

[Радиоматериалы и радиокомпоненты]

[210303.65 «Бытовая радиоэлектронная аппаратура»

210305.65 «Средства радиоэлектронной борьбы» ]

[ИИБС, кафедра Электроники]

[Преподаватель Останин Борис Павлович]

---

# Радиоматериалы и радиокомпоненты

---

## Раздел 1

### Свойства радиоматериалов.

#### Лекция 1

# Электрофизические свойства радиоматериалов

# Общие сведения о строении вещества

Материалы, применяемые в электронной технике, подразделяют на радиоматериалы и конструкционные материалы. Под радиоматериалами понимают материалы, которые определяют параметры и характеристики электронных элементов. Конструкционными материалами называют материалы, которые должны обеспечивать механическую прочность изделий, создаваемых из радиоматериалов.

Электрические и механические свойства любых материалов обусловлены их структурой, которая в свою очередь, определяется структурой электронных оболочек атомов.

По реакции на электрическое поле радиоматериалы делят на проводники (удельное сопротивление  $10^{-4} \dots 10^{-6}$  Ом·см), полупроводники (удельное сопротивление  $10^{-6} \dots 10^{10}$  Ом·см) и диэлектрики (удельное сопротивление  $10^{10} \dots 10^{12}$  Ом·см).

По реакции на магнитное поле различают магнитные и немагнитные материалы

Вещество состоит из молекул. Молекулы состоят из атомов. Вещество состоит из атомов. Вещество может находиться в газообразном, жидком и твёрдом состоянии.

## Структура электронных оболочек атомов

Современная физика рассматривает атомы как частицы, состоящие из положительно заряженных ядер, окружённых электронными оболочками. Электроны относятся к категории микрочастиц. Которым присущ принцип дуализма, то есть они обладают как свойствами частицы, так и свойствами волны. Ни видеть, ни осязать электроны нельзя. Поэтому, изучая их, приходится пользоваться моделями и абстракциями. Простейшей наглядной моделью, является модель Нильса Бора, в которой электроны уподобляются шарикам, вращающимся вокруг ядра по определённым орбитам. С точки зрения квантовой физики такое представление ошибочно, так как микрочастица не может одновременно обладать определёнными значениями координаты и импульса. Поэтому понятие траектории для микрочастицы теряет смысл. Квантовая механика в состоянии предсказать лишь вероятность нахождения электрона в данной точке пространства. Эта вероятность представляет собой «усреднённую» картину поведения электрона, что позволяет представить электрон в виде облака, которое называют *орбиталью*.

**Пример.** Если в атоме водорода, удаляясь от ядра, проследить вероятность нахождения электрона, то окажется, что у самого ядра она равна нулю, потом возрастает, достигая максимального значения на расстоянии  $0,53 \cdot 10^{-8}$  см от ядра, а затем постепенно убывает. Расстояние  $r = 0,53 \cdot 10^{-8}$  см условно принимают за радиус орбиты электрона в атоме водорода, а сам электрон рассматривают в виде шарика массой  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг и зарядом  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Количество вращающихся вокруг ядра электронов определяется порядковым номером химического элемента в периодической системе Дмитрия Ивановича Менделеева: в атоме водорода – один электрон, в атоме гелия – два электрона и так далее.

Движение электронов вокруг ядра происходит по строго определённым орбитам так, что на длине орбиты укладывается целое число волн. Эти волны называют волнами Де Бройля. При данном условии на длине орбиты образуется стоячая волна и не происходит излучения электромагнитной энергии. В противном случае электрон будет терять свою энергию, радиус орбиты станет уменьшаться и в результате электрон окажется притянутым к ядру. Для получения стоячей волны должно выполняться условие

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{mv}$$

где  $r$  – радиус орбиты электрона,

$n = 1, 2, 3, \dots$ ,

$\lambda$  - длина волны,

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  эВ · с - постоянная Планка

