

ЛЕКЦИЯ 11

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Зонная теория твердых тел.
2. Металлы, диэлектрики, полупроводники с точки зрения зонной теории твердого тела.
3. Полупроводники. Общие свойства.
4. Собственные полупроводники.
Электропроводность.
5. Примесные полупроводники. Электропроводность

ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Будем рассматривать кристаллическое твердое тело как строго периодическую структуру, в которой ионы создают электрическое поле.

В этом поле находятся электроны.

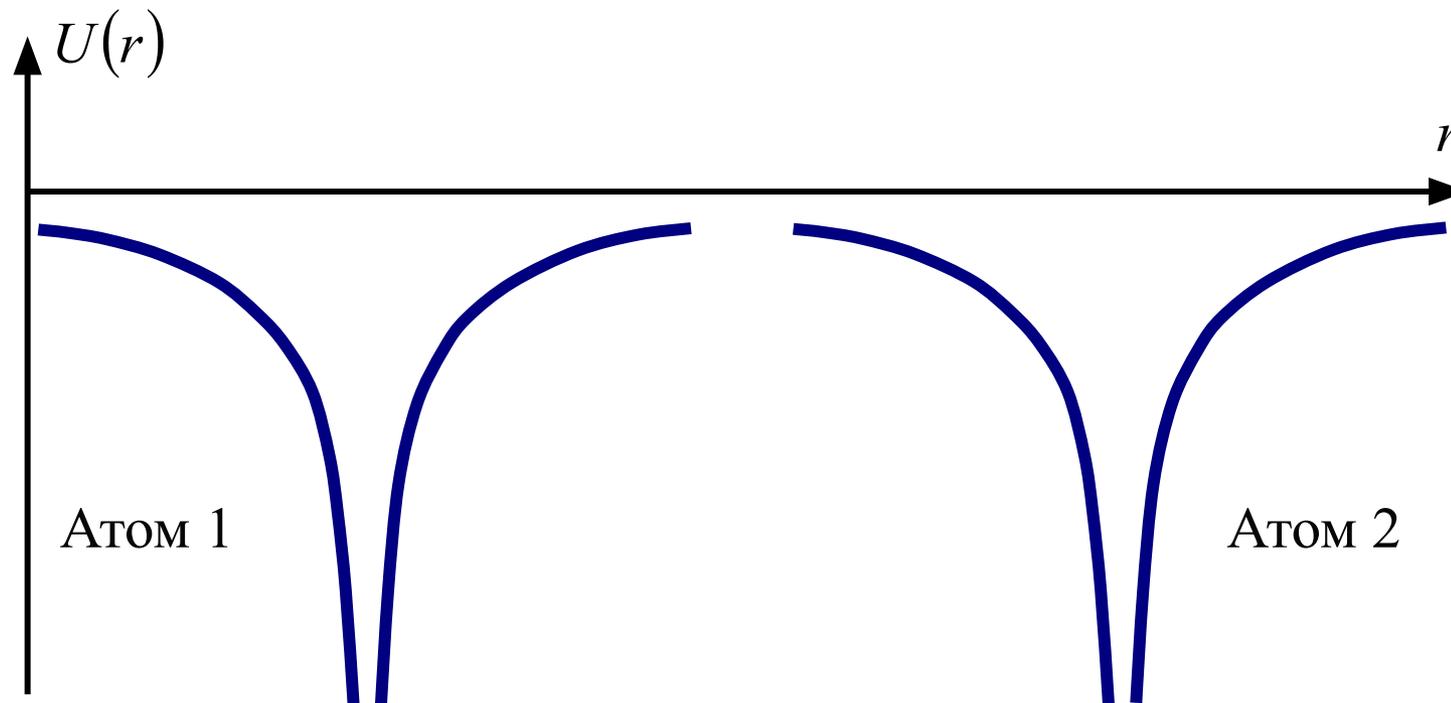
В кристалле расстояния между атомами $d \sim 10^{-10}$ м (порядка диаметра).

Электрические поля атомов частично перекрываются.

Происходит понижение и сужение потенциального барьера для валентных электронов атомов.

Определение. *Валентными* называются электроны, расположенные на внешних оболочках атомов.

ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

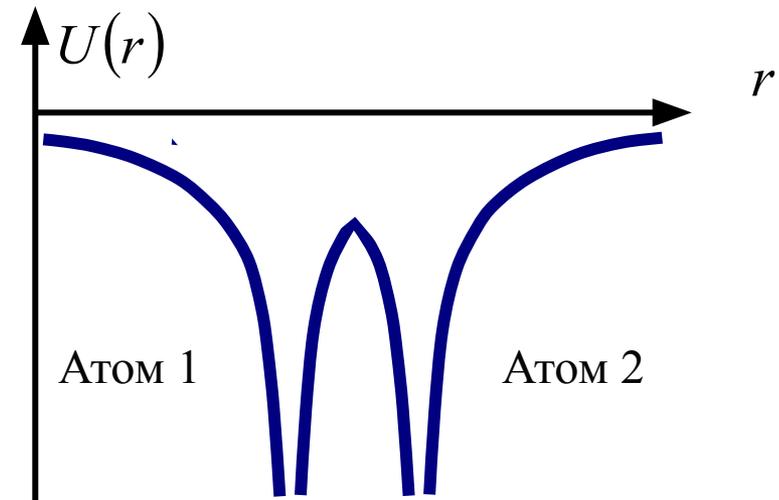


1. Расстояние между атомами большое ($d > 10^{-10}$ м).
2. Расстояние между атомами $d \sim 10^{-10}$ м.

ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Электроны могут туннелировать в соседнюю потенциальную яму.

Образуется квантовомеханическая система, в которой каждый электрон должен находиться на отдельном энергетическом уровне (принцип Паули).

