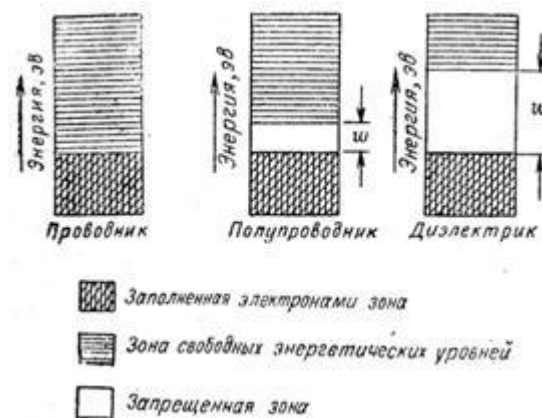


# Физика твёрдо тела. Часть 5.

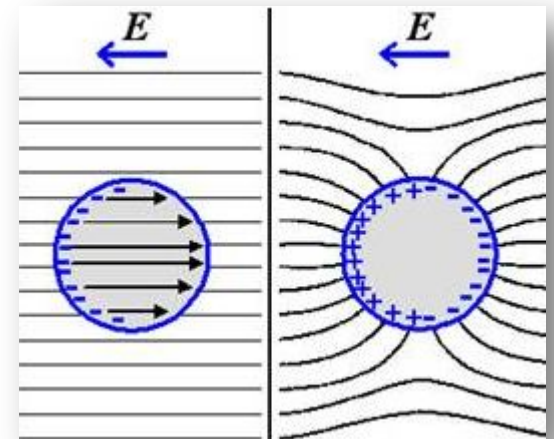


«А что, полупроводник, это один проводник  
на два вагона?  
– Неа, это проводник на полу...»

## Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Заряженные частицы, которые могут свободно перемещаться в электрическом поле, называют свободными зарядами, а вещества, содержащие их, - проводниками. Проводниками являются металлы, жидкие растворы и расплавы электролитов. Свободными зарядами в металле являются электроны внешних оболочек атомов, потерявшие с ними связь. Эти электроны, называемые свободными электронами, могут свободно двигаться по металлическому телу в любом направлении.

В условиях электростатики, т.е., когда электрические заряды неподвижны, напряжённость электрического поля внутри проводника всегда равна нулю. Действительно, если предположить, что поле внутри проводника всё-таки есть, то тогда на находящиеся в нём свободные заряды будет действовать электрические силы, пропорциональные напряжённости поля, и эти заряды начнут двигаться, а значит, поле перестанет быть электростатическим. Таким образом, электростатическое поле внутри проводника отсутствует.



Вещества, в которых нет свободных зарядов, называют **диэлектриками или изоляторами**. Примерами диэлектриков могут служить различные газы, некоторые жидкости (вода, бензин, спирт и др.), а также многие твёрдые вещества (стекло, фарфор, плексиглас, резина и др.). Существуют два вида диэлектриков – полярные и неполярные. В молекуле полярного диэлектрика положительные заряды находятся преимущественно в одной её части («+» полюс), а отрицательные – в другой («-» полюс). У неполярного диэлектрика положительные и отрицательные заряды одинаково распределены по молекуле.

**Электрический дипольный момент** — векторная физическая величина, характеризующая электрические свойства системы заряженных частиц (распределения зарядов) в смысле создаваемого ею поля и действия на нее внешних полей.

Простейшая система зарядов, имеющая определенный (не зависящий от выбора начала координат) ненулевой дипольный момент — это **диполь** (две точечные частицы с одинаковыми по величине разноимёнными зарядами)

Электрический дипольный момент диполя по модулю равен произведению величины положительного заряда на расстояние между зарядами и направлен от отрицательного заряда к положительному, или:

$$\mathbf{p} = q\mathbf{l}$$

где  $q$  — величина зарядов,  $\mathbf{l}$  -вектор с началом в отрицательном заряде и концом в положительном.

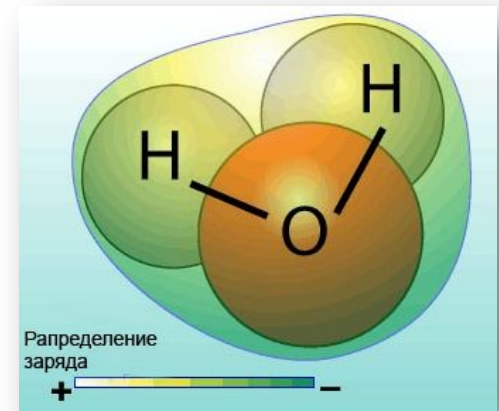
Для системы из  $N$  частиц электрический дипольный момент равен:

$$\mathbf{p} = \sum_{i=1}^N q_i \mathbf{r}_i$$

Системные единицы измерения электрического дипольного момента не имеют специального названия. В СИ это просто Кл · м.