$m$  – масса электрона,

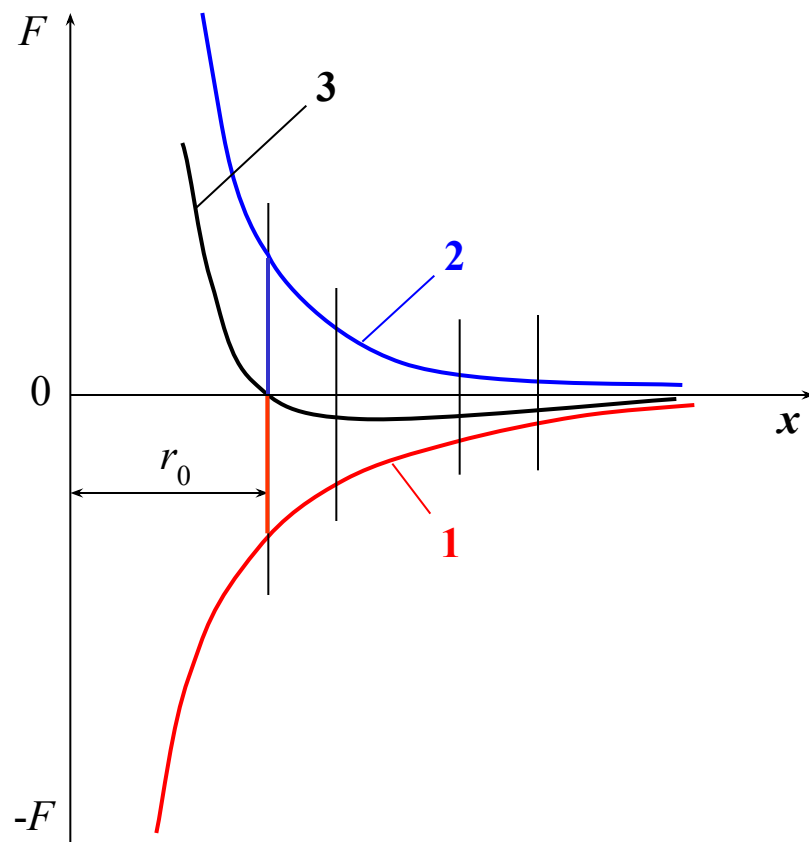
$v$  - скорость движения электрона по орбите.

Путём внешнего энергетического воздействия (нагрев, облучение и т. п.) электрон может быть переведён на более удалённую орбиту. Такое состояние атома называется возбуждённым и является неустойчивым. В любом атоме электроны стремятся занять наиболее низкие уровни, поэтому спустя некоторое время электрон вернётся на первоначальную орбиту, выделив при этом квант энергии, равный разности соответствующих энергетических уровней.

В многоэлектронных атомах потенциальная энергия электрона зависит не только от его расстояния до ядра, но и от расстояний до каждого из остальных электронов, вследствие чего численные значения радиусов орбит и, соответственно, величины энергии не совпадают с численными значениями радиусов и энергии для атома водорода. Вращение электронов в этих атомах может происходить как по круговым, так и по эллиптическим орбитам. Движение электрона по круговой орбите соответствует сферическому электронному облаку, а движение по эллиптической орбите – облаку в форме гантели. При этом электроны стремятся занять наиболее низкие энергетические уровни, но при условии, что на каждом уровне находится не более двух электронов (принцип Паули). Чем больше электронов в атоме, тем более высокие энергетические уровни они занимают.

