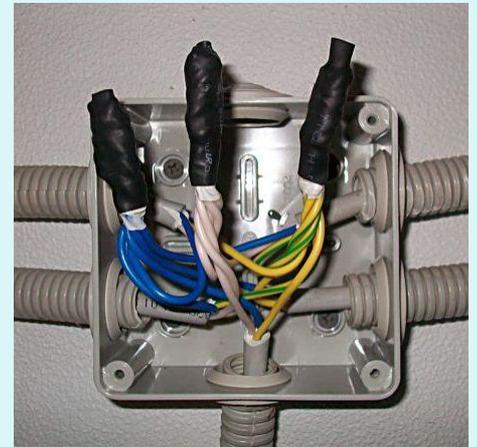
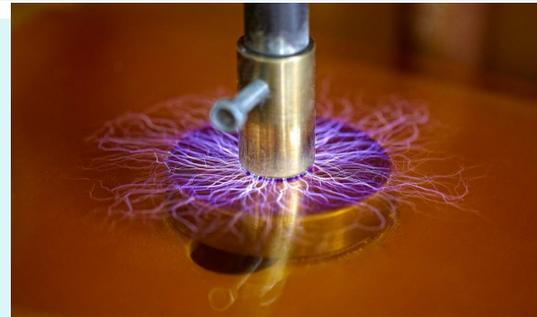


Дисциплина:

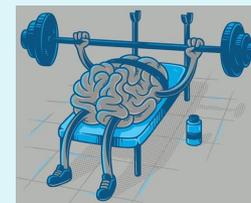
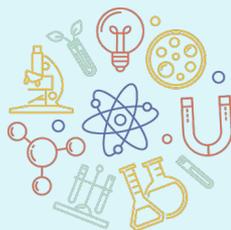
# Электротехнические материалы и материаловедение



# Фоминых Антон Анатольевич



Зав. кафедрой, к.т.н., доцент  
Кафедра электрических машин и  
аппаратов (8-302)



Тел.: 49-29-49  
[aa\\_fominyh@vyatsu.ru](mailto:aa_fominyh@vyatsu.ru)

**Материаловедение - наука, занимающаяся изучением состава, структуры, свойств материалов, поведением материалов при различных воздействиях: тепловых, электрических, магнитных и т.д.**

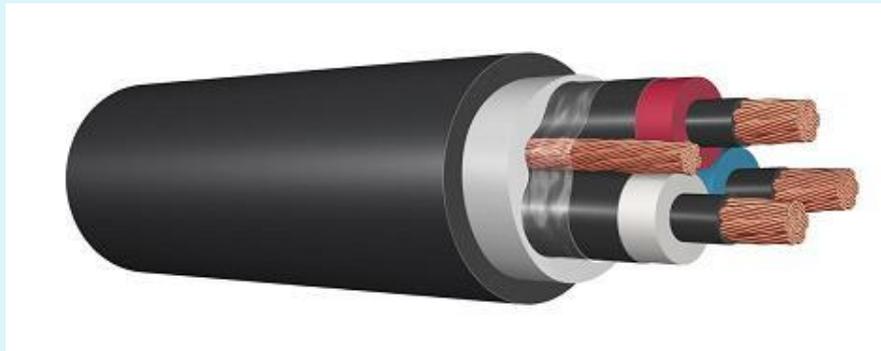
**ЭТМ - это раздел материаловедения, который занимается материалами для электротехники и энергетики, т.е. материалами, обладающими специф. свойствами, необходимыми для:**

- конструирования;**
- производства;**
- эксплуатации ЭО.**

# Цель дисциплины:



- Изучение основ строения материалов, физики явлений в проводниковых, полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалах;
- Получение знаний о технологии производства важнейших ЭТМ и их применение.



# Литература по курсу ЭТМ:



1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2007. - 535 с.
2. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. Высшая школа, 2003;
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.Б. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985;

# Лекция №1

Введение. Предмет и содержание курса.  
Классификация ЭТМ по свойствам и областям применения. Роль ЭТМ в развитии энергетики

При конструировании изделий необходимо учитывать  
разноплановые характеристики материала:

## Механические характеристики

(плотность и вес материала, прочность на сжатие, разрыв или изгиб);

## Теплофизические характеристики

(теплопроводность, теплоемкость, нагревостойкость, теплостойкость и  
горючесть)