Электрический дипольный момент молекул принято измерять в дебаях:

$$1 \text{ Д} = 3,33564 \cdot 10^{-30} \text{ Кл} \cdot \text{м}.$$



## Поляризация диэлектрика.

При **внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле** в нем возникает некоторое перераспределение зарядов, входящих в состав атомов или молекул. В результате такого перераспределения на поверхности диэлектрического образца появляются избыточные нескомпенсированные связанные заряды. Все заряженные частицы, образующие макроскопические связанные заряды, по-прежнему входят в состав своих атомов.

Связанные заряды создают электрическое поле, которое внутри диэлектрика направлено **противоположно** вектору напряженности внешнего поля. Этот процесс называется поляризацией диэлектрика. В результате полное электрическое поле внутри диэлектрика оказывается по модулю **меньше внешнего поля**.

Физическая величина, равная отношению модуля напряженности внешнего электрического поля в вакууме  $E_0$  к модулю напряженности полного поля в однородном диэлектрике  $E$ , называется **диэлектрической проницаемостью вещества**:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

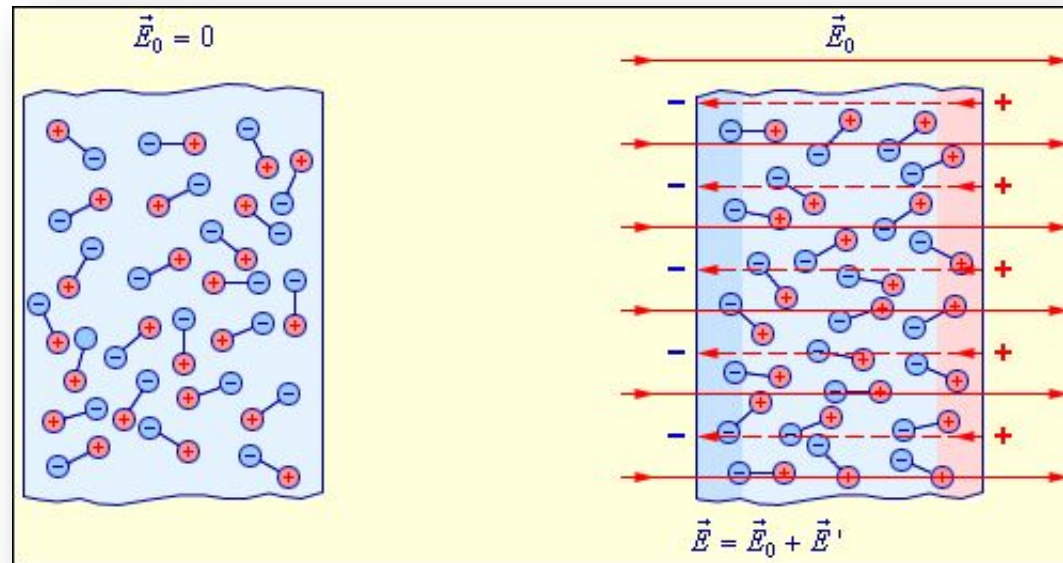
Существует несколько механизмов поляризации диэлектриков. Основными из них являются **ориентационная и деформационная поляризации.**

**Ориентационная** или дипольная поляризация возникает в случае **полярных диэлектриков**, состоящих из молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Такие молекулы представляют собой микроскопические электрические диполи – нейтральную совокупность двух зарядов, равных по модулю и противоположных по знаку, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Дипольным моментом обладает, например, молекула воды, а также молекулы ряда других диэлектриков ( $H_2S$ ,  $NO_2$  и т. д.).

При отсутствии внешнего электрического поля оси молекулярных диполей из-за теплового движения ориентированы хаотично, так что на поверхности диэлектрика и в любом элементе объема электрический заряд в среднем равен нулю.

При внесении диэлектрика во внешнее поле возникает **частичная ориентация молекулярных диполей**. В результате на поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные макроскопические связанные заряды, создающие поле направленное навстречу внешнему полю

Поляризация полярных диэлектриков сильно зависит от температуры, так как тепловое движение молекул играет роль дезориентирующего фактора.

