

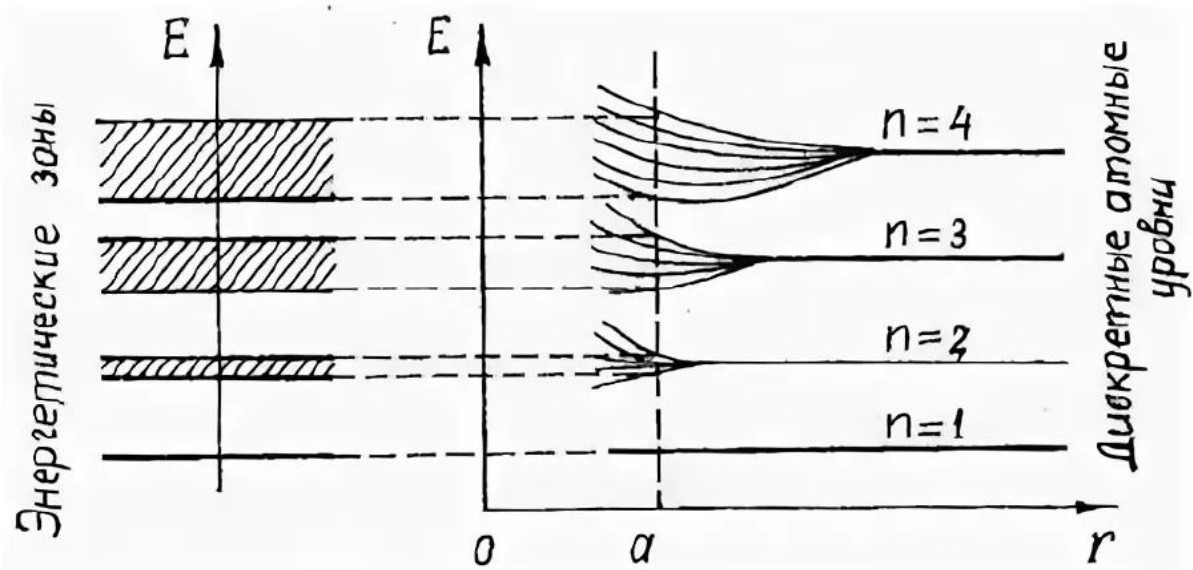
## Билет №19.

### Введение.

Для начала рассмотрим отдельный атом и энергетические уровни его валентных электронов. Низшие по энергии уровни валентных электронов являются основными, а все, что находятся выше по энергии - возбужденными. В изолированном атоме, все эти уровни строго отделены по энергиям, что нарушается при учёте взаимодействия атома с окружающими его соседними атомами.

Действительно, пусть некоторая система состоит из  $N$  идентичных атомов, расположенных на далеком расстоянии друг от друга. В этом случае, все энергетические уровни валентных электронов такой системы соответствуют атомным и имеют кратность  $N$ , т.е. число возможных электронных облаков каждого уровня в  $N$  раз больше, чем для отдельного атома.

Сблизим атомы (ионы) в данной системе, поместив их в узлы пространственной кристаллической решетки. Естественно, это неизбежно влечет учёт межатомных взаимодействий: в системе “электроны + ионы” образуется неоднородное периодическое (в пространственном смысле) электрическое поле, которое вносит разные энергетические поправки к каждому из  $N$  “подуровней” любого из  $N$ -кратных уровней кристалла. В этом случае говорят о расщеплении атомного уровня в кристалле.



