – *неосновными*.

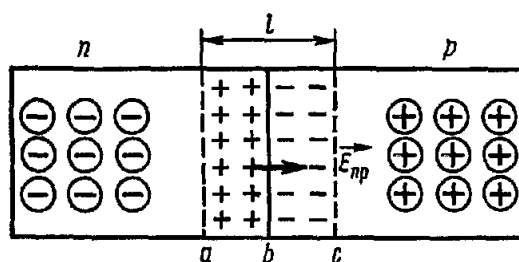
При одновременном введении в полупроводник донорных и акцепторных примесей характер проводимости (*n*- или *p*-тип) будет зависеть от того, какие из примесей создают повышенную концентрацию носителей заряда.

Электронно-дырочный переход

Рассмотрим явления, которые происходят при соприкосновении двух полупроводников. Наибольший практический интерес представляет контакт двух полупроводников с разными типами примесной проводимости. Этот контакт является основой работы полупроводниковых приборов.

Граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой – дырочную проводимость, называется *электронно-дырочным переходом* (*p-n*-переход). Он может быть осуществлен в одном и том же кристалле полупроводника, если в нем из соответствующих примесей созданы области различной (*n* и *p*) проводимости. Обычно области различной проводимости полупроводника создают либо обработкой однородных монокристаллов, либо при выращивании монокристаллов.

Соприкосновение двух полупроводников с разными типами проводимости в результате перемещения электронов и дырок через поверхность раздела приводит к образованию двойного электрического слоя. Электроны из *n*-полупроводника переходят в *p*-полупроводник, дырки же перемещаются в противоположном направлении (см. рис.).

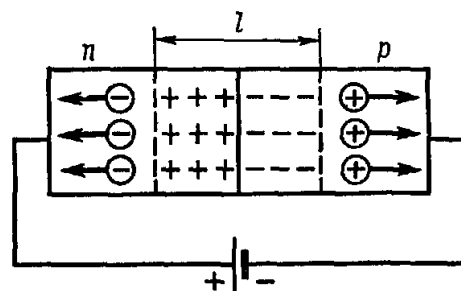


В области *ab* *n*-полупроводника образуется избыточный положительный заряд, в области *bc* на *p*-полупроводнике – избыточный отрицательный заряд. Двойной слой, обедненный подвижными носителями заряда, создает контактное электрическое поле с напряженностью E_{np} и некоторой разностью потенциалов на его границах. Это поле препятствует дальнейшему переходу носителей заряда: электронов слева направо и дырок – справа налево. При определенной

толщине электронно-дырочного перехода наступает состояние равновесия. Толщина l слоя p - n -перехода в практически важных полупроводниках (германий, кремний, теллур) имеет величину от 10^{-4} до 10^{-5} см. Контактная разность потенциалов, представляющая собой потенциальный барьер для подвижных носителей заряда, составляет несколько десятых вольта.

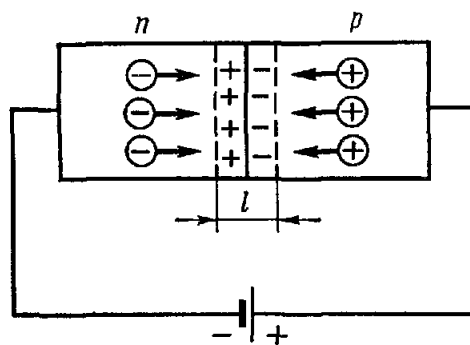
Электроны и дырки могут преодолеть такую разность потенциалов лишь при температуре в несколько тысяч градусов. Поэтому электроны и дырки полупроводников при обычных температурах не могут проникнуть в равновесный контактный слой, который является запирающим слоем, обладающим повышенным сопротивлением.

Рассмотрим влияние внешнего электрического поля на свойства p - n -перехода. Для этого включим контактирующие между собой p - и n -полупроводники в цепь источника электрической энергии.



В случае, изображенном на рисунке, внешнее электрическое поле будет усиливать поле контактного слоя и приведет к возрастанию потенциального барьера для электронов и дырок, переходящих через контакт. Вместе с тем внешнее поле вызовет движение электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике в стороны, противоположные от контакта. Это приведет к увеличению толщины запирающего слоя и росту его сопротивления. *Направление внешнего поля, при котором расширяется запирающий слой, называется запирающим*: в этом направлении ток практически не проходит через контакт двух полупроводников.

