

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

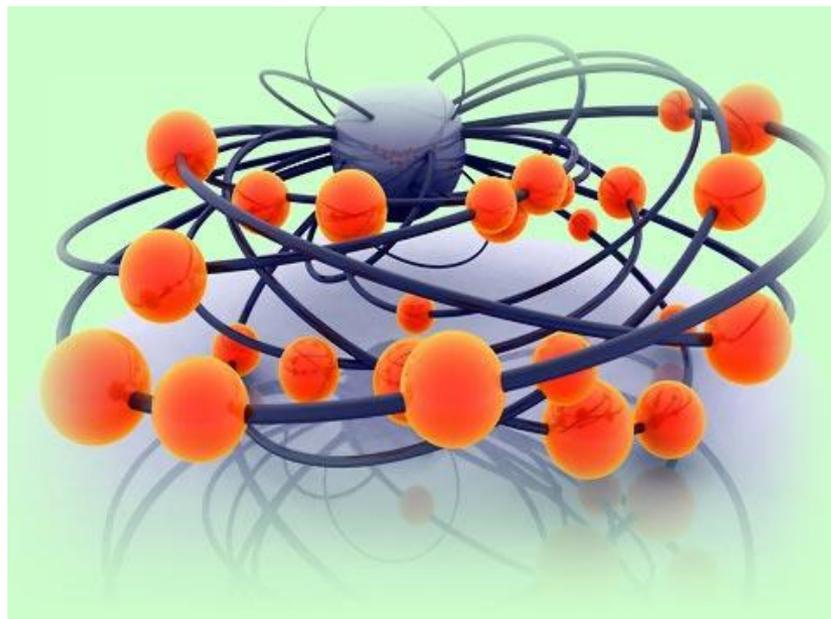


© 2022 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

# Объем курса

- ❖ лекции: 24 часа;
- ❖ лабораторные работы: 16 часа;
- ❖ практические занятия: 24 часов.



# Рейтинг - план

Контрольная неделя, модуль	Лекции		Лабораторные работы		Оформление ИДЗ		Практические занятия		Экзамен	Максимальный суммарный балл модуля
	Тема (раздел)	Балл	Тема (раздел)	Балл	Тема (цикл)	Балл	Тема	Балл		
1	2	3	4	5	8	9	10	11	12	13
I 1 – 4 недели	Магнитные материалы Контрольная работа № 1	0,75  6	Цикл «Магнитные материалы»	3	Цикл «Магнитные материалы»	1	Входное тестирование Решение ИДЗ Решение задач Семинар	3 2 2 2		19,75
II 5 – 6 недели	Проводниковые материалы Контрольная работа № 2	0,5  6	Цикл «Проводниковые материалы»	6	Цикл «Проводниковые материалы»	2	Решение ИДЗ Решение задач Семинар	4 1 2		21,5
III 7 – 12 недели	Полупроводниковые материалы Контрольная работа № 3	0,5  6	Цикл «Полупроводниковые материалы»	3			Решение задач Семинар	1 2		12,5
IV 12 – 18 недели	Диэлектрические материалы Контрольная работа № 4	1,25  9	Цикл «Диэлектрические материалы»	9	Цикл «Диэлектрические материалы»	1	Решение ИДЗ Решение задач Семинар	2 2 2		26,25
	Экзамен									20
ИТОГО		30		21		12		25	20	100

