

внешних факторов, например температуры, освещения, давления, сильного электрического поля и т. д. Кроме того, электропроводность полупроводников может изменяться в миллионы раз под влиянием ничтожных примесей.

Все это объясняется небольшой (в сравнении с металлами) концентрацией свободных электронов в полупроводниках и ее зависимостью от внешних факторов. Для металлов концентрация свободных электронов имеет порядок $n=10^{22}-10^{23} \text{ см}^{-3}$, а для некоторых полупроводников при комнатной температуре $n=10^{10} \text{ см}^{-3}$, а при 700°C $n=10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Основное отличие полупроводника от металла состоит в том, что в металле уже при абсолютном нуле имеются свободные электроны в концентрации, которая практически не изменяется с повышением температуры, тогда как в полупроводниках, чтобы перевести электроны в свободное состояние, нужно затратить энергию ω (нагреванием или освещением). Чем больше значение энергии ω , тем в меньшей степени зависит электропроводность полупроводника от температуры и других внешних влияний. Очень большие значения энергии ω характерны для изоляторов. Так, например, для чистого германия $\omega=0,75 \text{ эв}$, а для NaCl $\omega=10 \text{ эв}$.

§ 35. Понятие о зонной теории электропроводности

Электроны, которые обеспечивают проводимость твердого тела, называют *электронами зоны проводимости*, причем под словом «зона» понимают совокупность тесно расположенных энергетических уровней. При изложении квантовых законов мы поясним (т. III, § 60) весьма важный и общий принцип, определяющий распределение электронов по возможным энергетическим уровням, так называемый *принцип Паули*. Пока отметим только, что по этому принципу все электроны. принадлежащие к одной системе, имеют различные квантовые состояния.

При равновесии система имеет наименьшую энергию. Но принцип Паули осложняет дело. По принципу Паули пребывание электронов в тождественных, неразличимых друг от друга квантовых состояниях невозможно. Поэтому при достаточном числе электронов все допустимые по квантовым законам энергетические состояния с минимальной энергией («низшие энергетические уровни») оказываются как бы *з а п о л н е н н ы* м и. Поскольку эти состояния с небольшой энергией «заняты» некоторыми электронами, то по принципу Паули, «запрещающему» пребывание электронов в тождественных состояниях, остальным электронам «приходится» занимать еще незанятые уровни с большей энергией.

Когда N одинаковых атомов объединяются в один кристалл, то на энергетическое состояние электронов начинает влиять взаимодействие атомов. В результате этого взаимодействия любое энерге-

тическое состояние электрона расщепляется на N близких состояний, в каждом из которых может находиться только один электрон. Таким образом, вместо отдельных энергетических уровней в атоме — в кристалле образуются широкие энергетические полосы, или, как их называют, *зоны*, число уровней в которых равно числу атомов в кристалле (рис. 114).

В любом твердом теле, как в диэлектрике, так и в проводнике, имеются электроны, пребывающие на низших энергетических уровнях и «заполняющие» все эти уровни. Такие электроны называют

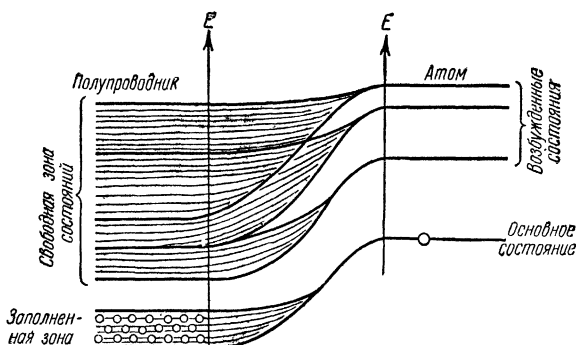


Рис. 114. Энергетические состояния электронов. Справа — в изолированном атоме, слева — в полупроводнике.