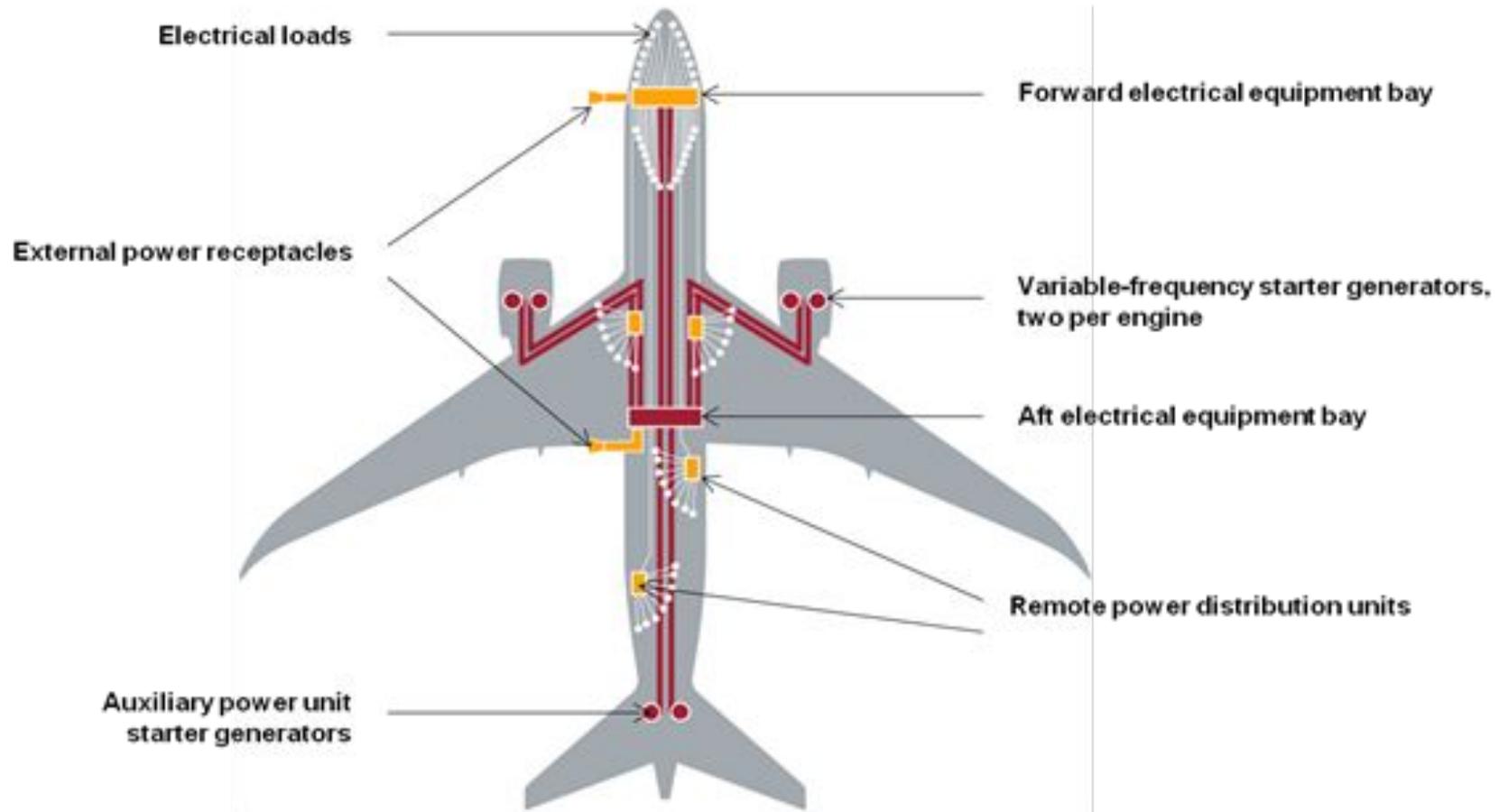
## Электрофизические характеристики

(диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая  
прочность, трекинговость)

## Физико-химические характеристики

химическая стойкость, влагопроницаемость

# Электросистема самолета Boeing 787



Длина проводки примерно 70 миль (112 км)

# Электросистема самолета Boeing 787



**Материал - это объект обладающий определенным составом, структурой и свойствами, с для выполнения определенных функций.**

**Функции материалов:**

- 1) обеспечение протекания тока - проводн. мат.;
- 2) сохранение определенной формы при мех. нагрузках – конструкц. мат.;
- 3) обеспечение непротекания тока, изоляция - в диэлектрических мат.;
- 4) превращение электрической энергии в тепловую - в резистивных материалах.

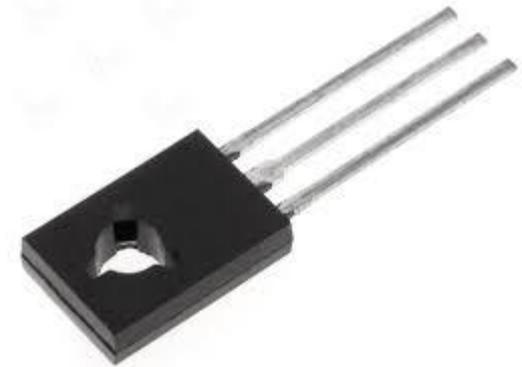
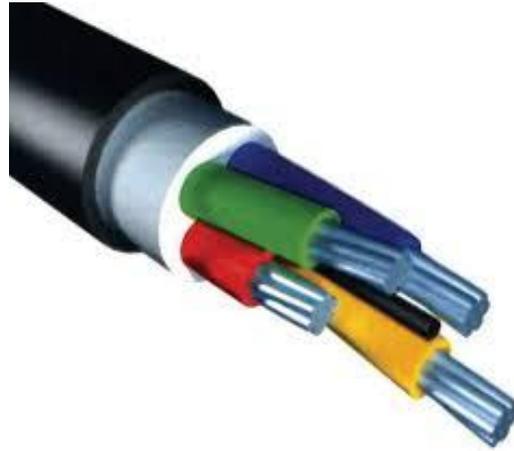
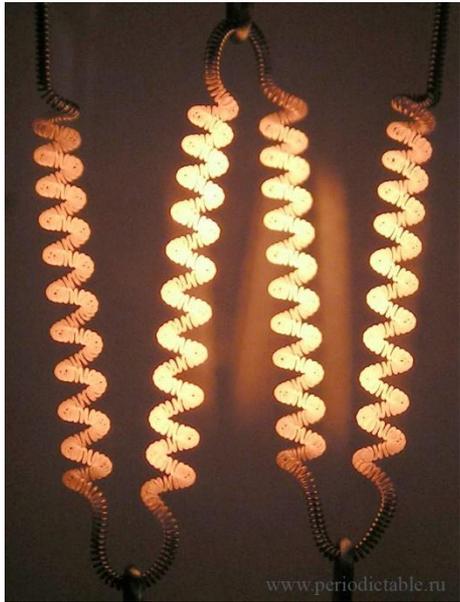
Диэлектрики - основные материалы для изоляции токоведущих частей электрооборудования. Они включают в себя такие типы электрической изоляции, как:

- Воздух в ЛЭП
- Масла в трансформаторах



- Твердые диэлектрики в изоляторах воздушных линий



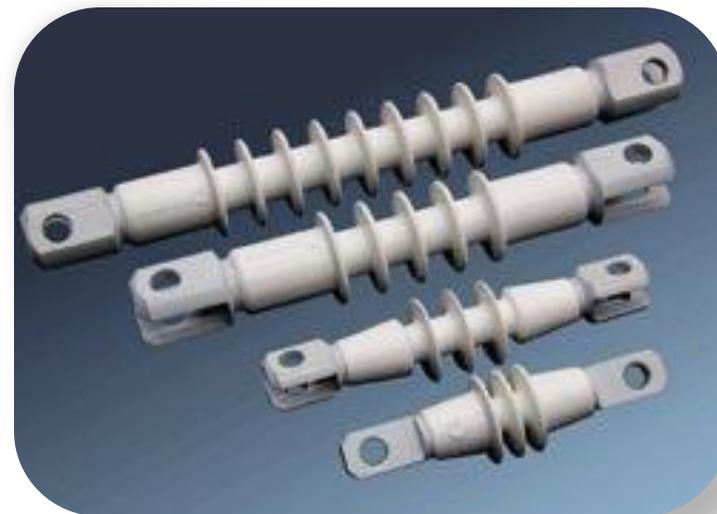




Фарфор

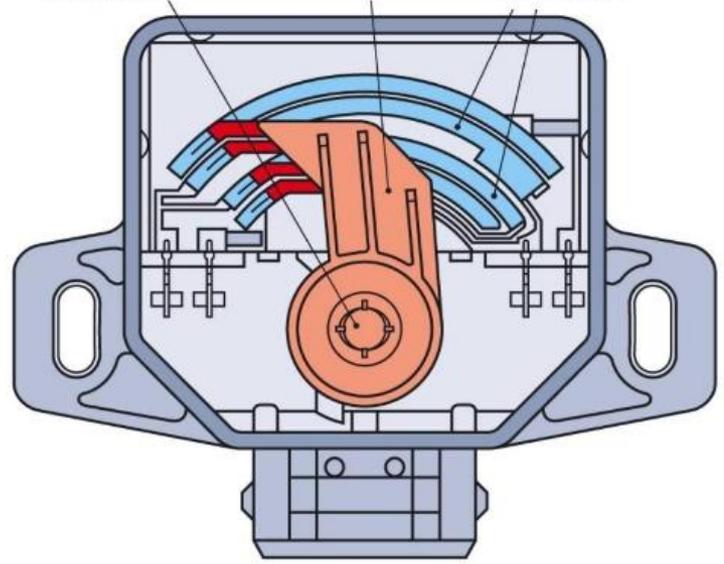


Стекло

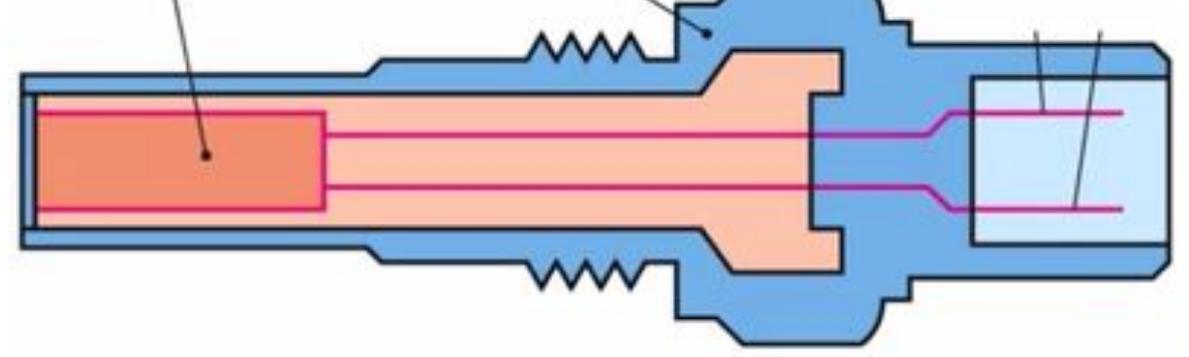


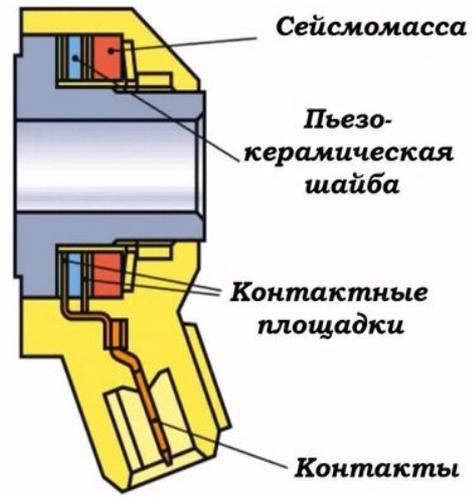
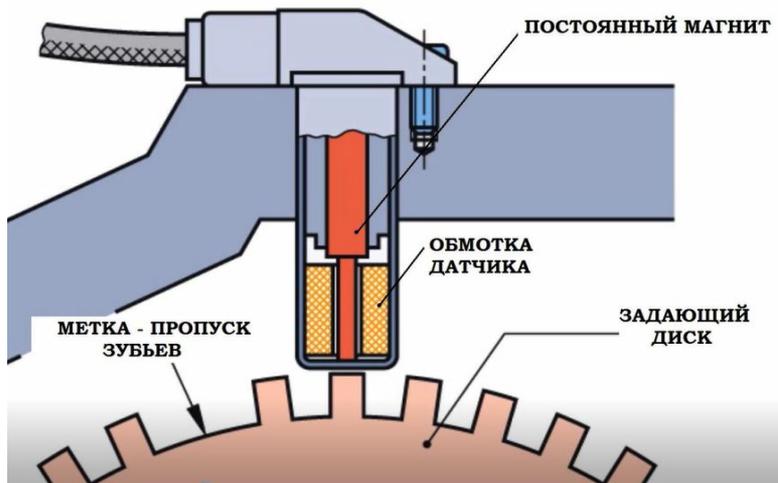
Кремнийорганическая  
резина

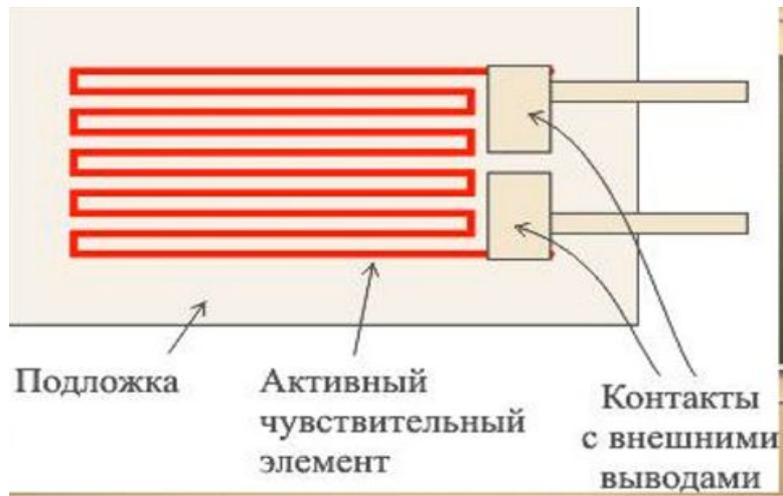
ОСЬ ДРОССЕЛЬНОЙ  
ЗАСЛОНКИ      ПОЛЗУНОК      РЕЗИСТИВНЫЕ  
ДОРՈՂКИ



ТЕРМОРЕЗИСТОР      КОРПУС  
ДАТЧИКА      ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
КОНТАКТЫ