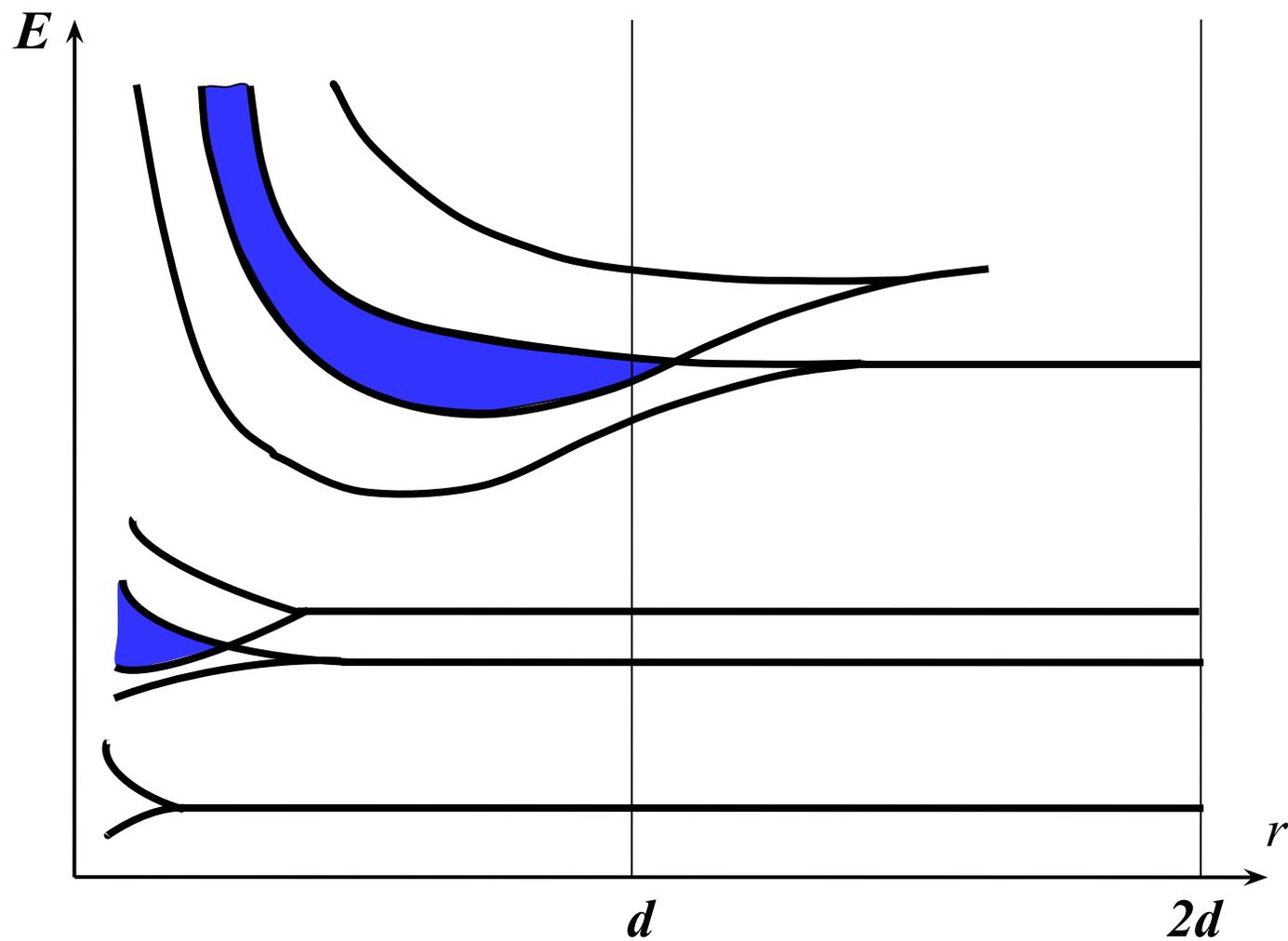


Это приводит к тому, что вместо одного, одинакового для всех атомов уровня энергии, возникает множество близких, но не совпадающих уровней.

Образуются *энергетические зоны* разрешенных уровней.

Величина расщепления различна для каждого уровня.

ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

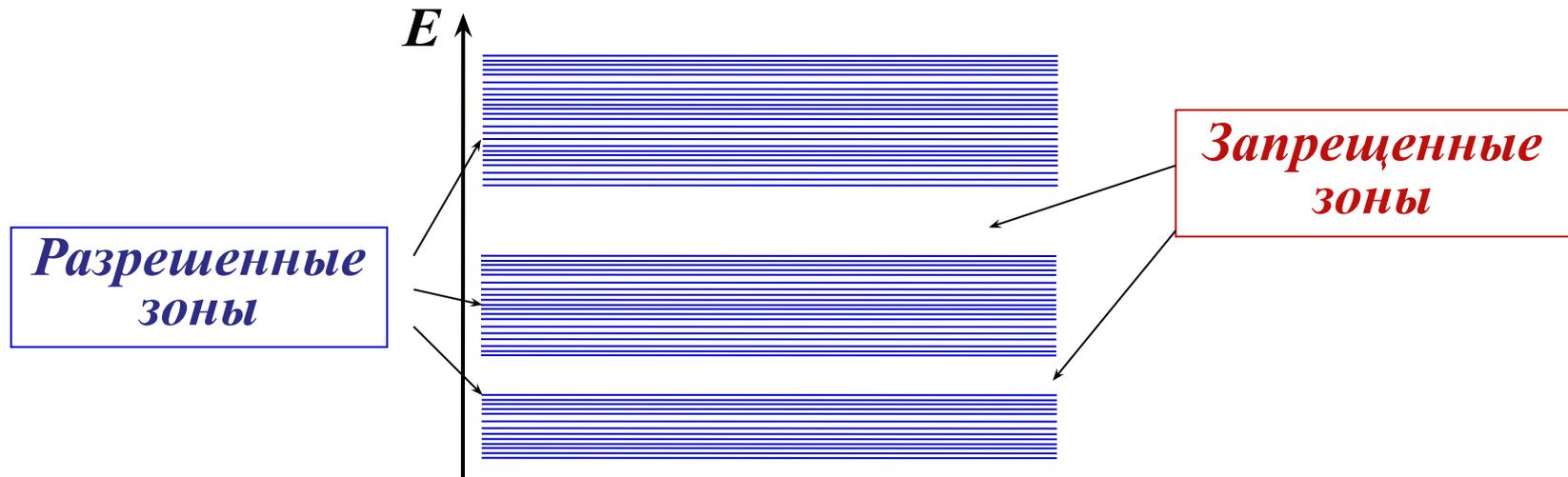


ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Сильнее расщепляются валентные уровни.

Энергетические зоны *разрешенных* энергий могут быть разделены интервалами, в которых нет разрешенных энергетических уровней.

Это запрещенные уровни (*запрещенные зоны*).



Такой подход положен в основу *зонной теории твердого тела*. Теория объясняет существование металлов, диэлектриков и полупроводников.