электронами заполненной зоны. Они не участвуют ни в электропроводности, ни в теплопроводности. Если совокупность возможных квантовых уровней полностью заполнена электронами (насыщена ими в смысле принципа Паули), то такая система электронов оказывается как бы скованной, лишенной способности участвовать в явлении электрического тока. Электрическое поле, действуя на электрон, должно было бы сообщить ему дополнительную скорость и тем самым «поднять» его на близлежащий более высокий энергетический уровень. Но если все возможные энергетические уровни уже «заняты», то это не может случиться.

В явлении электрического тока могут участвовать только те электроны, которые находятся на верхних энергетических уровнях, и притом в такой зоне, где над уровнями, заполненными электронами, расположены уровни, не заполненные электронами. Конечно, вышележащие и еще не заполненные электронами энергетические уровни всегда имеются, но может случиться, что они отделены от зоны заполненных уровней большим скачком энергии. В этом случае, т. е. когда зона незаполненных уровней отделена от зоны заполненных уровней большой разностью энергий, электрическое поле, способное сообщить электрону только небольшую дополнительную энергию, очевидно, не может перебросить элект-

рон с занятого им уровня на какой-либо другой уровень и, стало быть, тело не будет обладать электропроводностью.

Из сказанного ясно, что энергетическое состояние электронов в проводниках и непроводниках можно представить весьма грубой схемой, изображенной на рис. 115. Мы несколько приблизились бы к действительности, если бы вообразили огромное число электронов и огромное число энергетических уровней. При этом следует учесть, что распределение энергетических уровней неравномерно и различно для тел разной природы. Рис. 115 указывает только на основное различие между проводниками электричества и непроводниками.



Рис. 115. Энергетические схемы непроводника и проводника.

Наличие электронов в незаполненной зоне — в зоне проводимости — делает тело проводником электричества. В металлах таких электронов множество даже при абсолютном нуле температуры. В диэлектриках их нет. В полупроводниках они имеются в ограниченном числе.

Достаточно интенсивное нагревание приводит к перебросу электронов из заполненной зоны в зону проводимости. Высококачественные изоляторы характеризуются большой разностью энергий между высшими уровнями заполненной зоны и низшими уровнями незаполненной зоны. Поэтому существенная электронная проводимость обнаруживается у них только при очень высоких температурах. Для полупроводников, напротив, характерно близкое расположение упомянутых зон (рис. 116). Поэтому, хотя при низких температурах они совершенно не проводят электричества, но уже при небольшом повышении температуры многие электроны в полупроводнике перескакивают в незаполненную зону и полупроводник приобретает электропроводность.

Весьма замечателен особый вид электропроводности, который проявляется благодаря участию в явлении электрического тока электронов заполненной зоны, когда эта зона вследствие перескока из нее в верхнюю зону некоторых электронов становится частично

незаполненной (как это видно, например, из рис. 116). Возникшие на некоторых уровнях «свободные места» под действием электрического поля заполняются электронами с нижележащих уровней. Новообразовавшиеся свободные места также заполняются электронами, имевшими еще меньшую энергию и получившими дополнительную энергию в электрическом поле. Таким образом, «свободное место» (иначе говоря, «дырка») перемещается в направлении, противоположном перемещению электронов. Дырка перемещается как положительный заряд. Но это движение дырки в действительности является только проявлением перемещений ряда электронов под действием поля.

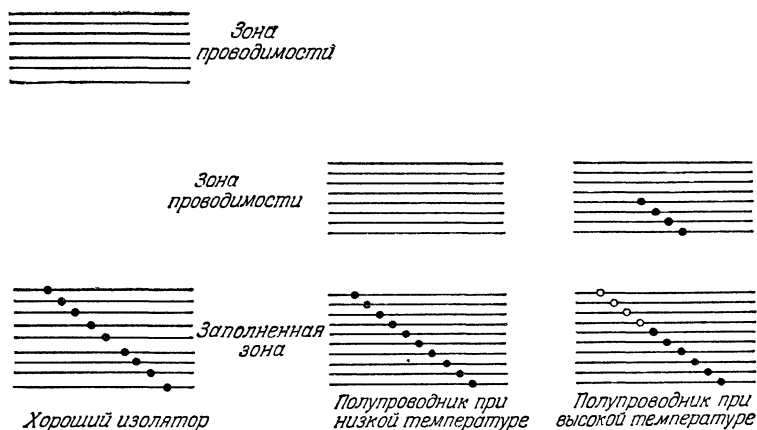


Рис. 116. Сопоставление энергетических схем хорошего изолятора и полупроводника.