**ЭТМ - всего 100 баллов**

**Посещение лекций (12 шт) + конспект – 3 балла**

**Контрольные работы (4 шт) – 27 баллов (6+6+6+9 баллов соответственно)**

**Входное тестирование (1 шт) – 3 балла**

**Индивидуальные задания (12 шт) – 12 баллов (3 балла за 1 работу)**

**Решение задач по темам ЛК (3 шт) – 6 баллов (0,5 баллов за 1 задачу)**

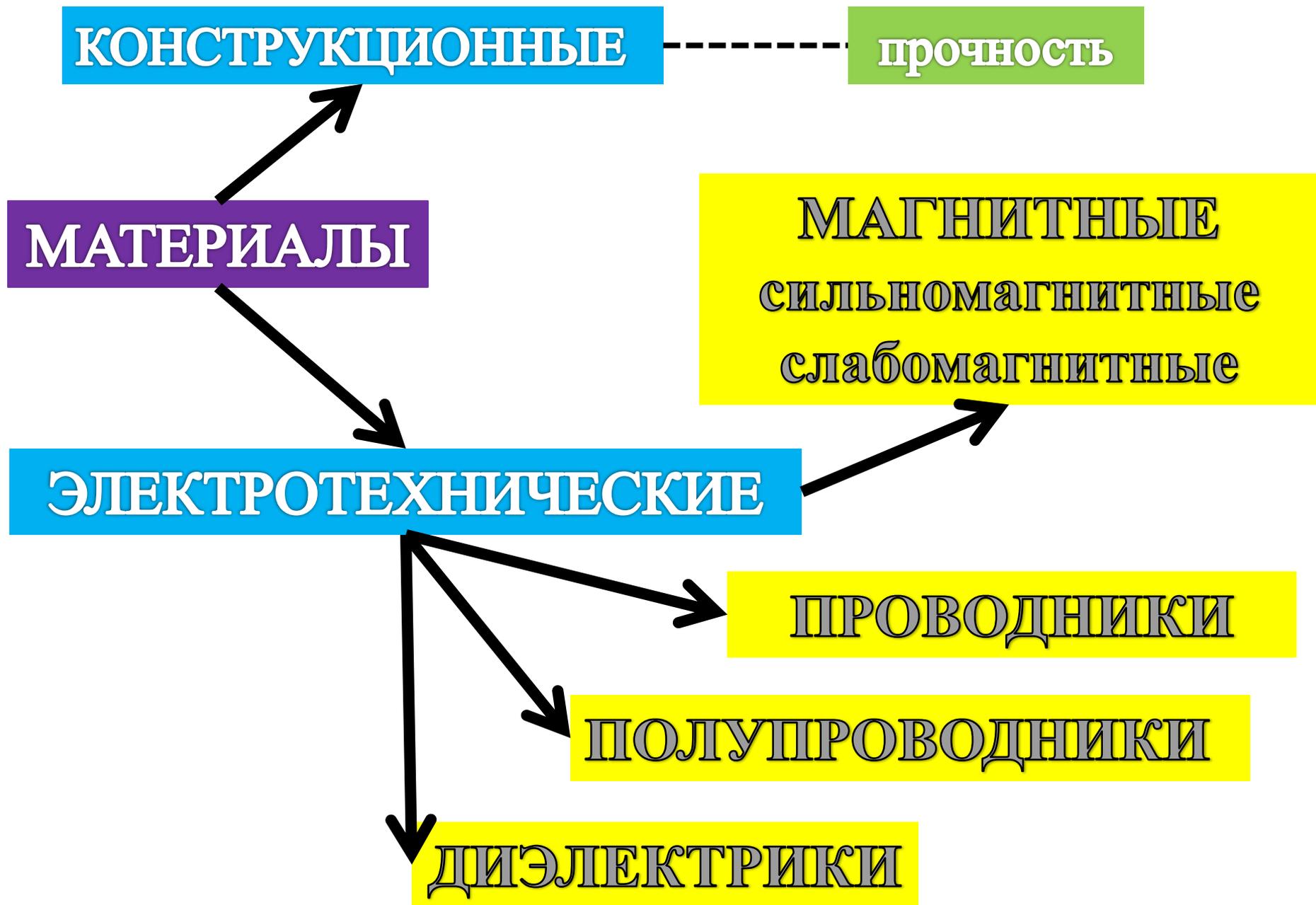
**Семинары (4 шт) – 8 баллов (2 балла за 1 семинар)**