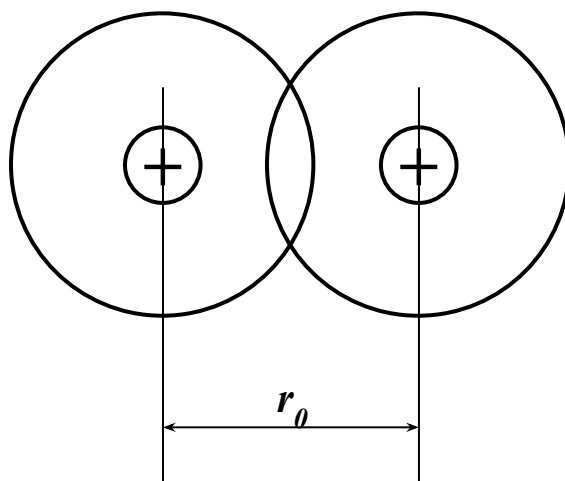
## Химическая связь между атомами

Под химической связью понимают взаимодействие между атомами, в результате которого образуются молекулы и твёрдые тела. Химическая связь осуществляется посредством электронов, находящихся на внешних, не полностью занятых электронных оболочках. Эти электроны называют валентными. Независимо от природы сил, возникающих при сближении частиц, характер взаимодействия между атомами остаётся одинаковым: на относительно больших расстояниях действуют силы притяжения  $F_{np}$  быстро увеличивающиеся с уменьшением расстояния  $x$  (кривая 1); на небольших расстояниях возникают силы отталкивания  $F_{от}$ , которые с уменьшением расстояния увеличиваются гораздо быстрее, чем  $F_{np}$  (кривая 2). На расстоянии  $x = r_0$  силы отталкивания уравновешивают силы притяжения и результирующая сила взаимодействия  $F$  обращается в нуль (кривая 3). Состояние частиц, сближенных на расстояние  $r_0$ , является состоянием равновесия.

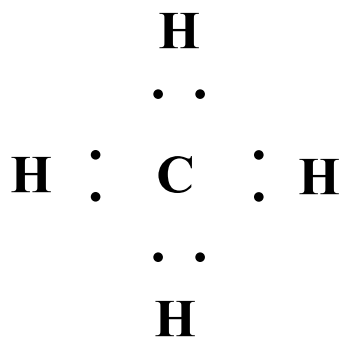


## Существует несколько видов химических связей

*Ковалентная связь.* Возникает в результате перекрытия электронных облаков отдельных атомов при их сближении, вследствие чего возрастает плотность отрицательного заряда в межъядерном пространстве, что приводит к появлению сил притяжения, уравнивающих силы взаимного отталкивания между ядрами. Перекрытие электронных оболочек сближающихся атомов приводит к обобществлению электронов. Электроны принадлежат теперь одновременно нескольким атомам.



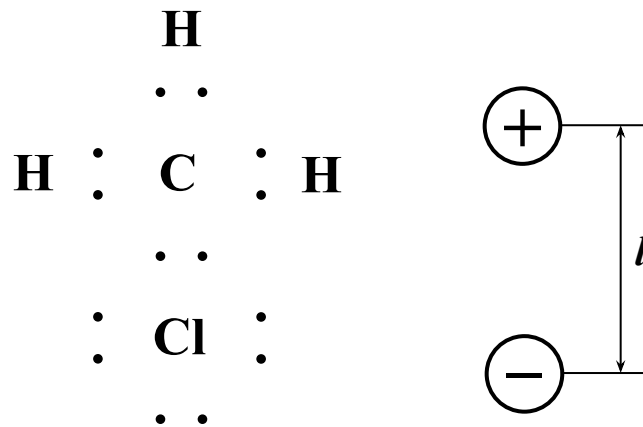
Если молекула симметричная, то она неполярная. В таких молекулах центры положительных и отрицательных зарядов совпадают.



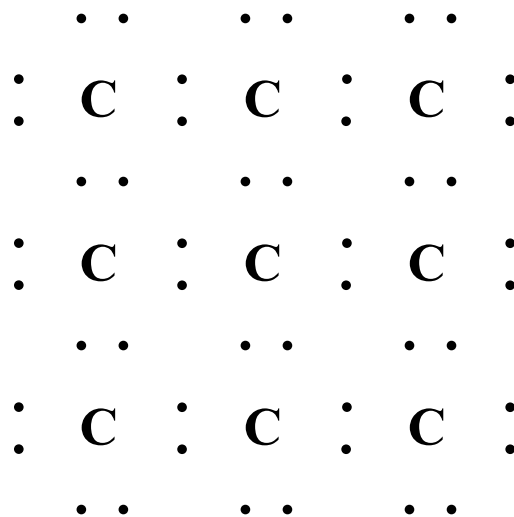
В полярных молекулах центры положительных и отрицательных зарядов находятся на некотором расстоянии  $l$  друг от друга. В результате чего появляется дипольный момент  $m$ .

