

ионов, целиком заполнена электронами, а все более высокие зоны при  $T = 0$  К совершенно пусты<sup>1</sup>.

Зону, целиком заполненную электронами, называют **валентной зоной** кристалла, пустую зону—**зоной проводимости**. Примером кристаллического диэлектрика может служить поваренная соль NaCl.

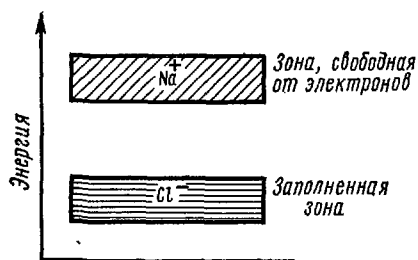


Рис. 13.11

В молекуле NaCl внешний (валентный) электрон атома Na переходит на внешнюю оболочку атома Cl. В результате этого образуются ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  с полностью застроенными электронными оболочками. Поэтому в кристалле NaCl верхняя зона иона хлора и все нижележащие зоны целиком заполнены электронами, а лежащая выше верхняя зона иона натрия совсем их не содержит (рис. 13.11). Расстояние между этими зонами  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  соответствует энергии 6 эВ. Следо-

вательно, внешнее электрическое поле не может перевести электроны из целиком заполненной зоны  $\text{Cl}^-$  в свободную зону проводимости  $\text{Na}^+$ .

6. В твердых диэлектриках электроны могут перемещаться по кристаллу с тепловыми скоростями. Однако это движение хаотично и не создает направленного электронного «дрейфа» — электрического тока. Поэтому электроны в кристаллах диэлектриков следует считать в некотором смысле более свободными, чем в металлах: внешнее электрическое поле не может заставить их двигаться в определенном направлении и вызвать электрический ток. Таким образом, современные представления о строении диэлектриков совершенно отличаются от представлений о связанных зарядах, лежащих в основе классической теории, которая была изложена в гл. VI.

### § 13.4. Собственная проводимость полупроводников

1. Между металлами с удельным сопротивлением  $10^{-6}$ — $10^{-8}$  Ом·м и диэлектриками с удельным сопротивлением  $10^8$ — $10^{13}$  Ом·м находится много материалов, относящихся к **полупроводникам**, удельное сопротивление которых изменяется в широком интервале от  $10^{-5}$  до  $10^9$  Ом·м.

Почти вся окружающая нас природа состоит из полупроводящих веществ. Окислы металлов, сульфиды, теллуриды и селениды многих металлов имеют полупроводниковые свойства. В периодической системе Д. И. Менделеева полупроводники образуют компактную группу элементов, показанную на рис. 13.12. Слева и снизу от полупроводни-

<sup>1</sup> В дальнейшем на всех рисунках не будут изображаться целиком заполненные зоны, кроме последней, которая называется верхней заполненной зоной.

ковых элементов находятся металлы, справа и сверху расположены элементы, которые в твердом состоянии являются диэлектриками. К типичным представителям полупроводников относятся германий, кремний и теллур.

2. Германий — один из наиболее широко применяемых полупроводниковых элементов. Он расположен в IV группе и IV периоде

<sup>5</sup> B (1,1)	<sup>6</sup> C (5,2)			
<sup>14</sup> Si (1,1)	<sup>15</sup> P (1,5)	<sup>16</sup> S (2,5)		
<sup>32</sup> Ge (0,72)	<sup>33</sup> As (1,2)	<sup>34</sup> Se (1,7)		
<sup>50</sup> Sn (0,1)	<sup>51</sup> Sb (0,12)	<sup>52</sup> Te (0,36)	<sup>53</sup> I (1,25)	

Рис. 13.12

периодической системы 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 (рис. 13.13), 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 четыре из них, как и у германия, находятся на внешней оболочке. Они также вступают в химические связи с электронами соседних атомов.

Для возникновения так называемой **собственной проводимости** чистого полупроводника необходимо электроны из нижней заполненной зоны «перебросить» в зону проводимости. Для этого нужно затратить энергию, равную, по крайней мере, ширине запрещенной зоны. Эта величина является важнейшей характеристикой электрических свойств полупроводника и называется **энергией активации собственной проводимости** (для кремния она равна 1,1 эВ). Энергии активации (в электронвольтах) полупроводниковых элементов указаны на рис. 13.12 цифрами в кружках.