**Лабораторные работы (7 шт) – 21 балл (3 балла за 1 работу)**

**Экзамен – 20 баллов (min за семестр 35 баллов, сданы и защищены все ЛР и ИДЗ)**

# Литература

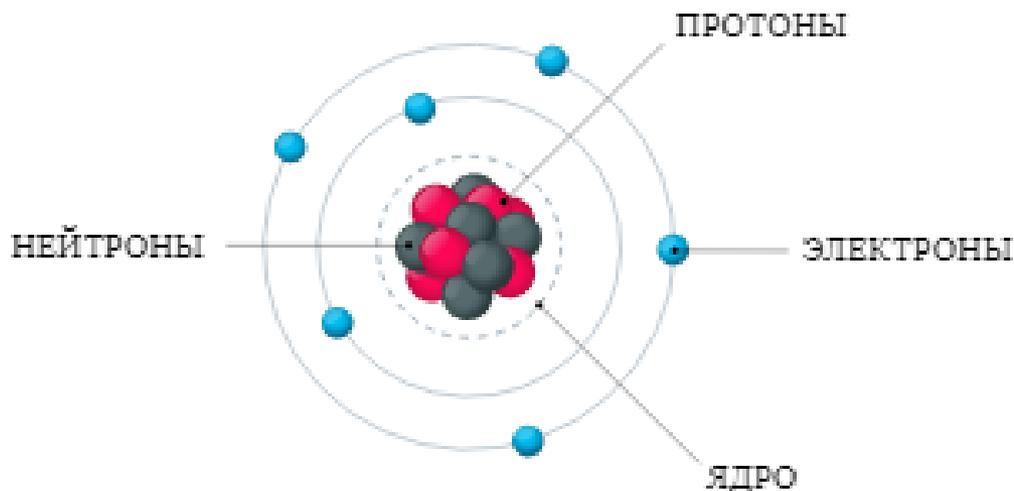
- Дудкин А. Н. Электротехническое материаловедение: учебное пособие [Электронный ресурс] / Дудкин А.Н., Ким В.С. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. — 200 с. — Книга из коллекции Лань — Инженерно-технические науки. — ISBN 978-5-8114-2275-3. — Схема доступа: <https://e.lanbook.com/book/96677>.
- Справочник по электротехническим материалам в 3 т.: / под ред. Ю. В. Корицкого. — 3-е изд., перераб. — Москва: 1986-1988. Т. 1 . — 1986. — 368 с.
- Справочник по электротехническим материалам в 3 т.: / под ред. Ю. В. Корицкого. — 3-е изд., перераб. — Ленинград : 1986-1988. Т. 2 . — 1987. — 464 с.
- Справочник по электротехническим материалам в 3 т.: / под ред. Ю. В. Корицкого. — 3-е изд., перераб. — Ленинград : 1986-1988. Т. 3 . — 1988. — 728 с.: ил.. — ISBN 5283044165.



- **Конструкционные материалы** используются для изготовления вспомогательных деталей и эл-в электротех. изделий, воспринимающих, как правило, **механические нагрузки**.
- **Электротехнические материалы** характеризуются определенными свойствами по отношению к электромаг. полям и применяются в технике с учетом этих свойств.
  - По поведению **в магнитном поле** материалы подразделяются на **сильномагнитные** и **слабромагнитные** (немагнитные).
  - По поведению **в электрическом поле** материалы подразделяются на **проводниковые, полупроводниковые** и **диэлектрические**.

# Элементарные частицы вещества

- протоны (+) + нейтроны (0) = ядро атома (+)
- ядро (+) + электроны (-) = атом (0)
- атом (0) + атом (0) + ... = молекула (0)
- атом/молекула (0)  $\pm$  электроны (-) = ион ( $\pm$ )



# Агрегатные состояния вещества

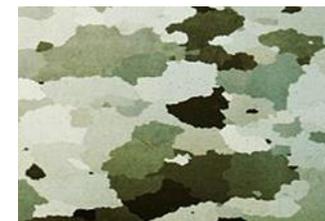
- **ГАЗООБРАЗНОЕ**
- **ЖИДКОЕ**
- **ТВЁРДОЕ:**
  - *монокристаллическое;*
  - *поликристаллическое;*
  - *аморфное (стекло);*
  - *смешанное (полимеры, ситаллы)*



- **Монокристаллы** – это однородные анизотропные тела, которые характеризуются правильным порядком в расположении атомов во всем объеме. Они состоят из периодически повторяющихся одинаковых кристаллических ячеек.