Металлы, диэлектрики, полупроводники с точки зрения зонной теории твердого тела

Электрические свойства материалов различны по следующим причинам:

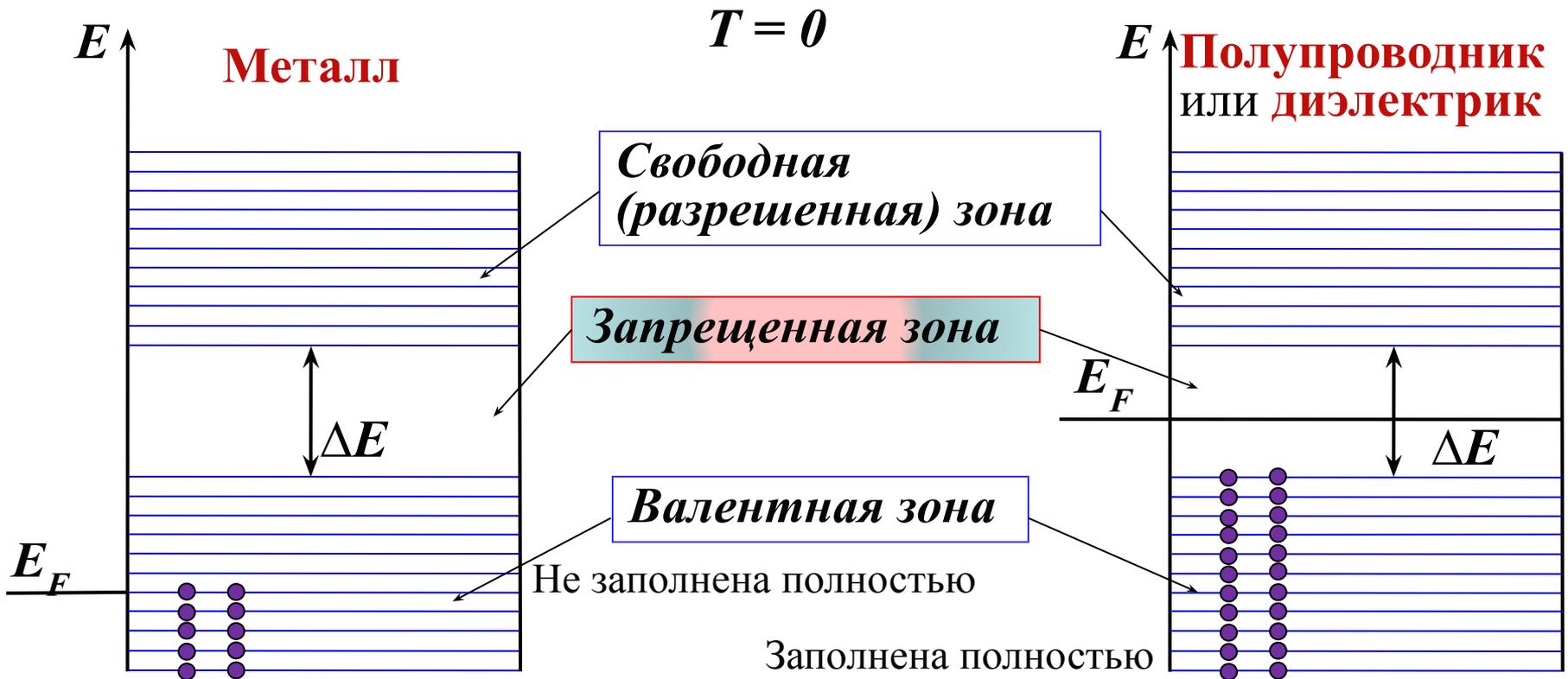
- неодинаковое заполнение электронами разрешенных зон;
- различная ширина запрещенных зон.

Определение. *Валентная зона* - разрешенная зона, возникшая из того уровня, на котором находятся валентные электроны в атоме.

При абсолютном нуле температуры все разрешенные зоны ниже валентной полностью заполнены электронами, выше валентной - полностью свободны.

В зависимости от степени заполнения электронами валентной зоны и ширины расположенной над ней запрещенной зоны возможны три случая.

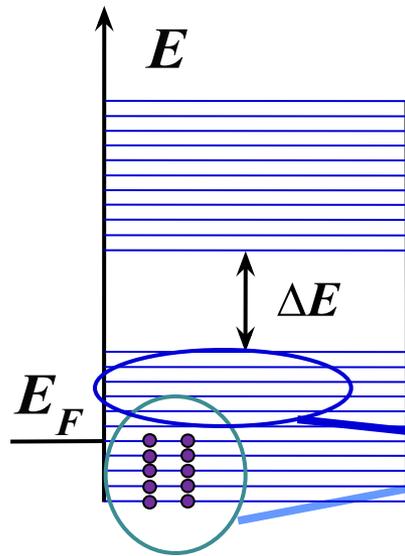
Металлы, диэлектрики, полупроводники с точки зрения зонной теории твердого тела



ΔE - ширина запрещенной зоны.

E_F - энергия Ферми.