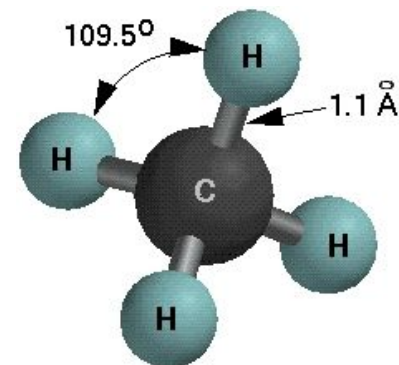


На рисунке показано, что во внешнем поле на разноимённые полюса молекулы полярного диэлектрика действуют противоположно направленные силы, которые стараются повернуть молекулу вдоль вектора напряжённости поля.

**Деформационный** (или упругий) механизм проявляется при поляризации неполярных диэлектриков, молекулы которых не обладают в отсутствие внешнего поля дипольным моментом.

При **электронной поляризации** под действием электрического поля электронные оболочки неполярных диэлектриков деформируются – положительные заряды смещаются в направлении вектора а отрицательные – в противоположном направлении. В результате каждая молекула **превращается в электрический диполь**, ось которого направлена вдоль внешнего поля. На поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные связанные заряды, создающие свое поле направленное навстречу внешнему полю. Так происходит поляризация неполярного диэлектрика.

Примером неполярной молекулы может служить молекула метана  $\text{CH}_4$ . У этой молекулы четырехкратно ионизированный ион углерода  $\text{C}^{4-}$  располагается в центре правильной пирамиды, в вершинах которой находятся ионы водорода  $\text{H}^+$ . При наложении внешнего поля ион углерода смещается из центра пирамиды, и у молекулы возникает дипольный момент, пропорциональный внешнему полю.



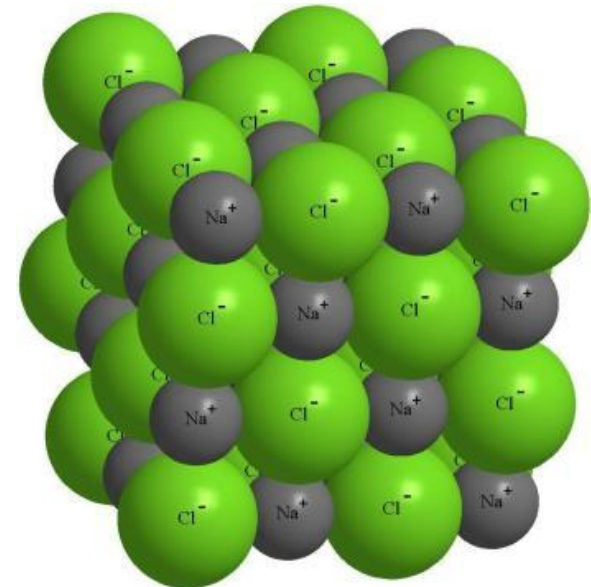


В случае твердых кристаллических диэлектриков наблюдается разновидность деформационной поляризации - так называемая **ионная поляризация**, при которой ионы разных знаков, составляющие кристаллическую решетку, при наложении внешнего поля смещаются в противоположных направлениях, вследствие чего на гранях кристалла появляются связанные (нескомпенсированные) заряды.

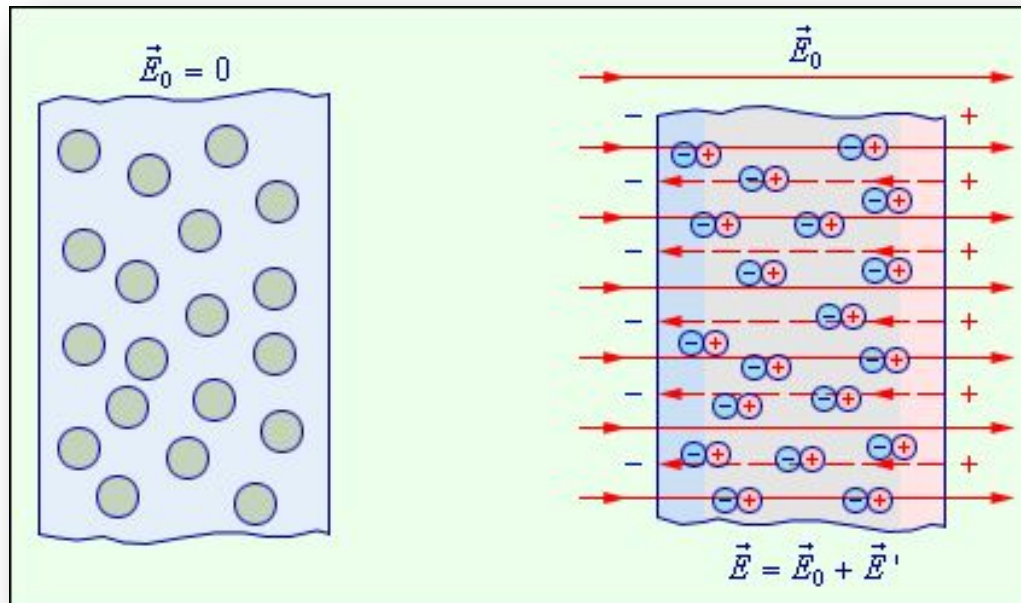
Примером такого механизма может служить поляризация кристалла NaCl, в котором ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  составляют две подрешетки, вложенные друг в друга.