- **Поликристаллы** – это материалы, которые состоят из большого числа сросшихся друг с другом мелких кристаллических зерен (кристаллитов), хаотически ориентированных в разных направлениях.



В электротехнике используют и **четвертое** состояние вещества – **плазму**, возникающую при воздействии на газ сильных эл. полей.

- **Аморфные материалы** характеризуются отсутствием строго упорядоченного расположения атомов; это затвердевшие жидкости, которые образуются за счет понижения температуры при сравнительно быстром повышении вязкости.



- **Смешанные (аморфно-кристаллические) материалы** – это частично закристаллизованные аморфные вещества:



- многие **полимеры**;
- стекла определенных составов при выдержке при повышенных температурах начинают кристаллизоваться, образуется **ситалл**.



# Виды связей в веществе

## ХИМИЧЕСКИЕ

энергия  $\sim 10^2$  кДж/моль:

- Ионная
- Ковалентная полярная
- Ковалентная неполярная
- Металлическая

## МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫЕ

- Силы Ван-Дер-Ваальса  
 $\sim 0,1 \div 1$  кДж/моль
- Водородная  
 $\sim 10 \div 50$  кДж/моль

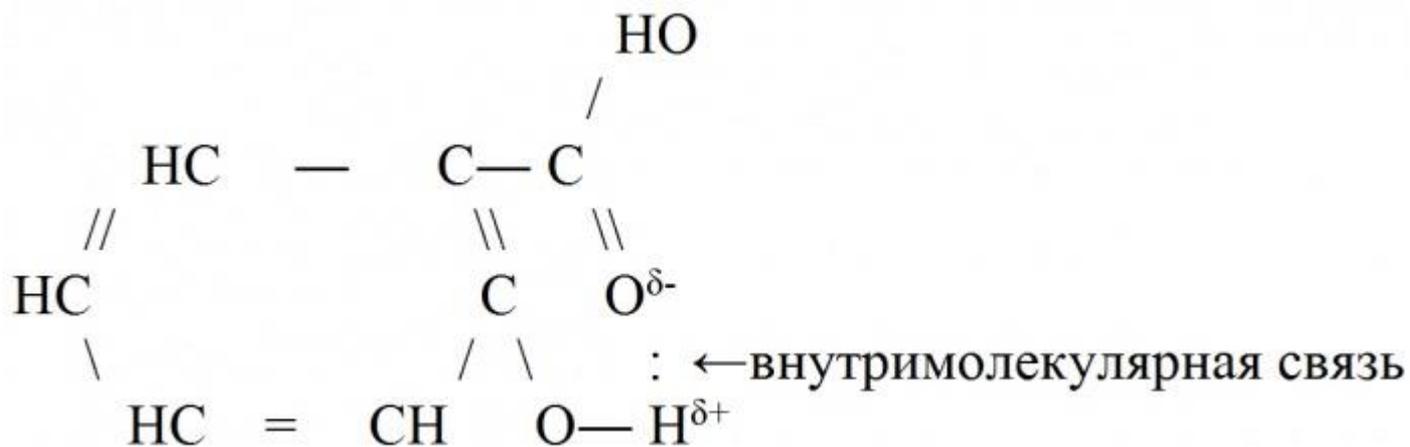
- **Ионная связь** обусловлена кулоновским притяжением противоположно заряженных ионов. Этот вид связи наиболее характерен для неорганических диэлектриков, имеющих в своем составе ионы противоположных знаков, например,  $Na^+ - Cl^-$ ,  $Li^+ - F^-$ .
- **Ковалентная (атомная) связь** обусловлена образованием обобществленных (общих пар) валентных электронов по одному от каждого атома; образуется в том направлении, в котором расположена наибольшая плотность объединенных электронов.

**Ковалентная неполярная связь** образуется между атомами одного химического элемента. **Ковалентная полярная связь** образуется между различными атомами неметаллов.

- **Металлическая связь** обусловлена взаимодействием между положительно заряженными ионами металла, образовавшихся за счет потери (отрыва) электронов и этими коллективизированными электронами («электронным газом»).
- **Молекулярная связь** или **силы Ван-Дер-Ваальса** обусловлена электростатическим диполь – дипольным взаимодействием между молекулами, которое возникает в результате неоднородного распределения заряда электронов вокруг ядер.