Металлы, диэлектрики, полупроводники с точки зрения зонной теории твердого тела



Случай 1. Электроны заполняют валентную зону не полностью. При наложении на кристалл электрического поля (даже слабого) **электроны** могут ускоряться (переходить на более высокие энергетические уровни).

Принцип Паули: такие переходы возможны, если выше уровня Ферми есть **свободные уровни.**

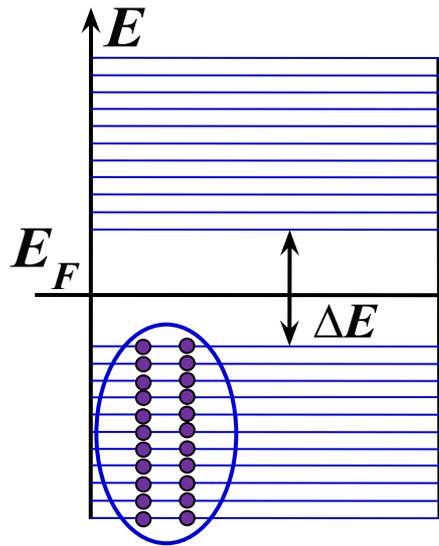
Таким образом, электроны этой валентной зоны могут переносить ток даже при $T = 0 \text{ K}$.

Кристалл с такой схемой заполнения энергетических уровней - это **МЕТАЛЛ**. Удельное сопротивление металлов $10^{-6} - 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

К металлам относятся также вещества, у которых ширина запрещенной зоны равна нулю.

Металлы, диэлектрики, полупроводники с точки зрения зонной теории твердого тела

Случай 2 Все уровни валентной зоны при $T = 0\text{ K}$ заполнены электронами



Электрону для перехода на ближайший верхний уровень нужно сообщить энергию не меньшую, чем ширина запрещенной зоны ΔE .

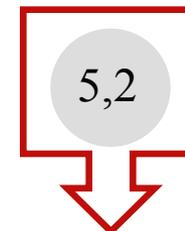
Величина ΔE может составлять несколько эВ. Это большая энергия.

В этом случае при $T = 0\text{ K}$ кристалл не проводит ток, т.е. является **диэлектриком** (удельное сопротивление $\sim 10^8 - 10^{13}$ Ом·м) или **полупроводником** (удельное сопротивление $\sim 10^{-5} - 10^8$ Ом·м).

Деление на диэлектрики и полупроводники условно. Считается, что если $\Delta E \leq 3$ эВ, то кристалл является полупроводником.

Полупроводники компактно расположены в периодической системе элементов.

| | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 5 B БОР 1,1 | 6 C УГЛЕРОД 5,2 | | |
| | 14 Si КРЕМНИЙ 1,1 | 15 P ФОСФОР 1,5 | 16 S СЕРА 2,5 |
| | 32 Ge ГЕРМАНИЙ 0,72 | 33 As МЫШЬЯК 1,2 | 34 Se СЕЛЕН 1,7 |
| 50 Sn ОЛОВО 0,1 | 51 Sb СУРЬМА 0,12 | 52 Te ТЕЛЛУР 0,36 | 53 I ЙОД 1,25 |



энергия активации проводимости в эВ

Слева и снизу от полупроводников - металлы.

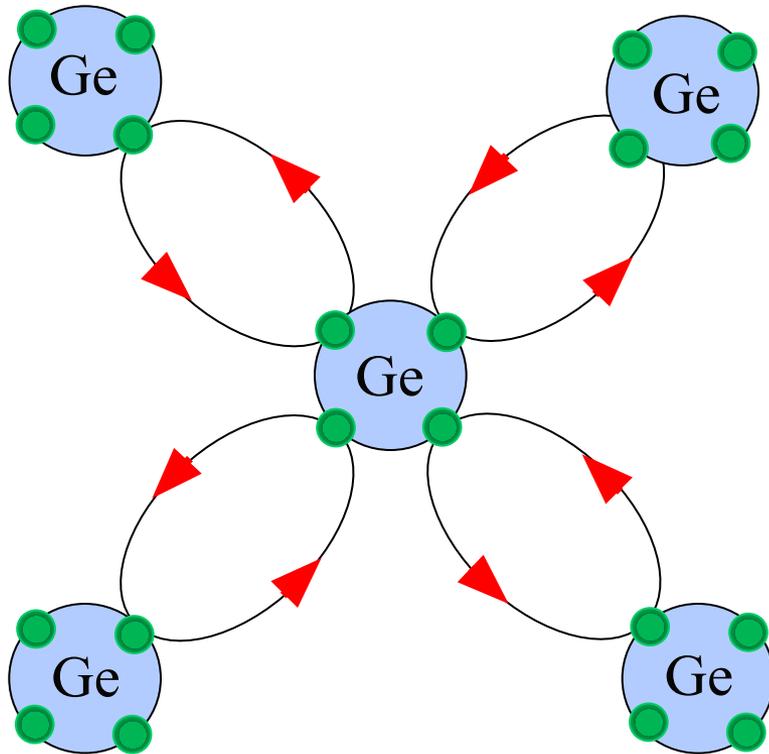
Справа и сверху – диэлектрики.