$$m = ql$$

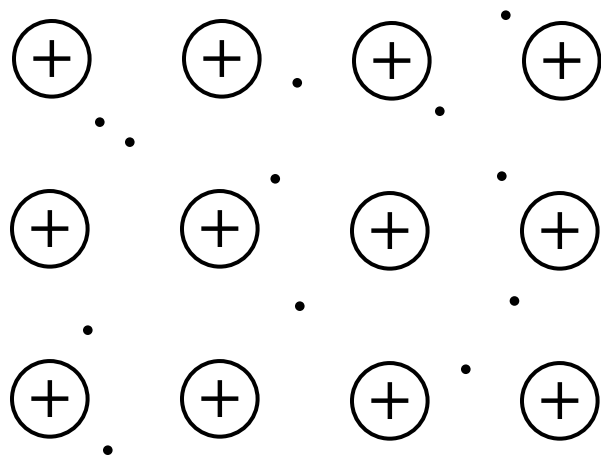
где  $q$  – заряд электрона.



Ковалентная связь типична для органических молекул. Вместе с тем она может иметь место и в твёрдых веществах. Примером могут служить атомы алмаза, кремния и германия, которые входят в четвёртую группу периодической системы элементов. Они имеют валентность, равную четырём, и в твёрдом теле образуют структуру, в которой каждый атом связан ковалентными связями с четырьмя ближайшими своими соседями.



*Металлическая связь* возникает между атомами с небольшим числом валентных электронов, что характерно для металлов. При сближении таких атомов, как и при ковалентной связи, происходит перекрывание электронных оболочек и обобществление валентных электронов с той лишь разницей, что обобществлённые электроны не локализуются вблизи своих атомов, а свободно перемещаются между атомами, образуя «электронный газ». При этом атомы, отдавшие свои электроны, превращаются в положительные ионы, силы отталкивания между которыми уравниваются силами притяжения между ионами и электронами. В результате такой связи образуется кристаллическая структура, в которой атомы металла находятся на строго определённом расстоянии друг от друга в среде коллективизированных электронов.



*Ионная связь* возникает между атомами металлов, имеющих на внешней орбите один электрон, и атомами металлоидов, имеющими на внешней орбите семь электронов. В этом случае при сближении атомов происходит переход валентных электронов от металлического атома к металлоидному атому, в результате чего образуются разноимённые ионы, между которыми возникает электростатическое притяжение (например, NaCl). В таких кристаллах каждый ион связан с шестью ионами противоположного знака.

*Молекулярная связь* возникает между молекулами с ковалентным характером внутримолекулярного взаимодействия. За счёт молекулярных связей образуется твёрдое состояние инертных газов, водорода, кислорода, азота. Молекулярная связь легко разрушается тепловым движением.