По статистике **доля отказов турбогенераторов** по причине **неисправности узлов токосъема** составляет **26% (1 место)**

**Основная причина** - **неравномерное распределение тока по параллельно работающим щеткам**



Турбогенератор мощностью 320 МВт

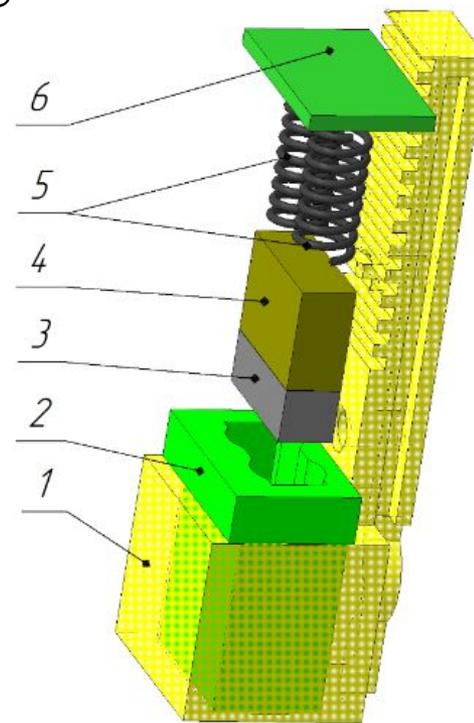
# Щеткодержатель для подачи твердой смазки

Разработка регулируемого узла подачи твердой смазки в зону контакта, который позволит повысить надежность, ресурс работы и долговечность турбогенераторов за счет устранения неравномерности распределе

Комплектность для оборудования 1  
турбогенератора – 56 шт.

Стоимость комплекта – 100 000 руб.