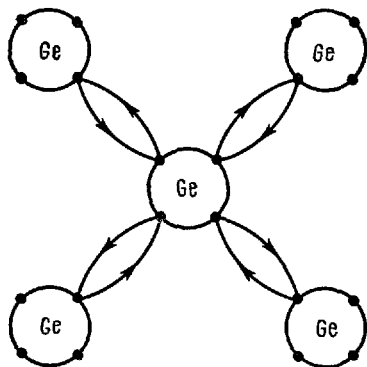


Рис. 13.13

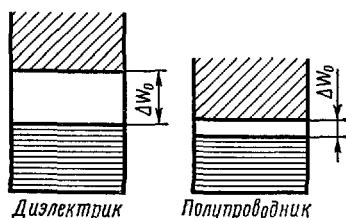


Рис. 13.14

3 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.

Зонная теория объяснила возможность существования таких свойств у твердого тела. Если верхняя, полностью занятая электронами энергетическая зона кристалла отделена от ближайшей свободной зоны узкой энергетической областью, то такое тело будет диэлектриком лишь при низких температурах.

Вследствие теплового возбуждения с повышением температуры электроны, расположенные у верхней границы валентной зоны, могут перейти в зону проводимости. На рис. 13.14 показано расположение энергетических зон диэлектрика и полупроводника. С повышением температуры у полупроводников растет число электронов, перешедших вследствие теплового возбуждения в свободную энергетическую зону и участвующих в проводимости. Поэтому сопротивление полупроводников уменьшается с повышением температуры.

4. 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». 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. Так, например, если в ряду кресел в театре имеется свободное крайнее правое место и зрители последовательно пересаживаются на свободное место, все происходит так, как будто свободное место движется справа налево, в сторону, противоположную перемещению зрителей.

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**.

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

Итак, собственная проводимость полупроводника носит смешанный электронно-дырочный характер. Она обусловлена двумя типами носителей заряда: электронами в зоне проводимости и дырками в валентной зоне. Каждому электрону, перешедшему в зону проводимости, соответствует одна дырка. Поэтому концентрации электронов проводимости ( $n_e$ ) и дырок ( $n_h$ ) одинаковы. Расчеты показывают, что

$$n_e = n_h = \text{const} \cdot e^{-\Delta W_0/2kT}, \quad (13.3)$$

где  $\Delta W_0$  — энергия активации собственной проводимости полупроводника,  $T$  — его температура. С ростом температуры концентрация

носителей заряда и удельная электрическая проводимость полупроводника быстро возрастают.

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

### § 13.5. Примесная проводимость полупроводников

1. Введение в полупроводник п р и м е с е й сильно влияет на его электрические свойства. Под примесями подразумевают как атомы или ионы посторонних элементов, так и различного рода дефекты и искажения в кристаллической решетке: пустые узлы, сдвиги, возникающие при деформациях кристалла, трещины и т.п. Все эти примеси и включения вносят дополнительные изменения в периодическое поле кристалла и влияют на поведение электронов и их энергетические состояния. Если в основную кристаллическую решетку полупроводника вносятся примесные атомы, то независимо от того, где эти атомы располагаются в кристалле, возникают дополнительные энергетические уровни расположенные в запрещенной зоне и называемые **примесными энергетическими уровнями**.

2. Примеси могут играть двоякую 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. Этот «лишний» электрон слабее связан с ядром и его сравнительно легко перевести в зону проводимости полупроводника.

Энергия «лишних» примесных электронов несколько меньше, чем энергия, соответствующая нижней границе незаполненной зоны проводимости полупроводника. Поэтому энергетические уровни примесных электронов располагаются в б л и з и д н а зоны проводимости. Эти уровни заполнены некоторым числом электронов и потому называются **донорными**, а атомы примесей, поставляющие «лишние» электроны в решетку, называются **атомами-донорами**. Для перевода электрона с донорного уровня в зону проводимости нужна незначительная энергия  $\Delta W_e$ , которую он может получить при тепловом возбуждении. Так, например, если для кремния примесью является мышьяк, то  $\Delta W_e = 0,054$  эВ.

В результате переброса электронов с донорных уровней в зону проводимости в полупроводнике возникает **электронная примесная проводимость (проводимость  $n$ -типа)**. Полупроводники такого типа называются **электронными (или полупроводниками  $n$ -типа)**. На рис. 13.15 показана схема энергетических уровней полупроводника  $n$ -типа.