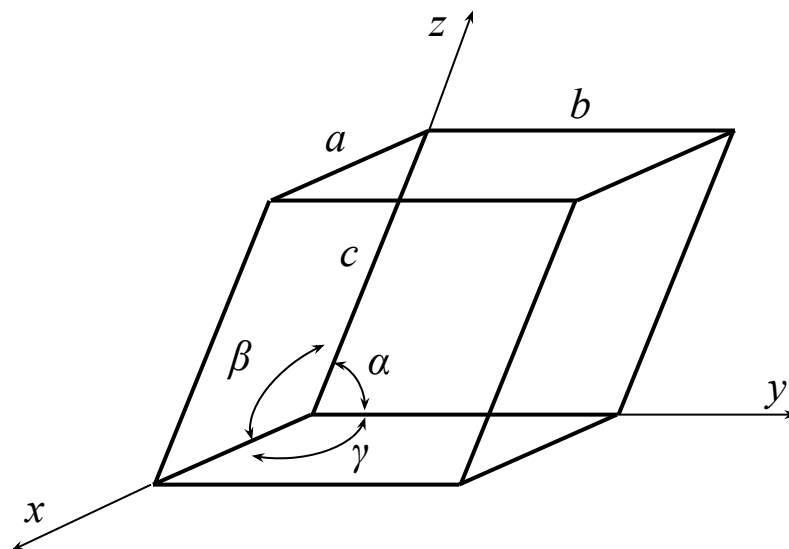
## ***Структура твёрдых тел***

Существует две разновидности твёрдых тел: аморфная и кристаллическая. Аморфные тела характеризуются хаотическим расположением частиц (атомов, ионов, молекул). В кристаллических телах частицы расположены строго упорядоченно, на определённом расстоянии друг от друга, образуя пространственную кристаллическую решётку. Частицы, расположенные в узлах кристаллической решётки, не могут покидать состояние равновесия, так как при удалении от этих положений появляются силы, стремящиеся вернуть их обратно. Единственной формой движения этих частиц, являются беспорядочные колебания около положения равновесия. Энергия такого колебания квантована. Порцию энергии тепловых колебаний называют *фононом*.

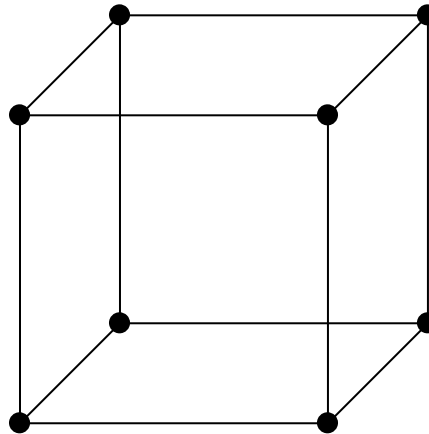
Кристаллические тела могут существовать в виде отдельных кристаллов (монокристаллы) или же состоять из отдельных зёрен (поликристаллы). В поликристаллах в пределах каждого зерна частицы расположены периодически, но при переходе от одного зерна к другому на границах раздела эта периодичность нарушается.

Монокристаллы обладают анизотропией, то есть их механические, физические, тепловые и другие свойства различны в разных направлениях. Поликристаллы изотропны, т.е. их свойства одинаковы во всех направлениях.

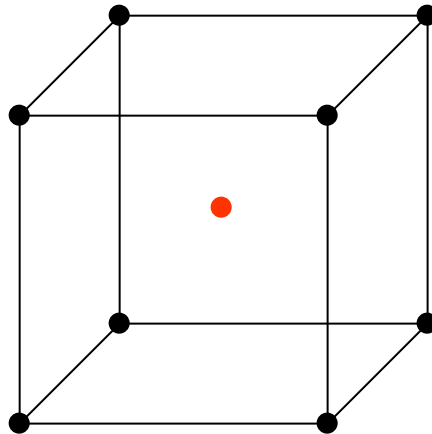
Кристаллические тела состоят из одинаковых многогранников. Каждый такой многогранник называется элементарной ячейкой кристалла. Элементарные ячейки характеризуются длиной рёбер  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , называемых постоянными решётки, и углами между рёбрами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , совпадающие с рёбрами называются кристаллографическими осями. За начало координат выбирают один из узлов решётки.



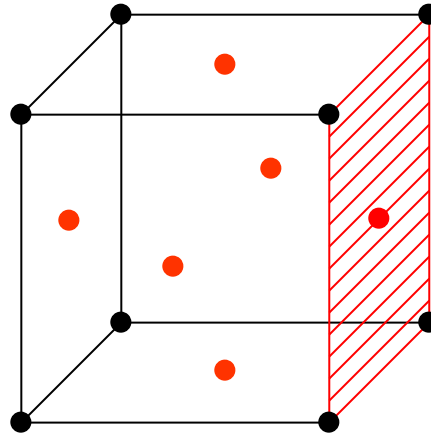
Если  $a = b = c$  и  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ , то такая решётка называется кубической. Кубические решётки имеют три разновидности. В простой кристаллической решётке восемь атомов расположены в вершинах куба.



В объёмноцентрированной решётке помимо восьми атомов, расположенных в вершинах куба, имеется девятый атом в центре куба.