В отсутствие внешнего поля каждая элементарная ячейка кристалла NaCl электронейтральна и не обладает дипольным моментом.

Во внешнем электрическом поле обе подрешетки смещаются в противоположных направлениях, т. е. кристалл поляризуется.



Деформация неполярных молекул под действием внешнего электрического поля не зависит от их теплового движения, поэтому поляризация неполярного диэлектрика не зависит от температуры.



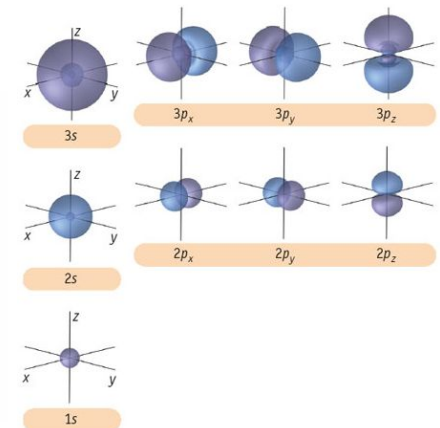
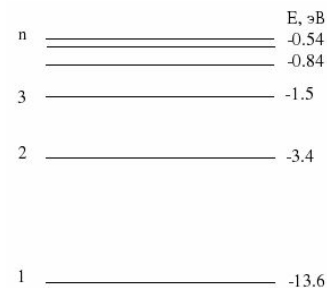
На рисунке видно, что внешнее поле действует на молекулу неполярного диэлектрика, перемещая внутри неё разноимённые заряды в разные стороны, в результате чего эта молекула становится похожей на молекулу полярного диэлектрика, ориентируясь вдоль линий поля.

## Основы зонной теории твердого тела

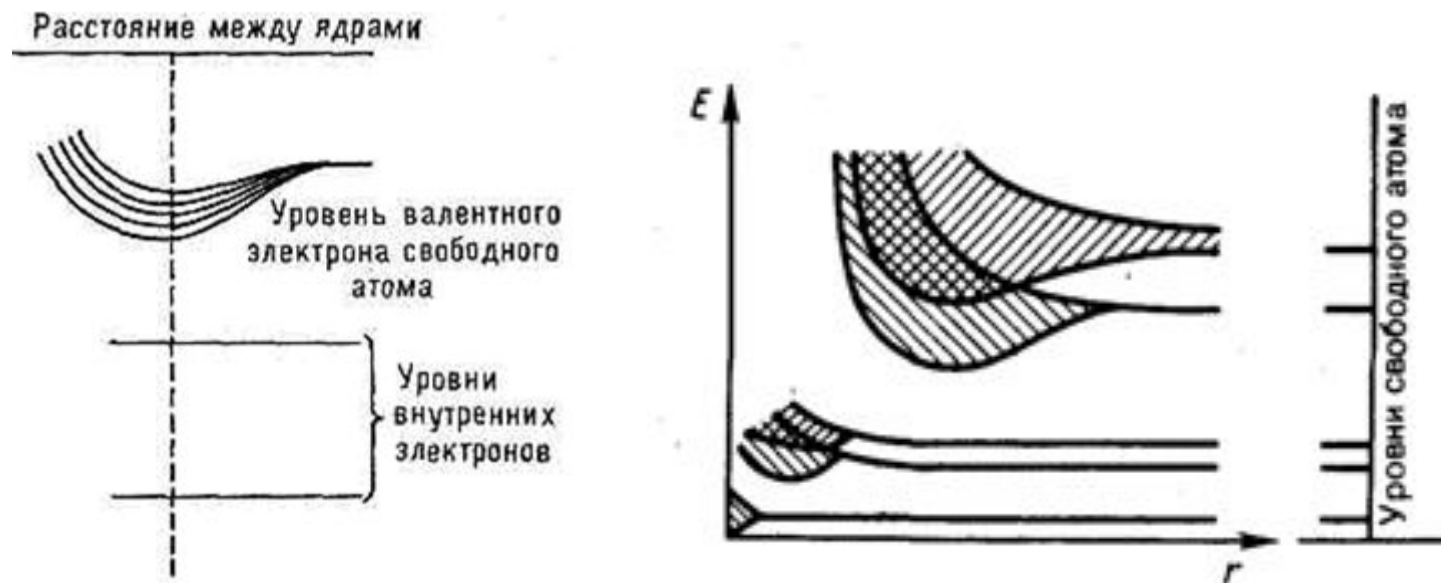
**Зонная теория** — один из основных разделов квантовой теории твердого тела, описывающий движение электронов в кристаллах, и являющийся основой современной теории металлов, полупроводников и диэлектриков.