**«Электронный газ»** оказывает цементирующее действие на кристаллическую структуру металлов и обуславливает их *высокую электропроводность, теплопроводность и пластичность.*

- **Водородная связь** осуществляется через ион водорода (протон), расположенный между двумя ионами ( $O^-$ ,  $F^-$ ,  $Cl^-$ ) соседних молекул. Водородная связь реализуется в воде  $H_2O$ , некоторых органических соединениях и в кристаллах типа дигидрофосфата калия  $KH_2PO_4$ .



**Электрический ток** – направленное движение свободных носителей заряда (с.н.з.)  $q$  в электрическом поле напряженностью  $E$  [В/м].

**Плотность тока  $j$**  – суммарный электрический заряд, переносимый в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной  $E$ .

$$j = q \cdot n \cdot v_d = q \cdot n \cdot \mu \cdot E = \gamma \cdot E$$

(дифференциальная форма закона Ома)

$n$  – **концентрация** с.н.з. [ $\text{м}^{-3}$ ];

$\mu$  – **подвижность** с.н.з. [ $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ];

$v_d = \mu \cdot E$  – средняя **дрейфовая скорость** с.н.з.

$$\gamma = q \cdot n \cdot \mu \quad [\text{См/м}, 1 \text{См} = \text{Ом}^{-1}]$$

*удельная электрическая проводимость*

$$\rho = 1/\gamma \quad [\text{Ом} \cdot \text{м}]$$

*удельное электрическое сопротивление*

*$\rho$  и  $\gamma$  характеризуют электрические свойства материала*

Обычно относят:

к *проводникам* вещества с  $\rho < 10^{-5} \text{Ом} \cdot \text{м}$ ;

к *полупроводникам* – с  $\rho \sim 10^{-6} - 10^9 \text{Ом} \cdot \text{м}$ ;

к *диэлектрикам* – с  $\rho > 10^7 \text{Ом} \cdot \text{м}$ .

- **Проводниковыми** называют материалы, основным эл. св-м которых является **сильно выраженная** по сравнению с др. материалами **электропроводность**.
- **Полупроводниковыми** называют материалы, отлич. способ-ю которых яв-ся **исключительно сильная зависимость удельной проводимости** от концентрации и вида примесей, а также от внешних энергетических воздействий (теплового, эл., радиац. и др).
- **Диэлектрическими** называют материалы, основным эл. св-м которых является **способность к поляризации** и в которых **возможно сущ-е эл. поля**.

**Проводимость  $G$  [См] и сопротивление  $R$  [Ом]** однородного изотропного образца *зависят от его геометрии*, а значит **не являются** характеристикой материала:

$$G = 1/R = \gamma \cdot \Delta = \Delta / \rho$$

$\Delta$  – геометрический параметр.

**Например:**

Для цилиндра длиной  $\ell$ , сечением  $S$  :

$\Delta = S/\ell$  (токоведущая жила кабеля, диэлектрик плоского конденсатора).