Если изменить полярность приложенного внешнего напряжения, то внешнее электрическое поле будет направлено противоположно полю контактного слоя. Число подвижных носителей заряда в области контакта будет возрастать. Этому способствует встречное движение электронов и дырок, которые перемещаются под действием внешнего поля из глубины полупроводников к границе p - n -перехода (см. рис.).



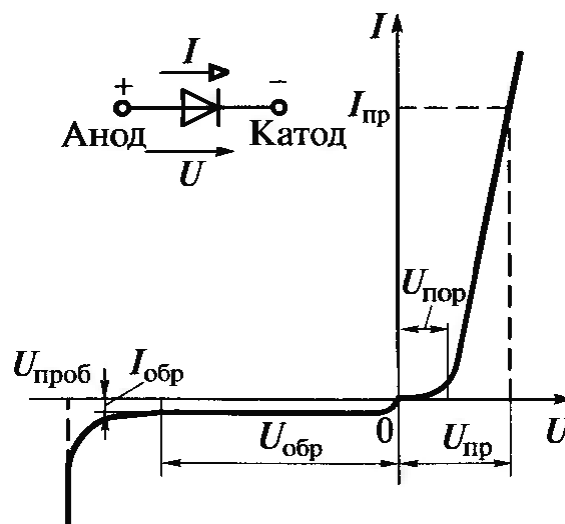
Толщина l контактного слоя и его сопротивление при этом уменьшаются. Следовательно, ток может более или менее свободно проходить через p - n -переход в направлении от p - к n -полупроводнику. Это направление принято называть пропускным. Таким образом, контакт двух примесных полупроводни-

ков с разными знаками носителей заряда обладает односторонней проводимостью. Полупроводниковое устройство, содержащее один $p-n$ -переход, называется *полупроводниковым диодом*.

Классификация диодов и их характеристики

По функциональному назначению различают полупроводниковые диоды выпрямительные, импульсные, стабилитроны, фотодиоды, светоизлучающие диоды и т.д.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока в постоянный и используют свойство $p-n$ -перехода хорошо проводить электрический ток в одном направлении и плохо – в противоположном. Эти токи и соответствующие им напряжения между выводами диода называются *прямым и обратным токами, прямым и обратным напряжениями*. На рисунке приведены условное обозначение выпрямительного диода и его типовая вольт-амперная характеристика.



Прямые ток и напряжение при положительных значениях направлены от *анодного* к *катодному* выводу. Заметим, что, хотя для выбранных положительных направлений тока и напряжения диодов прямые и обратные величины имеют разные знаки, принято в обоих случаях их численные значения определять положительными числами.

Различают низко- и высокочастотные выпрямительные диоды. Первые применяются в преобразовательных устройствах энергетической электроники промышленной частоты (до 100 Гц), вторые – для преобразования радиосигналов (до 100 МГц).

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

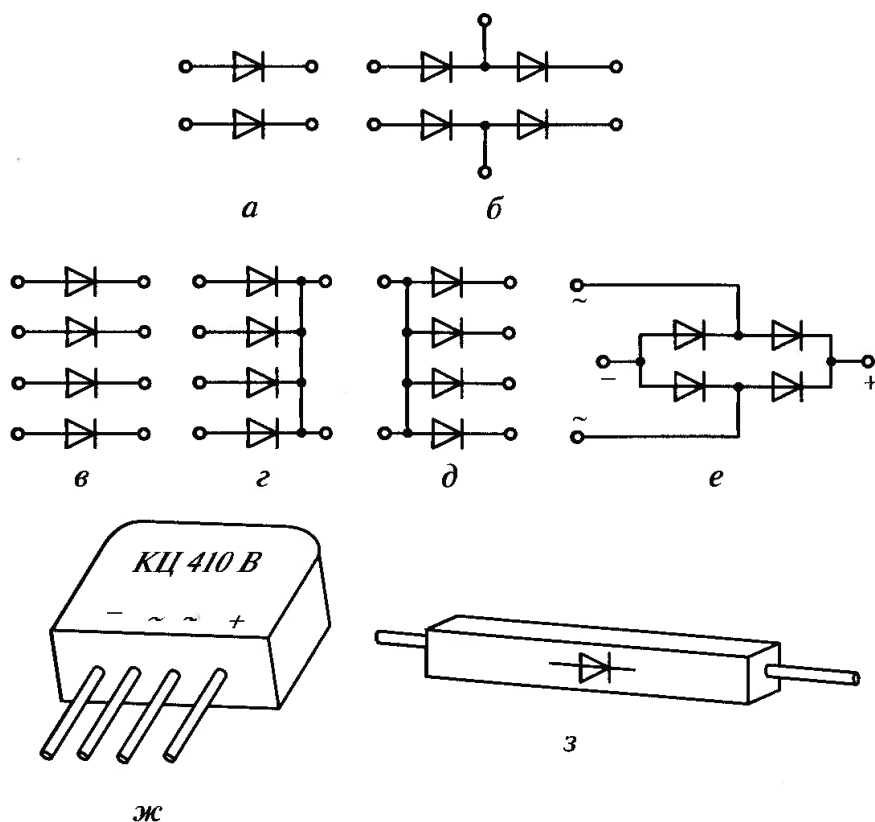
- постоянный прямой ток $I_{пр}$ при постоянном прямом напряжении $U_{пр}$;
- постоянный обратный ток $I_{обр}$ при постоянном обратном напряжении $U_{обр}$;
- максимально допустимое постоянное обратное напряжение $U_{обр\ max}$;
- максимально допустимый средний прямой ток $I_{пр\ ср\ max}$.