Типичные полупроводники - *германий, кремний и теллур.*

Полупроводники. Общие свойства.

Германий - наиболее широко применяется.

На внешней оболочке германия 4 валентных электрона.



Электроны соседних атомов вступают в химические связи.

При $T = 0$ К в чистом германии свободных электронов нет.

Поэтому (при $T = 0$ К) германий хороший изолятор.

Германий рассеян в природе и дорого стоит.

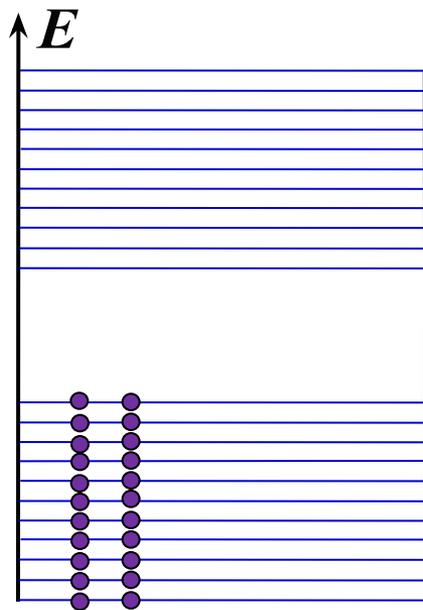
Кремний – примерно такая же схема. Четыре электрона находятся на внешней оболочке.

Собственные полупроводники. Проводимость

По типу электропроводности - *собственные* и *примесные* полупроводники.

Собственные - химически чистые полупроводники, их проводимость - *собственная* проводимость.

При $T=0K$ собственные полупроводники - диэлектрики.



При повышении температуры электроны из валентной зоны могут переходить в зону проводимости.

При наложении на кристалл электрического поля электроны проводимости создают электрический ток.

Проводимость за счет электронов - это электронная проводимость или проводимость *n* - типа.

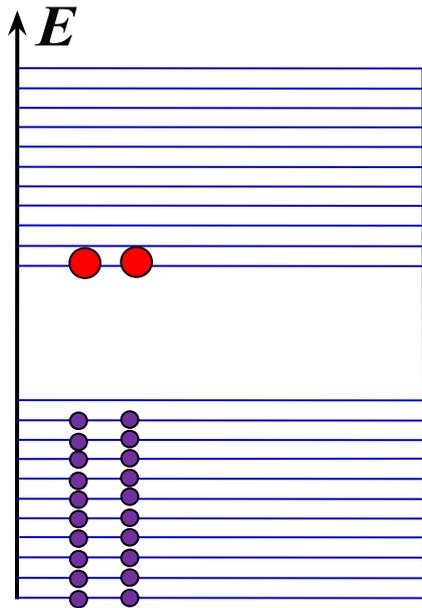
Собственные полупроводники. Электропроводность

В результате тепловых переходов электронов в зону проводимости в валентной зоне возникают вакансии - «дырки» .

Во внешнем электрическом поле в «дырку» может переместиться электрон с соседнего уровня.

При этом дырка появится в том месте, откуда ушел электрон и т.д.

Дырка как бы перемещается в направлении, противоположном перемещению электрона так, как если бы дырка обладала положительным зарядом $+e$.



Проводимость собственных полупроводников, обусловленная квазичастицами – дырками – это **дырочная проводимость** или проводимость *p* – **типа**.

Причина возникновения проводимости - действие внешних факторов: температуры, сильных электрических полей и т.д.

Примесные полупроводники. Электропроводность

Введение в полупроводник примесей сильно влияет на его электрические свойства.

