

трического поля. Это поле создается у п о р я д о ч е н н о расположенными в пространстве узлами кристаллической решетки. В металлах и кристаллических телах с ионной решеткой наличие такого поля очевидно. Однако оно имеется и в том случае, когда решетка построена из н е й т р а л ь н ы х частиц — атомов и молекул, состоящих из положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов. Поэтому они нейтральны лишь в том смысле, что с у м м а р н ы й заряд ядер каждой молекулы численно равен суммарному заряду ее электронов. В то же время напряженность электрического поля, создаваемого ядрами и электронами, в общем случае отлична от нуля. Это поле особенно велико внутри атомов и молекул и в непосредственной близости от них.

Таким образом, в случае л ю б о г о твердого тела, состоящего из упорядоченно расположенных частиц (ионов, атомов или молекул), имеет место образование зонного энергетического спектра.

§ 13.3. Металлы и диэлектрики в зонной теории

1. С точки зрения зонной теории различия в электрических свойствах разных типов твердых тел могут объясняться следующими причинами:

- а) шириной запрещенных энергетических зон;
- б) различным заполнением электронами разрешенных энергетических зон.

Основной вопрос, который возникает при изучении электрических свойств твердого тела, а именно: проводит оно электрический ток или нет, решается в зависимости от двух указанных факторов. Необходимым условием проводимости твердого тела является н а л и ч и е свободных энергетических уровней, на которые поле сторонних сил могло бы перевести электроны¹.

2. В обычных, не слишком сильных полях могут осуществляться только внутризонные переходы. Поэтому легко указать, в каких случаях твердое тело будет проводником электрического тока.

Предположим, что энергетические зоны твердого тела разделены запрещенными областями, как указано на рис. 13.8. В качестве примера рассмотрим металлический натрий. В изолированном атоме натрия имеются две заполненные электронные оболочки, на которых находятся соответственно 2 и 8 электронов. Валентный одиннадцатый электрон атома натрия согласно принципу Паули заполняет лишь наполовину верхний энергетический уровень атома. В кристаллическом натрии первой и второй заполненным оболочкам изолированных атомов соответствуют целиком з а п о л н е н н ы е электронами з о н ы. Следующая зона разрешенных значений энергии электронов заполнена валентными электронами лишь наполовину (рис. 13.9). Эту зону называют **зоной проводимости**, так как находящиеся в ней электроны могут участвовать в образовании тока проводимости. Под действием поля, создаваемого в кристалле источником электрической

¹ Строго говоря, эти уровни не должны быть п о л н о с т ь ю заняты электронами.

энергии, валентные электроны приходят в упорядоченное движение, увеличивая свою энергию и переходя на более высокие свободные энергетические уровни в зоне проводимости.

Таким образом, если зона не полностью занята валентными электронами, то твердое тело всегда будет **проводником** электрического тока.

3. В свободном атоме дискретные уровни энергии электронов расположены так, что высшие энергетические состояния всегда имеют

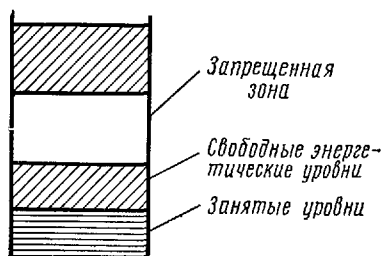


Рис. 13.9

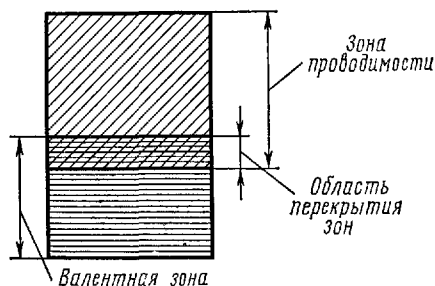


Рис. 13.10

энергию больше, чем энергия ниже расположенных состояний. При образовании кристаллического твердого тела зона, возникшая при расщеплении верхнего (возбужденного) состояния атома, может **перекрываться** с зоной, возникшей за счет расщепления нижнего состояния валентных электронов (см. рис. 13.7). Это имеет место у кристаллов элементов, образующих вторую группу периодической системы Д. И. Менделеева (Be, Cd, Mg, Zn и др.). В этом случае образуется более широкая гибридная зона, в которой размещаются валентные электроны (рис. 13.10 и 13.7). Электроны заполняют гибридную зону лишь частично. Поэтому гибридная зона является зоной проводимости, а подобные кристаллы — проводниками.

4. Зонная теория позволила объяснить, почему увеличение валентности металла, т.е. числа «свободных» электронов, приходящихся на один атом, не вызывает соответствующего возрастания электропроводности. Так, например, удельная электропроводность трехвалентного алюминия почти вдвое меньше, чем одновалентной меди. Оказалось, что электропроводность твердого тела зависит не от числа валентных электронов, а от отношения числа электронов в зоне проводимости к общему числу энергетических уровней в этой зоне. Если валентных электронов так много, что они целиком заполняют все энергетические уровни верхней зоны, то твердое тело не проводит электрического тока. Рассмотренные выше двухвалентные щелочноземельные металлы обладают сравнительно хорошей электропроводностью только благодаря тому, что у них образуется гибридная зона, содержащая свободные энергетические уровни.

5. У **твердых диэлектриков** энергетические зоны не **перекрываются**, причем зона, объединяющая внешние электроны атомов или

ионов, целиком заполнена электронами, а все более высокие зоны при $T = 0 \text{ К}$ совершенно пусты¹.

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

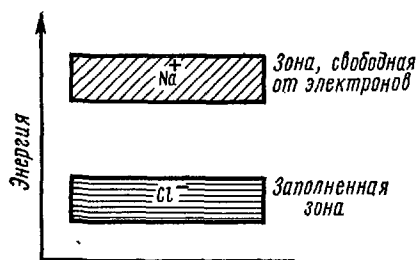


Рис. 13.11

В молекуле NaCl внешний (валентный) электрон атома Na переходит на внешнюю оболочку атома Cl. В результате этого образуются ионы Na^+ и 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 Na^+ и Cl^- соответствует энергии 6 эВ. Следова-

тельно, внешнее электрическое поле не может перевести электроны из целиком заполненной зоны Cl^- в свободную зону проводимости 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} — $10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и диэлектриками с удельным сопротивлением 10^8 — $10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ находится много материалов, относящихся к **полупроводникам**, удельное сопротивление которых изменяется в широком интервале от 10^{-5} до $10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

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-

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