В качестве дополнительных употребляются параметры:

- постоянное пороговое напряжение проводимости $U_{пор}$;

- постоянное напряжение разрушающего электрического пробоя $U_{\text{проб}}$;
- максимально допустимая температура окружающей среды T_{max} (для германиевых до 70 °С, кремниевых до 150°С, титановых до 250 °С) и др.

Кроме одиночных диодов выпускаются их сборки, представляющие собой конструктивно законченные модули с различным числом полупроводниковых диодов, соединенных по определенным схемам. Среди сборок различают: *диодные матрицы* (рис. а–е) на прямой ток до 0,1 А при обратном напряжении до 50 В, *выпрямительные блоки* для однофазных (рис. ж) и трехфазных выпрямителей на прямой ток до 3 А при обратном напряжении до 600 В и *высоковольтные столбы* (рис. з) из последовательно соединенных диодов для работы в высоковольтных выпрямителях на прямой ток до 1 А при обратном напряжении до 15 кВ.



Импульсные диоды предназначены для преимущественной работы в импульсных устройствах. Их свойства определяют параметры, учитывающие инерционность переключения диода: емкость перехода C_d (1–20 пФ), интервал времени восстановления обратного сопротивления $\Delta t_{\text{вос}}$ (1–500 нс) и др.

Стабилитроны, или опорные диоды, предназначены для стабилизации постоянного напряжения и ограничения выбросов напряжения. В этих диодах используется явление неразрушающего электрического пробоя (лавинного пробоя) p - n -перехода при некоторых значениях обратного напряжения $U_{\text{обр}} = U_{\text{проб}}$.

Стабилитроны малой мощности с максимально допустимой мощностью потерь $P_{\text{пот max}} = 0,1-0,3$ Вт используются в качестве источников опорного напряжения в компенсационных стабилизаторах напряжения средней (0,3–0,5 Вт) и большой (свыше 8 Вт) мощности – в параметрических стабилизаторах напряжения и для ограничения выбросов напряжения.

Вопросы для самоконтроля:

1. В чем различие энергетических состояний электронов в кристалле и в изолированном атоме?
2. Какие зоны называются разрешенными, а какие – запрещенными?
3. В чем состоит отличие металлов от диэлектриков согласно зонной теории?
4. Какие вещества называются полупроводниками? Как объясняются их электрические свойства зонной теорией?
5. Как влияют примеси на электропроводность полупроводников? Объясните, как возникают дырочная и электронная примесные проводимости полупроводников.
6. С помощью зонной теории поясните особые свойства контактов двух металлов и металла с полупроводником.
7. Как объяснить выпрямляющее действие полупроводникового диода?
8. В чем состоят преимущества полупроводниковых термоэлементов перед металлическими?

Калашников

Матвеев

Детлаф т.2

Савельев т.2

Китаев

Немцов

1. Савельев И. В. Курс общей физики, т. 2. Электричество. М., 1970 г.
2. Детлаф А. А., Яворский Б. М., Милковская Л. Б. Курс физики, т. 2. Электричество и магнетизм. М., 1977 г.