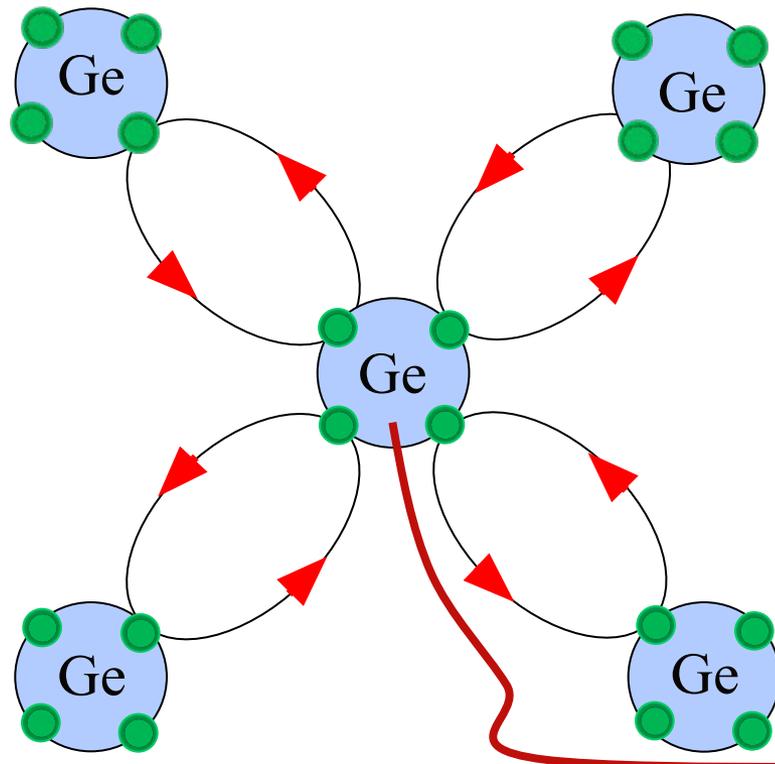
Примеси - атомы или ионы посторонних элементов и дефекты кристаллической решетки: пустые узлы, деформационные сдвиги кристалла, трещины и т.д.

Появление в кристалле примесей приводит к тому, что возникают *дополнительные энергетические уровни*, расположенные в запрещенной зоне.

Примесные полупроводники. Электропроводность

Механизм влияния примесей на электропроводность *примесных полупроводников*.

Примесные полупроводники создают специально (замещением некоторых атомов полупроводника атомами, валентность которых отличается от валентности атомов полупроводника).



Пример 1. В германий (4-валентные атомы) внедряется небольшое количество 5-валентной примеси (фосфор). Четыре из пяти валентных электронов фосфора образуют связи с ближайшими атомами германия.

Пятый валентный электрон фосфора - лишний. Образуется свободный электрон.

При этом возникает положительно заряженный **ион фосфора**.

Примесные полупроводники. Электропроводность

Положительный заряд (дырка) локализован на этом ионе и перемещаться по решетке не может.

При температуре около 300 K большинство атомов фосфора ионизировано. В полупроводнике появляются свободные электроны.

Эти электроны обеспечивают *электронную проводимость (проводимость n – типа)* в примесном полупроводнике.

Атомы примеси, валентность которых на единицу больше валентности основных атомов, и которые отдают избыточные электроны в объем полупроводника, называются *донорами*.

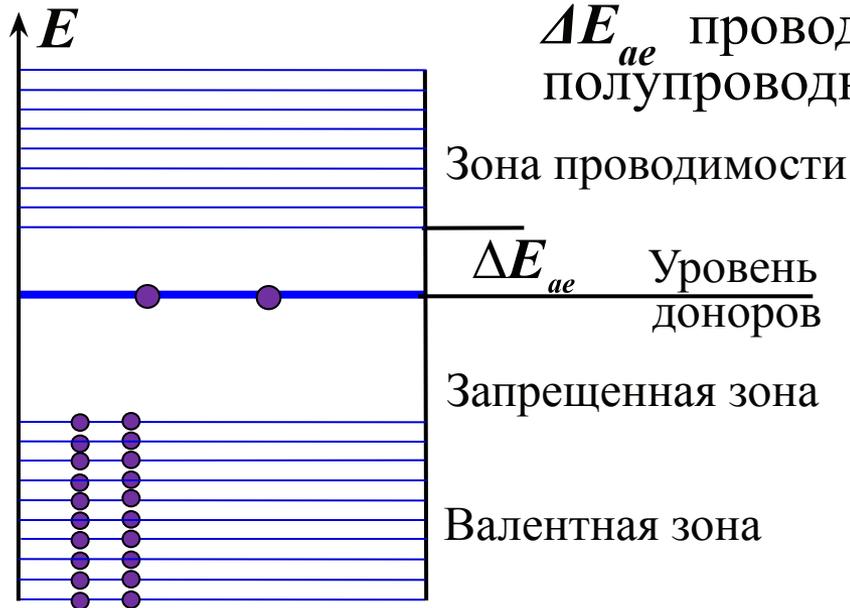
Примеры донорных примесей в германий – фосфор, мышьяк, сурьма.