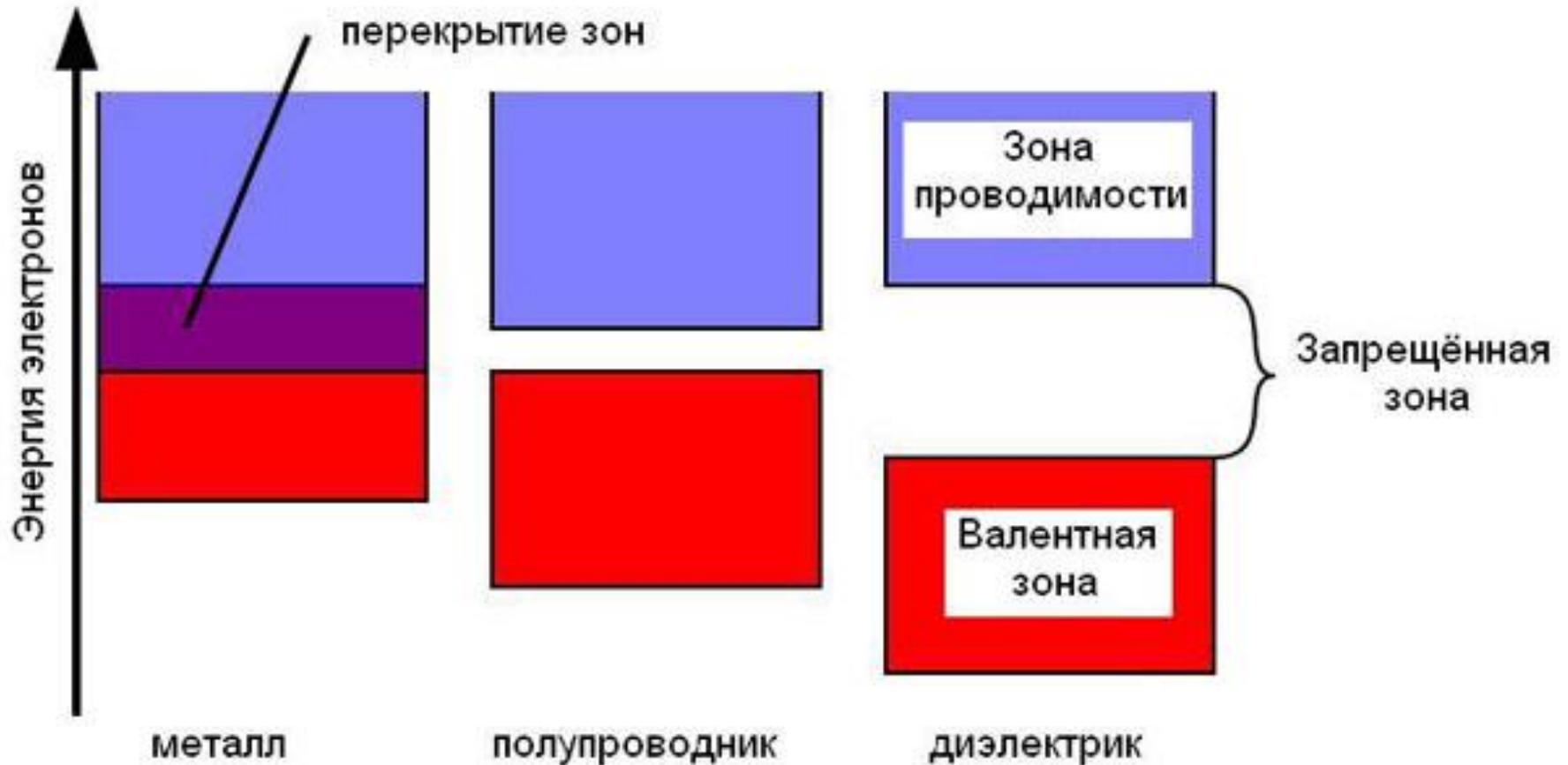
Себестоимость комплекта – 56 000  
руб.



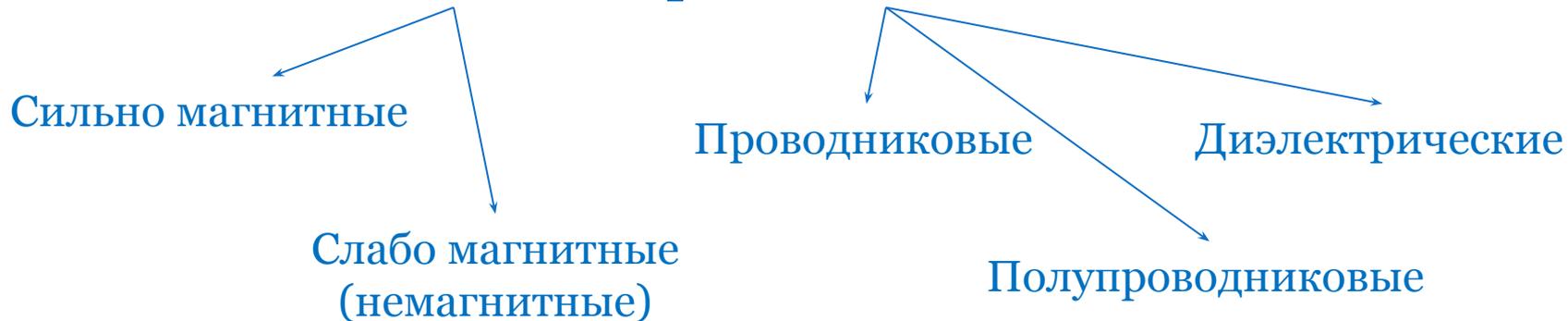
Вариант узла для  
турбогенератора ТВВ - 320



# Классификация ЭТМ в соответствии с зонной теорией электропроводности:



# Классификация ЭТМ:



Диэлектрические	Полупроводниковые	Проводниковые
Значения их удельного сопротивления находятся в соответствующих пределах		
$\rho = 10^8 - 10^{18} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\rho = 10^{-2} - 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\rho = 10^{-4} - 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Ширина запрещенной зоны (энергия активации)		
$W \leq 8 \cdot \text{эВ}$	$W = 0.05 - 3 \cdot \text{эВ}$	$W = 0 \cdot \text{эВ}$

## Основные электрические характеристики ЭТМ:

1.  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость.

2.  $\rho_v; \rho_s$  – удельные сопротивления.

3.  $\delta$  и  $\operatorname{tg}\delta$  – угол диэлектрических потерь.