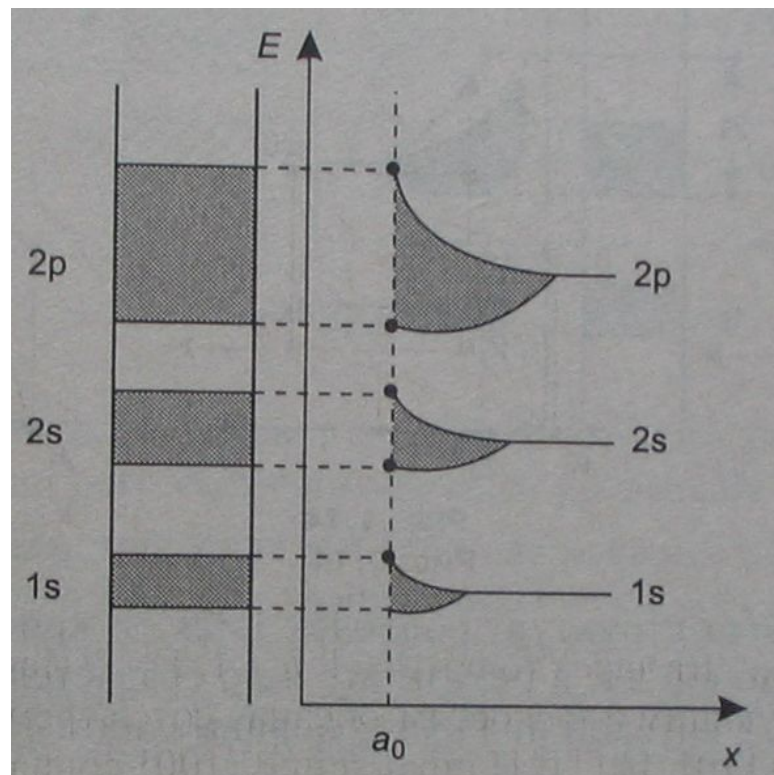
В гранецентрированной решетке атом внутри куба отсутствует, но появляются атомы в центрах всех граней.



Кристаллические решётки кремния и германия состоят из двух гранецентрированных решеток, сдвинутых друг относительно друга на одну четверть диагонали куба.

## **Основные понятия зонной теории**

В изолированном атоме электроны способны занимать лишь дискретные энергетические уровни, определяемые силами притяжения к ядру и силами отталкивания от других электронов. В твёрдом теле атомы расположены настолько близко друг к другу, что между ними возникают новые силы взаимодействия – это силы отталкивания между ядрами и между электронами соседних атомов и силы притяжения между всеми ядрами и всеми электронами. Под действием этих сил энергетические состояния в атомах изменяются: энергия одних электронов увеличивается других - уменьшается. В результате вместо дискретных уровней изолированного атома образуются энергетические зоны, состоящие из близко расположенных энергетических уровней, плотность которых возрастает по мере удаления от краёв зоны по параболическому закону, достигая максимума в середине зоны. По мере сближения атомов сначала расщепляются самые высокие энергетические уровни, затем по мере сближения атомов – более низкие.



При сближении атомов на расстояние  $a_0$  образуется устойчивая кристаллическая структура, которой соответствует энергетическая диаграмма, показанная в левой части рисунка. Разрешённые зоны отделены друг от друга запрещёнными зонами, в которых отсутствуют разрешённые уровни. Ширина разрешённых зон по мере перемещения вверх по энергетической шкале возрастает, а ширина запрещённых зон соответственно уменьшается. Во многих случаях может иметь место перекрытие разрешённых энергетических зон. Подобно энергетическим уровням в изолированных атомах энергетические зоны могут быть полностью заполненными электронами, частично заполненными и свободными. Всё зависит от структуры электронных оболочек изолированных атомов и межатомных расстояний в кристалле. Внутренние оболочки изолированных атомов полностью заполнены электронами, поэтому соответствующие им зоны также оказываются заполненными. Самую верхнюю из зон, частично или полностью заполненную электронами, называют валентной зоной, а ближайшую к ней незаполненную электронами – зоной проводимости. Взаимное положение этих зон зависит от структуры оболочек изолированных атомов и определяет большинство процессов в твёрдом теле.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Укажите отличие радиоматериалов от конструкционных материалов.
2. Укажите, чем обусловлены электрические и механические свойства любых материалов.
3. Укажите различия между проводниками, полупроводниками и диэлектриками.
4. Укажите виды химических связей между атомами.
5. Укажите разновидности твёрдых тел.