Энергетический спектр электронов в твердом теле существенно отличается от энергетического спектра свободных электронов (являющегося непрерывным) или спектра электронов, принадлежащих отдельным изолированным атомам (дискретного с определенным набором доступных уровней) — он состоит из отдельных разрешенных энергетических зон, разделенных зонами запрещенных энергий.

Согласно квантово-механическим постулатам Бора, в изолированном атоме энергия электрона может принимать строго дискретные значения (электрон имеет определенную энергию и находится на одной из орбиталей).



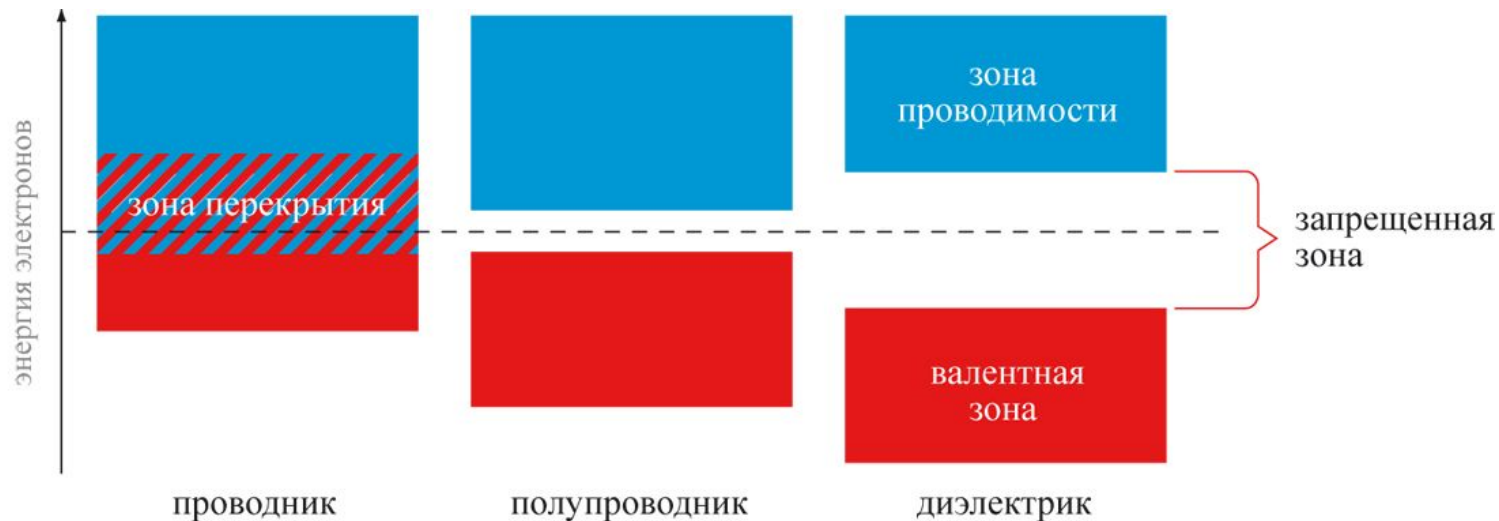
В случае же системы нескольких атомов, объединенных химической связью, электронные уровни энергии расщепляются в количестве, пропорциональном количеству атомов. Мера расщепления определяется взаимодействием электронных оболочек атомов. При дальнейшем увеличении системы до макроскопического уровня, количество уровней становится очень велико, а разница энергий электронов, находящихся на соседних орбиталях, соответственно очень маленькой — энергетические уровни расщепляются до двух практически непрерывных дискретных наборов — энергетических зон.