4.  $E_{np}$  – напряжённость пробоя (электрическая прочность).

## Классификация ЭТМ по магнитным свойствам:

$$\mu = \frac{B}{H} [\Gamma/M]$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\Gamma/M]$$

$\mu$

– абсолютная магнитная проницаемость;

$B [Bб/M^2]$

– магнитная индукция;

$H [A/M]$

– напряжённость магнитного поля;

$\mu_r$

– относительная магнитная проницаемость;

$\mu_0$

– магнитная постоянная

По величине  $\mu$  материалы делятся на виды:

### 1. Диамагнетики

$$\mu < 1$$

Инертные газы, водород, органические соединения,  
*Cu, Zn, Au, Bi, Ga, Ag и др.*

Значение  $\mu$  не  
зависит от напряженности  
внешнего магнитного поля.

### 2. Парамагнетики

$$\mu > 1$$

Соли *Fe, Ni, Co*; кислород, окись азота, *Al, Pt* и др.

Значение  $\mu$  не  
зависит от напряженности  
внешнего магнитного поля.

### 3. Магнитные материалы

$$\mu \gg 1$$

*Fe, Ni, Co*; сплавы на их основе; ферриты различного состава.

Значение  $\mu$   
зависит от напряженности  
внешнего магнитного поля.

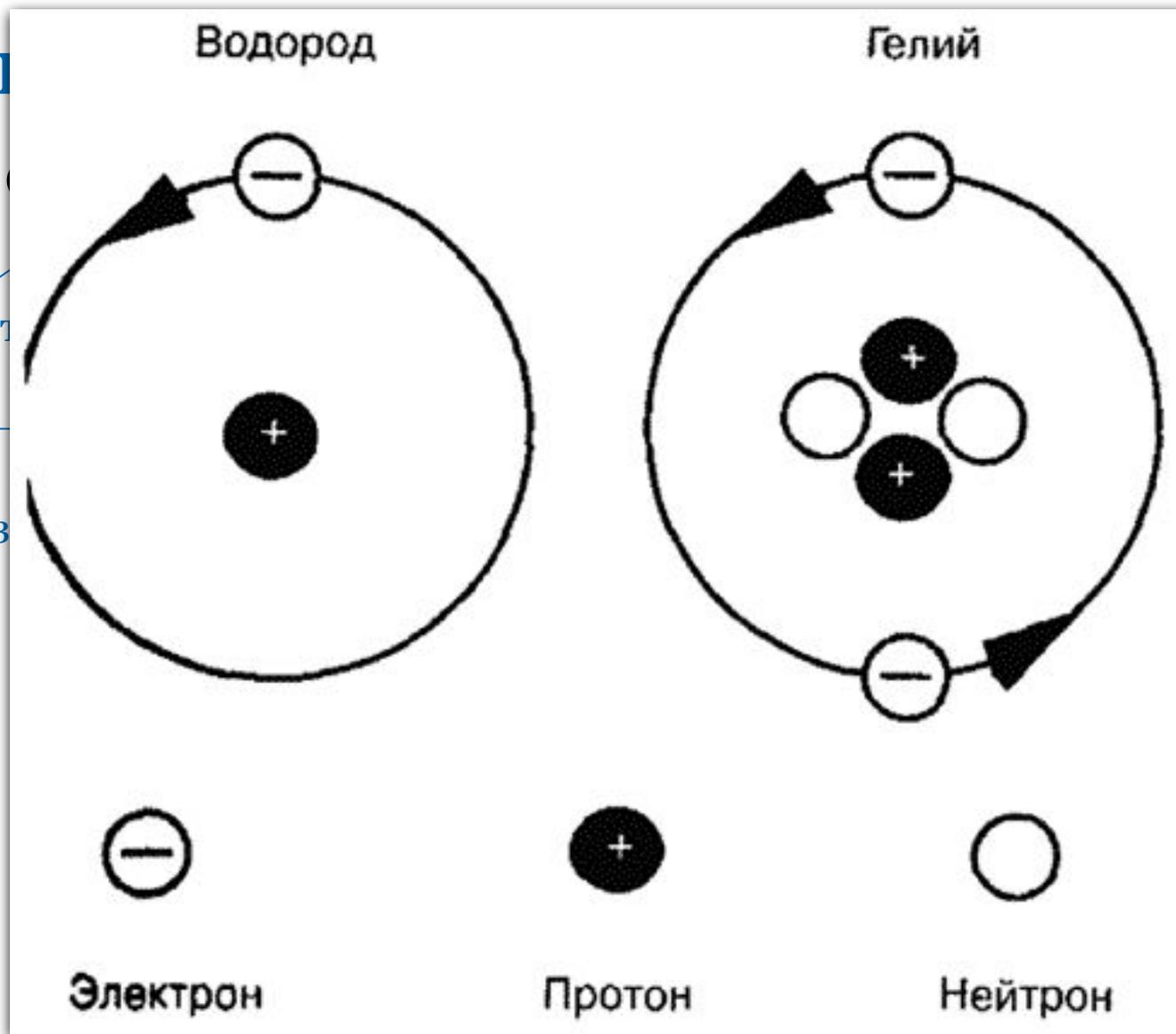
Общ

ства

Прот

Из

гома,  
ый заряд



Водород

Гелий

Электрон

Протон

Нейтрон

По величине  $\mu$  материалы делятся на виды

Атом кислорода

Одноатомные газы:

He, Ne, Ar

Двухатомные газы:

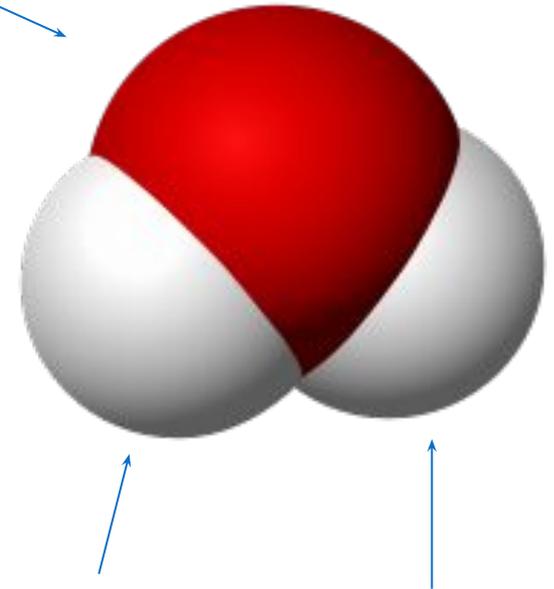
$O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $Cl_2$

Трехатомные газы:

$CO_2$

Четырехатомные газы:

$NH_3$

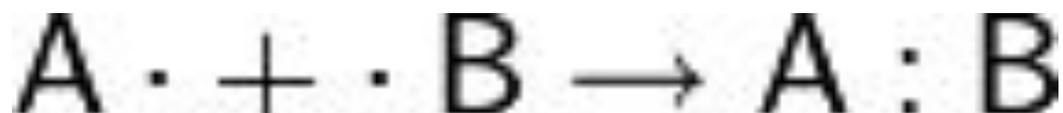


По величине  $\mu$  материалы делятся на виды

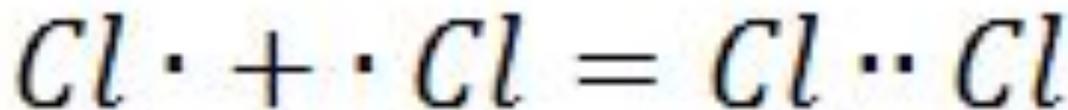
# Виды химических связей:

**1. Ковалентная связь** – связь, объединяющая несколько атомов в молекулу, что достигается за счет электронов, которые являются общими для атомов.

Образование связи



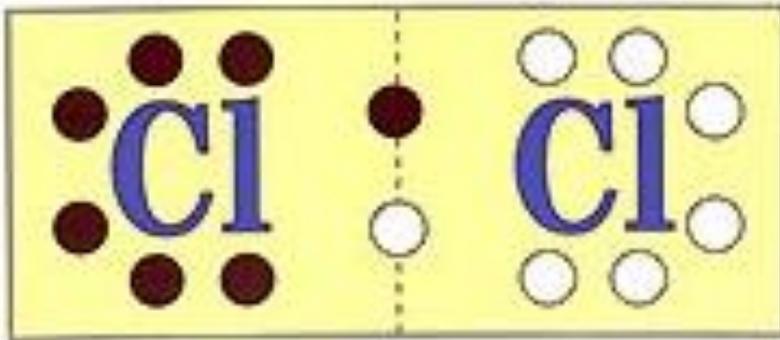
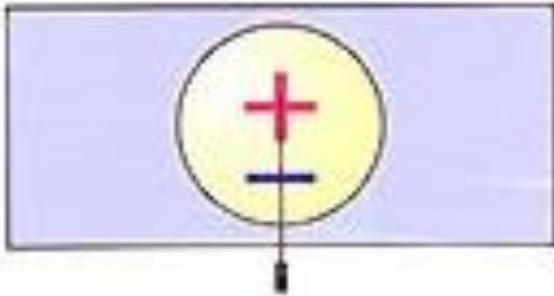
Ех.



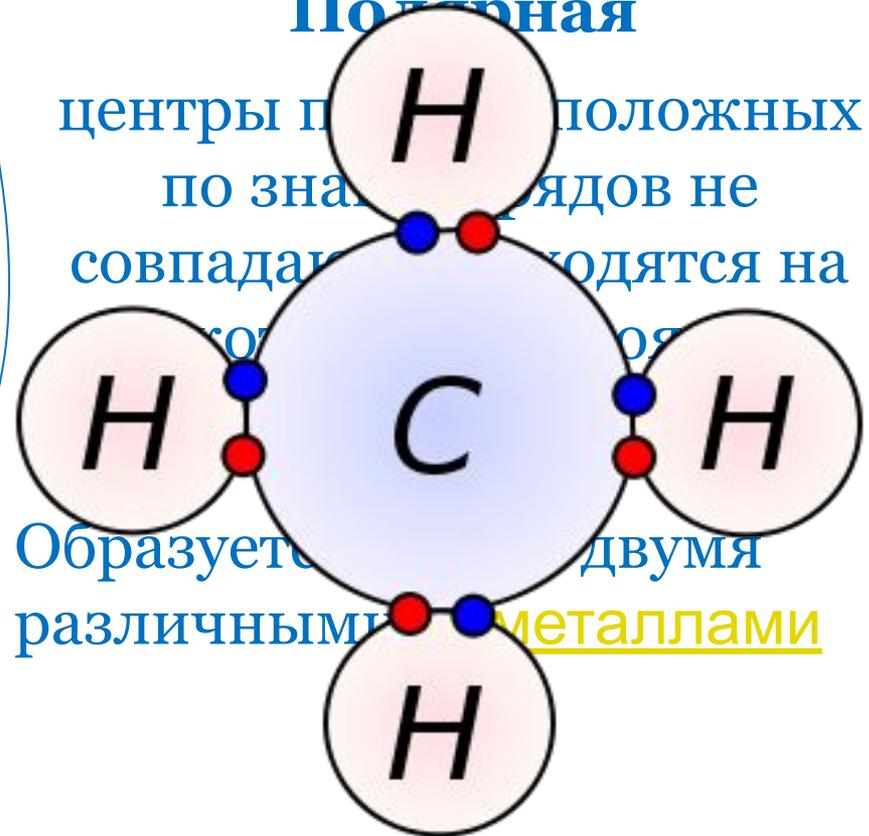
В результате образуется устойчивая конфигурация молекул за счет двух неспаренных электронов