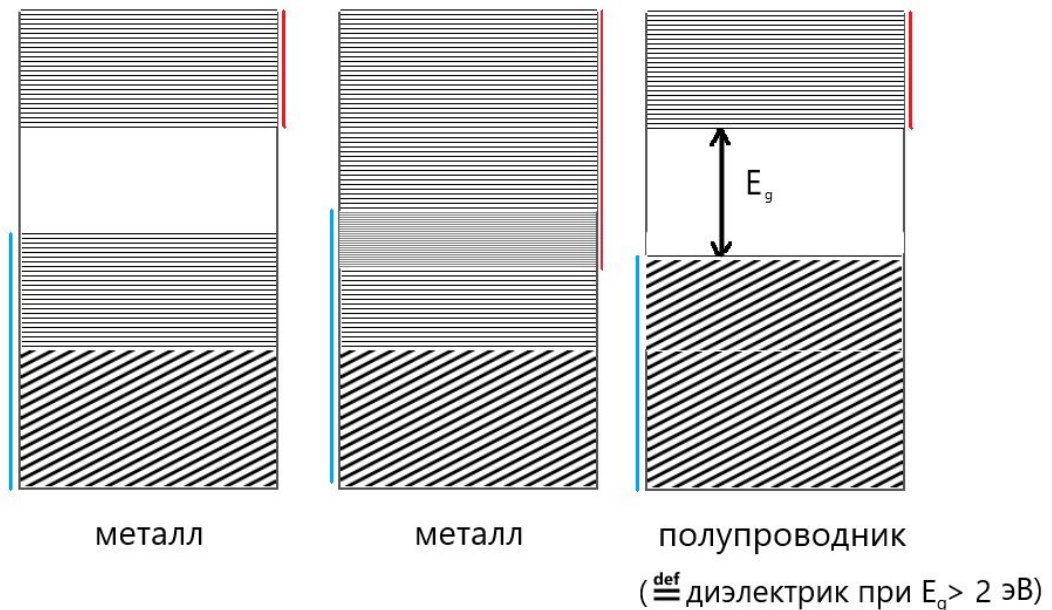
Таким образом, наличие внутренних неоднородностей поля снимает вырождение с каждого из энергетических уровней кристалла как единой квантово-механической системы, что теперь находится в строгом соответствии с принципом запрета Паули: два и более тождественных фермиона (к ним относятся и электроны) не могут одновременно находиться в одном и том же квантовом состоянии.

## Энергетические зоны. Собственная проводимость.

Итак, в кристалле, бывшие атомные уровни валентных электронов “расползаются” в целые квазинепрерывные энергетические зоны, между которыми могут остаться конечные промежутки энергии - т.н. запрещенные зоны. В той зоне, которая образовались из основных энергетических уровней валентных электронов, в стационарном состоянии кристалла концентрация электронов наибольшая.

Заметим, что если все энергетические уровни основной зоны заполнены электронами, через кристалл не может свободно протекать электрический ток: действительно, “движение” электронов подразумевает их переход из одного квантового состояния в другое, чего не может случиться, если все возможные квантовые состояния зоны уже заполнены. Для создания одного электрона проводимости в таком случае потребуется сообщить валентному электрону добавочную энергию, равную ширине запрещенной

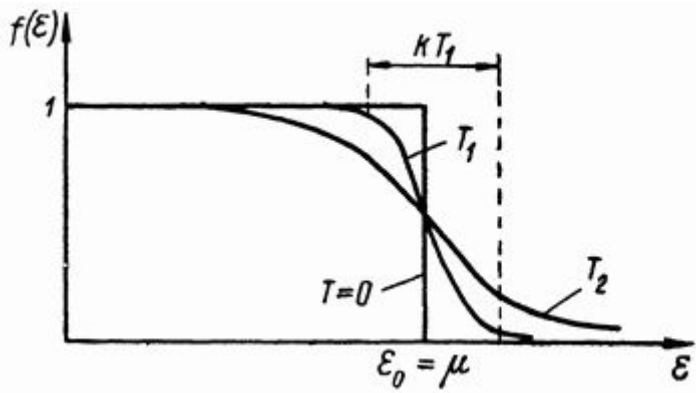
зоны  $E_g$ . Именно поэтому, если в металлах зона основных уровней отделена от возбужденной запрещенной зоной ненулевой ширины, то она (основная зона) всегда заполнена частично.



В полупроводниках зона основных уровней всегда отделена от зоны возбужденных уровней шириной запрещенной зоны  $E_g$ . При  $E_g > 2 \text{ Эв}$  полупроводник принято называть диэлектриком.

Для полупроводников, зона основных уровней получила название валентной, а зона возбужденных уровней - зоной проводимости.

Распределение электронов по энергиям в любой зоне кристалла подчиняется квантовой статистике Ферми-Дирака (обобщение статистики Больцмана - Максвелла, а также распределения Гиббса).