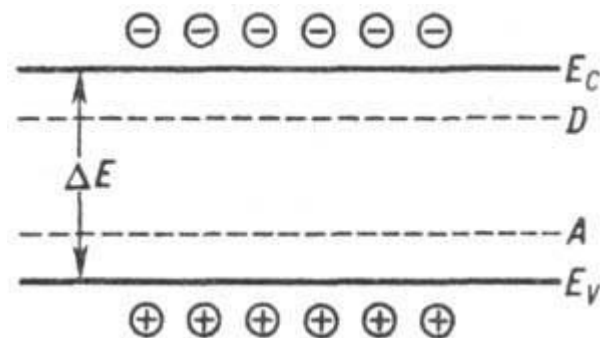
Наивысшая из разрешенных энергетических зон в полупроводниках и диэлектриках, в которой при температуре 0 К все энергетические состояния заняты электронами, называется валентной, следующая за ней — зоной проводимости.

По принципу взаимного расположения этих зон все твердые вещества и делят на три большие группы:

1. **проводники** — материалы, у которых зона проводимости и валентная зона перекрываются (нет энергетического зазора), образуя одну зону, называемую зоной проводимости (таким образом, электрон может свободно перемещаться между ними, получив любую допустимо малую энергию);
2. **диэлектрики** — материалы, у которых зоны не перекрываются и расстояние между ними составляет более 3 эВ (для того, чтобы перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости требуется значительная энергия, поэтому диэлектрики ток практически не проводят);
3. **полупроводники** — материалы, у которых зоны не перекрываются и расстояние между ними (ширина запрещенной зоны) лежит в интервале 0,1–3 эВ (для того, чтобы перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости требуется энергия меньшая, чем для диэлектрика, поэтому чистые полупроводники слабо пропускают ток).



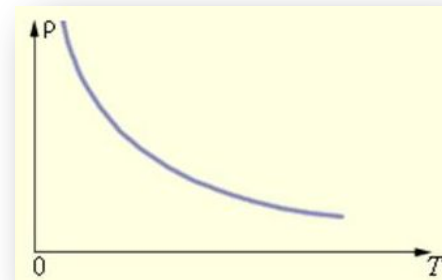
Величина запрещенной зоны (энергетическая щель между зонами валентности и проводимости) является ключевой величиной в зонной теории и определяет оптические и электрические свойства материала. Переход электрона из валентной зоны в зону проводимости называют процессом генерации носителей заряда (отрицательного — электрона, и положительного — дырки), а обратный переход — процессом рекомбинации.



**Полупроводниками** являются вещества, ширина запрещённой зоны которых составляет порядка нескольких электрон-вольт (эВ). Например, алмаз можно отнести к широкозонным полупроводникам, а арсенид индия — к узкозонным.

К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и другие), огромное количество сплавов и химических соединений (арсенид галлия и др.). Самым распространённым в природе полупроводником является кремний, составляющий почти 30 % земной коры.

Полупроводник — материал, который по своей удельной проводимости занимает промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличается от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения. Основным свойством полупроводника является увеличение электрической проводимости с ростом температуры.



Полупроводники характеризуются как свойствами проводников, так и диэлектриков.

В полупроводниковых кристаллах электронам необходимо около  $1-2 \cdot 10^{-19}$  Дж (приблизительно 1 эВ) энергии для высвобождения из атома против  $7-10 \cdot 10^{-19}$  Дж (приблизительно 5 эВ) у диэлектриков, чем и характеризуется основное отличие между полупроводниками и диэлектриками.

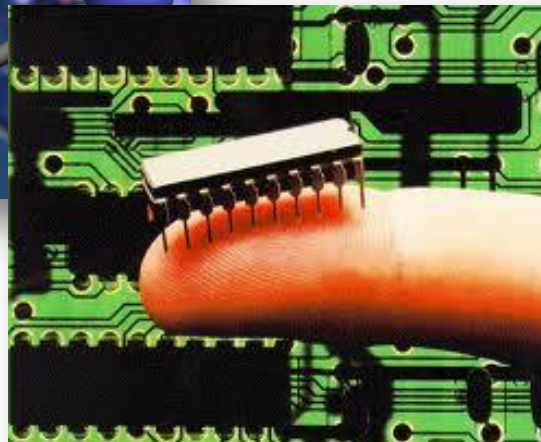
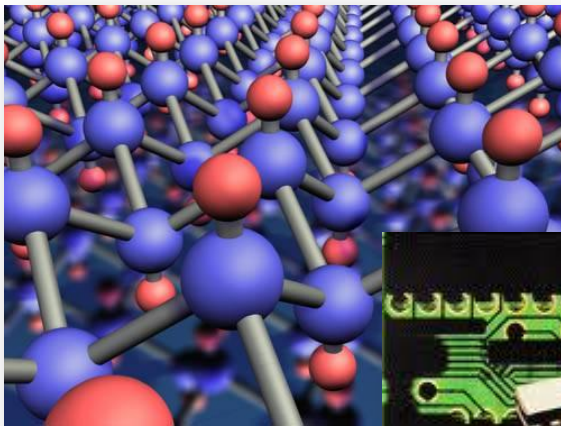
Эта энергия появляется в них при повышении температуры (например, при комнатной температуре уровень энергии теплового движения атомов равняется  $0,4 \cdot 10^{-19}$  Дж), и отдельные электроны получают энергию для отрыва от ядра. Они покидают свои ядра, образуя свободные электроны и дырки.