Нечто подобное можно иногда наблюдать в лекционном зале, где обнаружили свободные места в передних рядах. Слушатели из следующих рядов пересаживаются поближе к лектору, а их места занимают те, кто находится еще дальше. Так свободные места движутся от лектора, обнаруживая этим перемещение слушателей ближе к лектору.

Электропроводность полупроводников складывается из электронной проводимости и дырочной проводимости.

Электрические свойства полупроводников в большой мере зависят от наличия примесей. Влияние примесей может сделать электропроводность полупроводника преимущественно электронной или же, наоборот, преимущественно дырочной. Вместе с дополнительными атомами и электронами примеси привносят промежуточные энергетические уровни между заполненной зоной и зоной проводимости. На рис. 117 представлена энергетическая схема полупроводника с примесью атомов, которая сообщает полупроводнику

преимущественно электронную проводимость (такие примеси называют *донорами*). В этом случае промежуточные уровни, созданные примесью и заполненные электронами, расположены близко к зоне проводимости. При повышении температуры электроны

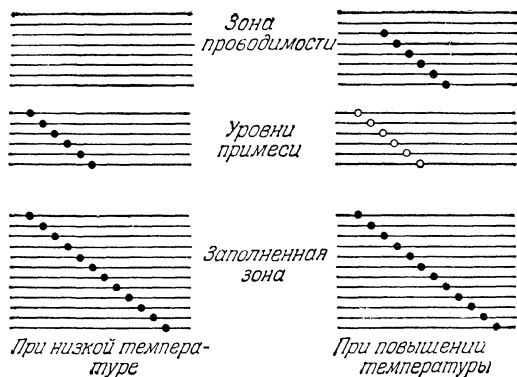


Рис. 117. Влияние донора на энергетическую схему электронных уровней в полупроводнике.

с промежуточных уровней, созданных примесью, легче могут перескочить в зону проводимости, чем электроны из заполненной зоны.

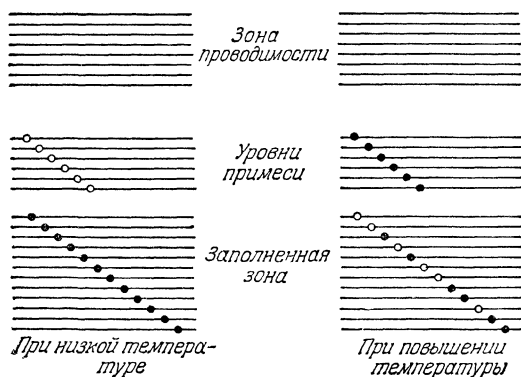


Рис. 118. Влияние акцептора на энергетическую схему электронных уровней в полупроводнике.

Несмотря на возникновение электронной проводимости, «свободные места» в основной заполненной зоне могут и не образоваться; дырочная проводимость может отсутствовать.

Примесь других атомов может сообщать полупроводнику преимущественно дырочную проводимость (такие примеси называют *акцепторами*). Избыток этих атомов приводит к появлению проме-

жуточных уровней, не занятых электронами и близко расположенных к заполненной зоне (рис. 118). При повышении температуры электроны из заполненной зоны перескакивают на эти промежуточные уровни и в заполненной зоне образуется большое число дырок, что и обеспечивает электропроводность, несмотря на отсутствие электронов в зоне проводимости.