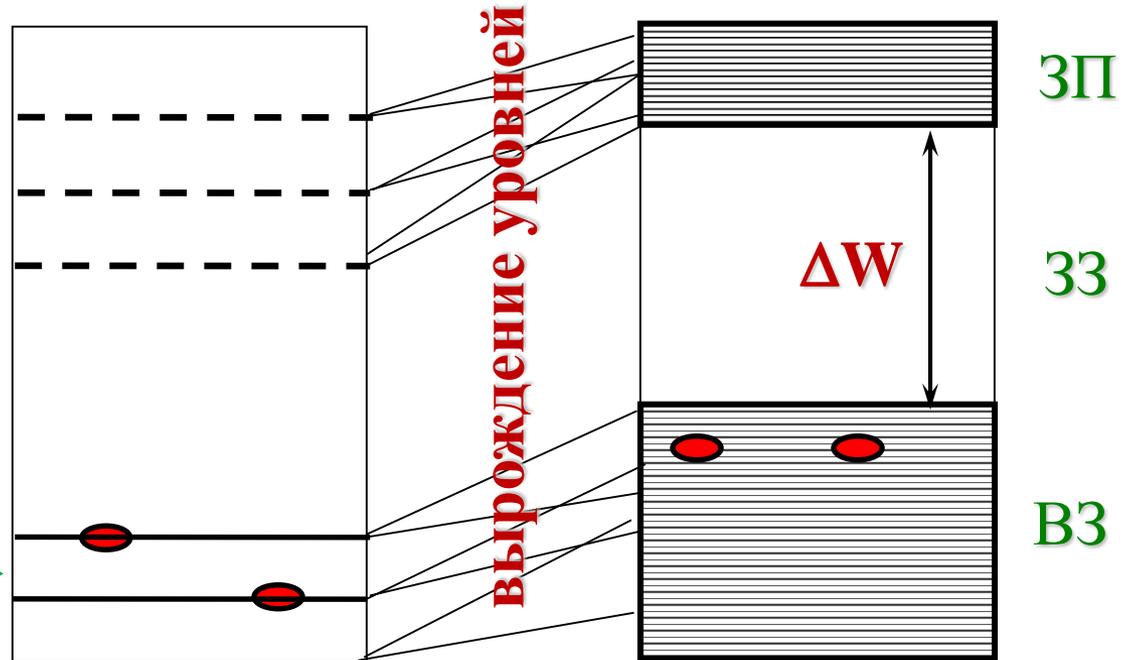
Для цилиндра с внешним и внутренним диаметрами  $D$  и  $d$  и осевой длиной  $\ell$  :

$\Delta = 2\pi\ell / \ln(D/d)$  (диэлектрик цилиндрического конденсатора, изоляция коаксиального кабеля).

# ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ

Возбуждённые  
(неустойчивые)  
энергетические  
уровни

Энергетические  
уровни  
основного  
состояния  
(устойчивые)



**линейчатый спектр  
излучения атома**

**зонная  
структура  
твёрдого тела**

*Вырождение энергетических уровней* - существование двух или более стационарных состояний квантовой системы (атома, молекулы) с одинаковыми значениями энергии.

- В нормальном ***невозбужденном состоянии*** атома часть уровней заполнена электронами, находящимися в ***устойчивом состоянии***.
- При ***возбуждении*** атома внешними энергетическими воздействиями часть электронов переходит на более высокие (возбуждённые) энергетические уровни. Эти уровни ***не являются устойчивыми***.

- Возвращаясь в устойчивые состояния, электрон *отдает свою энергию* в виде *кванта излучения*, равного:

$$\Delta W = W_1 - W_2 = h\nu,$$

где  $W_1$  – энергия возбужденного состояния электрона;  
 $W_2$  – энергия невозбуждённого состояния электрона;  
 $h$  – постоянная Планка, равная  
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с,  $\nu$  – частота излучения.

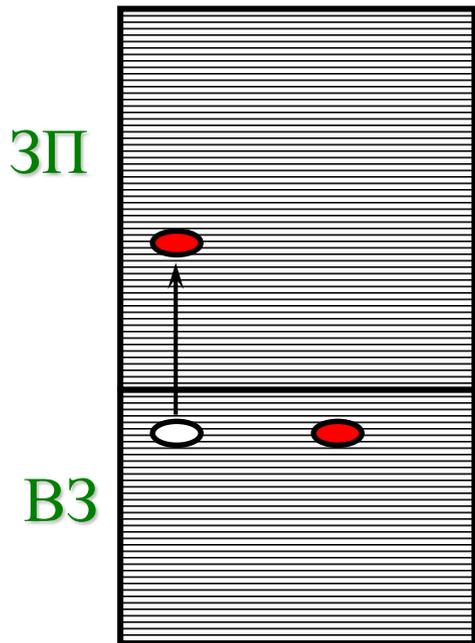
- Если же вещество находится в **конденсированном** (т.е. в жидком или твердом) агрегатном состоянии, имеет место **взаимодействие атомов**. В результате **взаимодействия** линейные уровни валентных электронов сливаются в непрерывный спектр энергий: **валентную зону (ВЗ)**.
- А **незанятые разрешённые уровни** возбуждённых состояний объединяются в **зону проводимости (ЗП)**.
- У **неметаллических** материалов эти зоны разделены **запрещённой зоной (ЗЗ)**, т.е. интервалом энергий, запрещённых для электронов. В **металлах запрещённая зона отсутствует**.