С ростом температуры число свободных электронов и дырок увеличивается, поэтому в полупроводнике, не содержащем примесей, удельное электрическое сопротивление уменьшается. Условно принято считать полупроводниками элементы с энергией связи электронов меньшей чем 2—3 эВ. Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется у собственных (то есть без примесей) полупроводников. Он называется собственной электрической проводимостью полупроводников.



Вероятность перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости пропорциональна  $(-E_g/kT)$ , где  $E_g$  – ширина запрещённой зоны. При большой величине  $E_g$  (2-3 эВ) эта вероятность оказывается очень малой.

Таким образом, подразделение веществ на металлы и неметаллы имеет вполне определённую основу. В отличие от этого деление неметаллов на полупроводники и диэлектрики такой основы не имеет и является чисто условным.

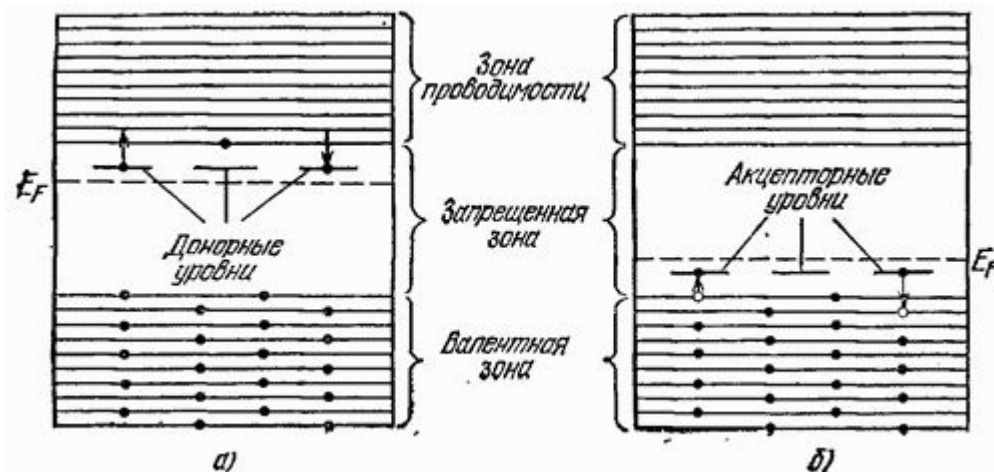


## Собственная и примесная проводимость

Полупроводники, в которых свободные электроны и «дырки» появляются в процессе ионизации атомов, из которых построен весь кристалл, называют полупроводниками с **собственной проводимостью**. В полупроводниках с собственной проводимостью концентрация свободных электронов равняется концентрации «дырок».

## Примесная проводимость

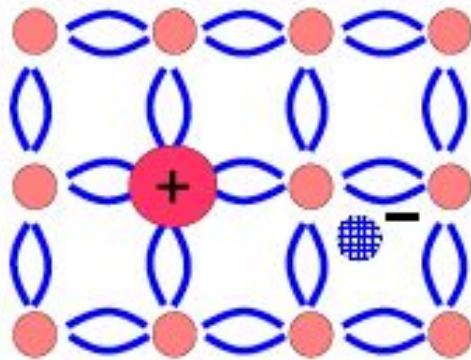
Для создания полупроводниковых приборов часто используют кристаллы с примесной проводимостью. Такие кристаллы изготавливаются с помощью внесения примесей с атомами пятивалентного или трехвалентного химического элемента



## Электронные полупроводники (n-типа)

Термин «n-тип» происходит от слова «negative», обозначающего отрицательный заряд основных носителей.