Примесные полупроводники. Электропроводность

Энергетические уровни примесных электронов (*донорские уровни*) располагаются вблизи дна зоны проводимости.

Для перевода примесных электронов в зону проводимости нужна небольшая *энергия активации электронной проводимости* ΔE_{ae} .

В таблице - ширина запрещенной зоны ΔE_a и ΔE_{ae} проводимости *n* – *типа* для некоторых полупроводников.



| Полупроводник | Энергия, эВ | | | |
|---------------|--------------|-----------------|-----------|-----------|
| | ΔE_a | ΔE_{ae} | | |
| | | <i>P</i> | <i>As</i> | <i>Sb</i> |
| кремний | 1.10 | 0.045 | 0.050 | 0.039 |
| германий | 0.72 | 0.012 | 0.013 | 0.010 |

Примесные полупроводники. Электропроводность

Пример 2. Пусть в решетку германия (4-валентные атомы) внедряется 3-валентная примесь (бор, индий). Три валентных электрона примеси образуют связи с ближайшими атомами германия. Нет полного комплекта связей.

Но: примесь может заимствовать один электрон у соседнего атома германия. Теперь этот атом будет «дыркой».

Дырка заимствует электрон у соседа и т.д. Процесс последовательного заполнения свободной связи эквивалентен движению дырки.

Перемещающиеся дырки обеспечивают *дырочную проводимость* (*проводимость p – типа*) в примесном полупроводнике.

Атомы примеси, валентность которых на единицу меньше валентности основных атомов, называются *акцепторами*. В запрещенной зоне появляются *акцепторные уровни*, не занятые электронами.

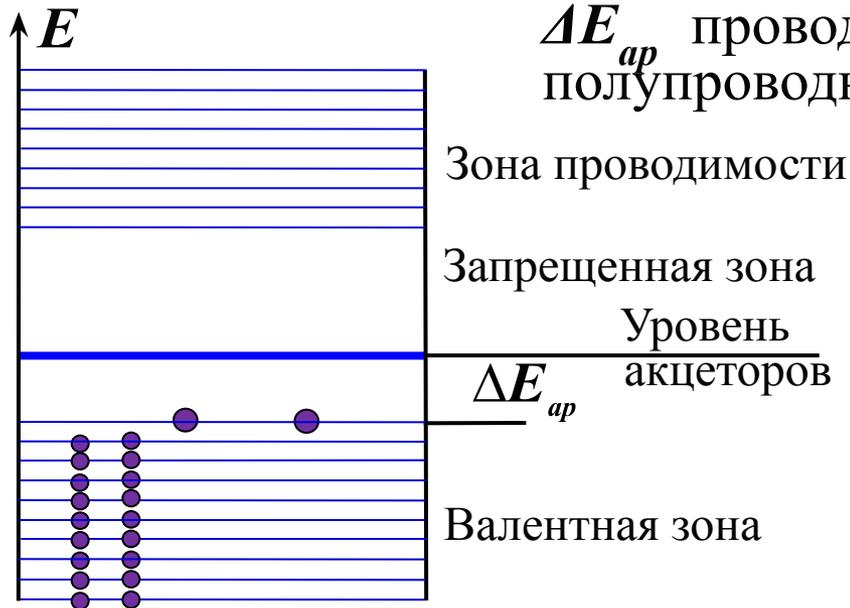
Примесные полупроводники. Электропроводность

Акцепторные энергетические уровни располагаются несколько выше верхнего края валентной зоны основного кристалла.

Для перевода электронов с верхних уровней валентной зоны на акцепторные уровни нужна небольшая *энергия активации дырочной проводимости* ΔE_{ap} .

В итоге вблизи потолка валентной зоны появляются свободные уровни, обеспечивающие электропроводность основного кристалла.

В таблице - ширина запрещенной зоны ΔE_a и ΔE_{ap} проводимости *p* – *типа* для некоторых полупроводников.



| Полупроводник | Энергия, эВ | | | |
|---------------|--------------|-----------------|-----------|-----------|
| | ΔE_a | ΔE_{ap} | | |
| | | B | Al | In |
| кремний | 1.10 | 0.045 | 0.060 | 0.070 |
| германий | 0.72 | 0.010 | 0.010 | 0.011 |