Для лучшего понимания природы проводимости, создаваемой примесью, рассмотрим детальнее то действие, которое производит атом примеси в кристаллической решетке типичного полупроводника — германия. Германий является четырехвалентным элементом четвертой группы периодической системы Менделеева. В кристаллической решетке германия каждый атом взаимодействует с четырьмя ближайшими, соседними атомами; в этом взаимодействии

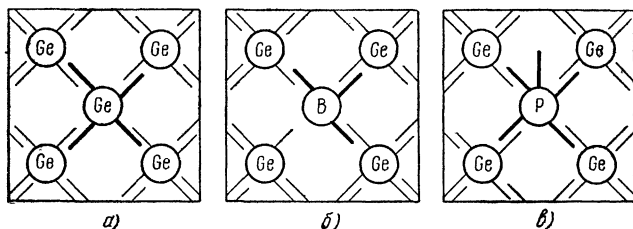


Рис. 119. Электронные связи в кристаллических решетках: а — чистого германия; б — при наличии примеси бора; в — при наличии примеси фосфора.

участвуют восемь электронов: четыре электрона из внешней оболочки атома и четыре электрона из внешних оболочек соседних атомов (рис. 119).

Допустим, что на место одного из атомов германия попадает посторонний атом с другой валентностью. Тогда система валентных связей вблизи атома примеси нарушится. При этом происходит одно из двух:

1) если атом примеси является представителем пятой группы, т. е. пятивалентным (например, атом Р или As), то пятый валентный электрон атома примеси, оказывающийся лишним, легко отделяется от него и блуждает по кристаллу; при наличии приложенного электрического поля этот электрон становится электроном проводимости, т. е. такая примесь оказывается донором (рис. 117);

2) если атом примеси в решетке германия является представителем третьей группы (бор, алюминий или индий), т. е. трехвалентным, то такой атом способен присоединить к себе один электрон, заимствуя его от соседнего атома германия, на что необходима затрата некоторой энергии, сообщаемой тепловым движением или фотонами. В решетке германия при этом образуется вакантное электронное место («дырка»). Это вакантное место не остается постоянно в каком-либо узле, но вследствие переходов электронов на

это вариантное место оно блуждает хаотически по кристаллу. В электрическом поле движение дырки приобретает направленность: электроны во время переходов будут преимущественно смещаться против поля, сама же дырка будет двигаться по полю, подобно носителю положительного заряда (эстафетное движение электронов сводится к движению дырки).

Полупроводники, обладающие преимущественно электронной проводимостью, называются *полупроводниками типа n* (negativ — отрицательный), а полупроводники, обладающие дырочной проводимостью, — *типа p* (positiv — положительный).

§ 36. Применения полупроводников

Термисторы. Как уже было указано, с повышением температуры электропроводность всех полупроводников (в отличие от электропроводности металлов) резко возрастает, что является результатом увеличения с ростом температуры концентрации электронов проводимости. В первом приближении для небольшого интервала температур зависимость электропроводности σ от температуры для полупроводников может быть выражена формулой

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\omega}{kT}},$$

где k — постоянная Больцмана и ω — энергия, необходимая для перевода электрона в зону проводимости (энергия активации). Вблизи абсолютного нуля все полупроводники становятся хорошими изоляторами. Опыт показывает, что у некоторых полупроводников при повышении температуры на 1° электропроводность увеличивается на 3—6%, а при повышении на 10° — приблизительно на 75%.

Высокая чувствительность сопротивления полупроводников к изменению температуры позволяет применять их в разнообразных областях техники.

Приборы, основанные на сильной зависимости величины сопротивления полупроводника от температуры, называются *термисторами*.

Для изготовления термисторов используются оксидные полупроводники, обладающие значительной величиной отрицательного температурного коэффициента сопротивления, например смеси двуокиси титана и окиси магния, окиси никеля в соединении с окислами марганца и др. Термисторы изготавливают в виде цилиндрических стержней, трубок, прямоугольных столбиков, бусинок или тонких нитей. Для предохранения от механических повреждений их заключают в баллончики из стекла, керамики или металла (конечно, с изоляцией от него).