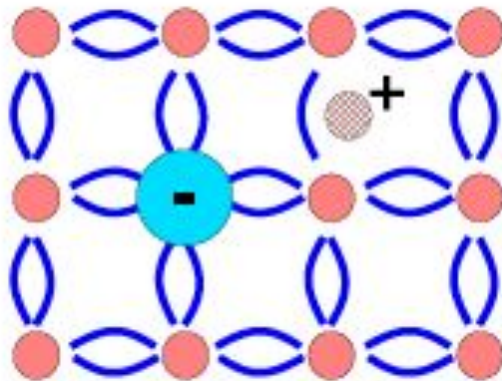
В **четырёхвалентный** полупроводник (например, кремний) добавляют примесь **пятивалентного** полупроводника (например, мышьяка). В процессе взаимодействия каждый атом примеси вступает в ковалентную связь с атомами кремния. Однако для пятого электрона атома мышьяка нет места в насыщенных валентных связях, и он отрывается и превращается в свободный. В данном случае перенос заряда осуществляется электроном, а не дыркой, то есть данный вид полупроводников проводит электрический ток подобно металлам. Примеси, которые добавляют в полупроводники, вследствие чего они превращаются в полупроводники n-типа, называются донорными.

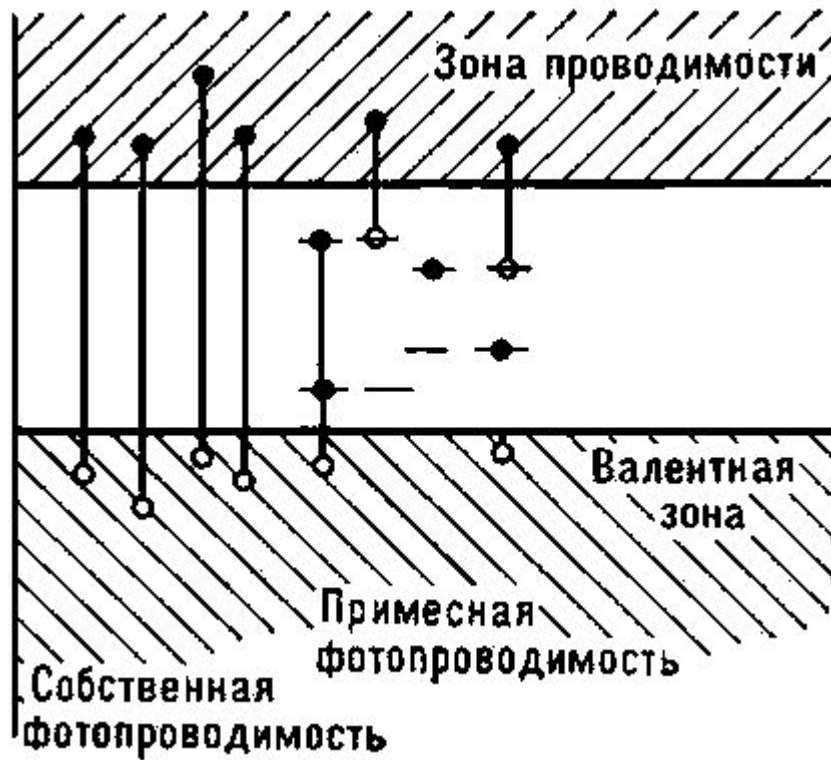


## Дырочные полупроводники (р-типа)

Термин «р-тип» происходит от слова «positive», обозначающего положительный заряд основных носителей. Этот вид полупроводников, кроме примесной основы, характеризуется дырочной природой проводимости.

В **четырёхвалентный** полупроводник (например, в кремний) добавляют небольшое количество атомов **трехвалентного** элемента (например, индия). Каждый атом примеси устанавливает ковалентную связь с тремя соседними атомами кремния. Для установки связи с четвёртым атомом кремния у атома индия нет валентного электрона, поэтому он захватывает валентный электрон из ковалентной связи между соседними атомами кремния и становится отрицательно заряженным ионом, вследствие чего образуется дырка. Примеси, которые добавляют в этом случае, называются акцепторными.





Физические свойства полупроводников наиболее изучены по сравнению с металлами и диэлектриками. В немалой степени этому способствует огромное количество эффектов, которые не могут быть наблюдаемы ни в тех, ни в других веществах, прежде всего связанные с устройством зонной структуры полупроводников, и наличием достаточно узкой запрещённой зоны.

Полупроводниковые соединения делят на несколько типов: **простые полупроводниковые материалы** — собственно химические элементы: бор В, углерод С, германий Ge, кремний Si, селен Se, сера S, сурьма Sb, теллур Те и йод I. Самостоятельное применение широко нашли германий, кремний и селен. Остальные чаще всего применяются в качестве легирующих добавок или в качестве компонентов сложных полупроводниковых материалов. В группу **сложных полупроводниковых материалов** входят химические соединения, обладающие полупроводниковыми свойствами и включающие в себя два, три и более химических элементов.

Конечно же, основным стимулом для изучения полупроводников является производство полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