Итак, на одно квантовое состояние с энергией  $\varepsilon$  приходится не более 1 электрона, а именно:

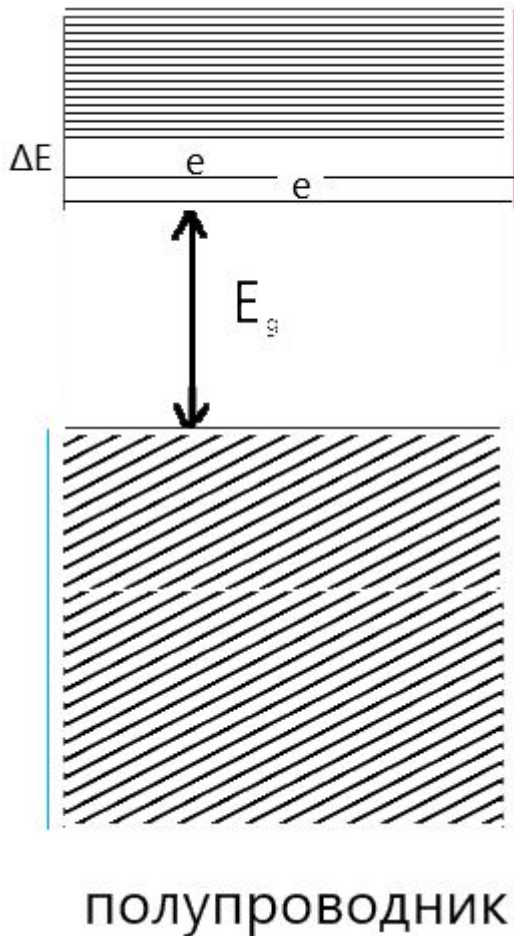
$$f_{\varepsilon} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \mu}{kT}\right)}$$

$\mu$  (хим. потенциал электрона) при достаточно малых температурах тождественен энергии Ферми, т.е. уровню энергии, наполовину занятому электронами. Только электроны, находящиеся около уровня Ферми, могут участвовать в тепловом движении и “пересекать” границу Ферми  $\Rightarrow$  они и являются “потенциальными” электронами проводимости. Видно (см. график), что при увеличении температуры количество таких электронов значительно возрастает, а значит и возрастает число электронов, способных преодолеть энергетический барьер запрещенной зоны. Так, для полупроводников  $E_g$  обычно на порядок выше, чем средняя тепловая кинетическая энергия  $\frac{3}{2}kT$ , и проводимость возрастает с температурой. У металлов  $E_g$  мало или отсутствует, а потому концентрация электронов проводимости слабо зависит от температуры  $\Rightarrow$  проводимость обусловлена рассеянием электронов на квантах тепловых колебаний (фононах). Чем выше температура, тем это рассеяние сильнее, и проводимость металлов уменьшается с температурой как  $\sim \frac{1}{T}$ .

## Легирование.

Проводимость чистого полупроводника можно резко усилить, если добавить к нему специальные примеси (легировать). Суть легирования

сводится к тому, что примесные атомы добавляют новые энергетические уровни (заполненные или свободные) в запрещенную зону исходного полупроводника, близкие к валентной зоне или зоне проводимости, так, что падение энергии при переходе с этих уровней на ближайшие свободные много меньше  $E_g$ . Например, можно добавить несколько **заполненных** энергетических уровней в нижний край зоны проводимости:



Если  $\Delta E \ll E_g$ , то переход свободных электронов этих уровней на вышележащие требует много меньше энергетических затрат, чем преодоление всей ширины запрещенной зоны для электронов валентной зоны. Рассмотренные добавленные уровни называют донорными, атомы примеси - донорами, а получившийся полупроводник - полупроводником n-типа.

Так, введем в кристаллическую решетку кремния (4 валентных электрона) примесь мышьяка (5 валентных электронов). Вследствие теплового движения, атом мышьяка может потерять свой 5-й электрон, а

образовавшийся катион мышьяка может вытеснить атом кремния и встать на его место в узле решетки. В итоге, в кристалле появится новый электрон проводимости.

Аналогичным образом можно усилить проводимость, если добавить дополнительные свободные энергетические уровни сверху валентной зоны. Такие уровни называют акцепторными, атомы примеси - акцепторами. В данном случае удобно ввести квазичастицы проводимости положительного знака, обозначающие отсутствие электрона - “дырки”. Изначально они расположены на свободных акцепторных уровнях, и могут “перемещаться” внутри валентной зоны, *рекомбинируя* с электронами и обеспечивая проводимость. В данном случае говорят о дырочной проводимости, а полупроводник называют полупроводником p-типа (тип полупроводника определяется зарядом основного носителя проводимости).