# Классификация материалов согласно зонной теории

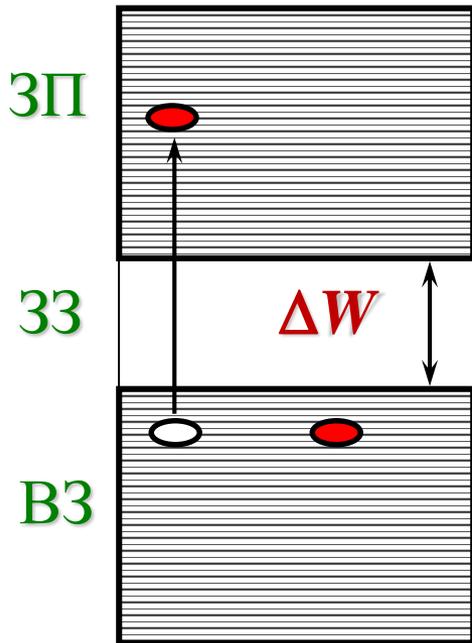
проводники

полупроводники

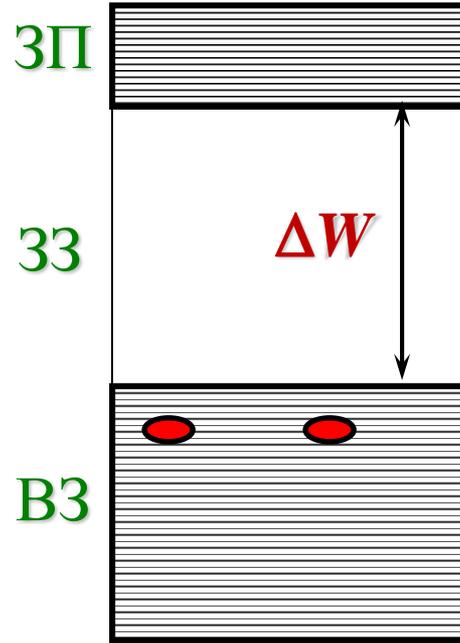
диэлектрики



$\Delta W = 0$



$\Delta W$  до 3эВ



$\Delta W$  выше 3эВ

Металлы

Неметаллы

металлическая

ионная, ковалентная или

связь

смешанная связь

- Внешние (валентные) электроны атомов *неметаллического вещества*, находящиеся на уровнях заполненной **ВЗ**, участвуют в *образовании химической связи* и *не могут переносить заряд* и создавать эл. ток в веществе.
- Они могут стать свободными и принять участие в электропроводности, перейдя через **ЗЗ** и попав в **ЗП** только *получив извне порцию энергии  $\Delta W$* , равную ширине **ЗЗ**.

- Поэтому в обычных условиях *проводимость* веществ, имеющих *большое значение*  $\Delta W$ , *мала*. Такие вещества получили названия *диэлектриков*, у них  $\Delta W > 3$  эВ.
- У *полупроводников*  $\Delta W < 3$  эВ, поэтому даже небольшие внешние энерг. воздействия (нагрев, облучение, эл. поле и т.д.) *способны перебрасывать* часть эл-в из заполненной **ВЗ** в **ЗП**.
- *Металлическая связь проводников* приводит к тому, что в металлах и сплавах **ВЗ** перекрывается с **ЗП**, поэтому *проводимость велика*.

- **Зонная структура** материала зависит от строения образующих его атомов и от типа связи между ними. Кристаллическая структура также оказывает влияние.
- Например, **углерод** в структуре **алмаза** – очень **хороший диэлектрик** ( $\Delta W=5,2$  эВ), а в структуре **графита** обладает **металлическими** свойствами.



- Между **проводниками** и **диэлектриками** существует *качественное различие*, которое выражается в *наличии или отсутствии ЗЗ*.
- Между **диэлектриками** и **полупроводниками** существует *лишь количественное, довольно условное, различие* в *ширине ЗЗ*.