# Ковалентная связь

## Неполярная



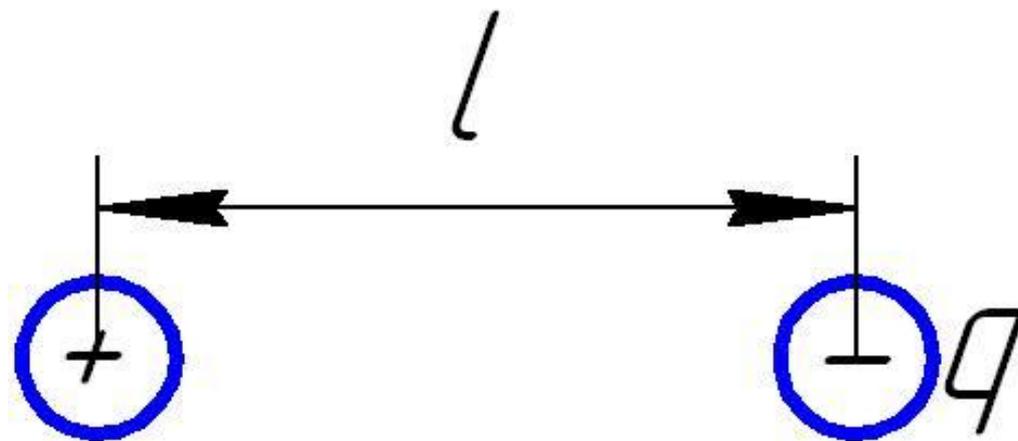
## Полярная



центры положительных зарядов не совпадают с центрами отрицательных зарядов. Образует молекулы с двумя различными типами металлами

- Электроны водорода
- Электроны углерода

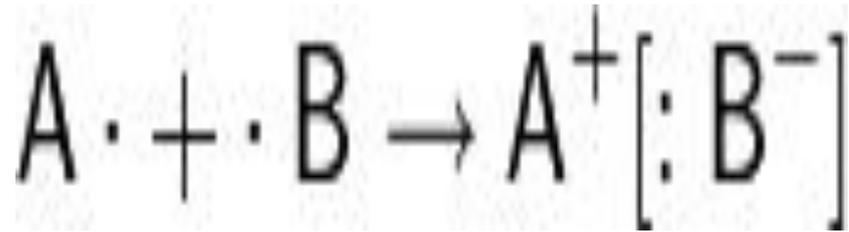
# Полярная молекула характеризуется ДИПОЛЬНЫМ МОМЕНТОМ



По величине  $\mu$  материалы делятся на

# Ионная связь -

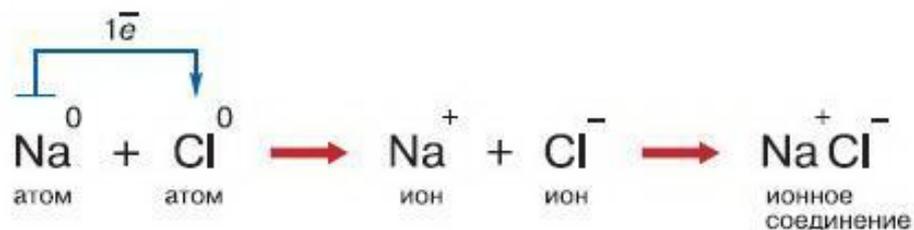
прочная химическая связь, образуемая между атомами с большой разностью электроотрицательностей, при которой общая электронная пара полностью переходит к атому с большей электроотрицательностью.



Характеризуется:

- повышенной механической прочностью;
- относительно высокой температурой плавления.

# Пример ионной связи



Атом натрия



+

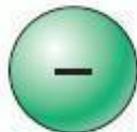


Атом хлора

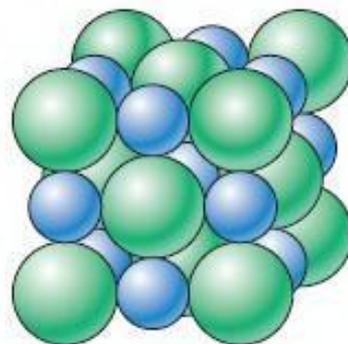
Ион натрия



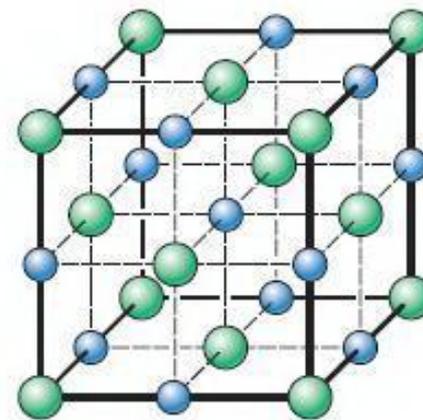
+



Ион хлора



Ионное соединение



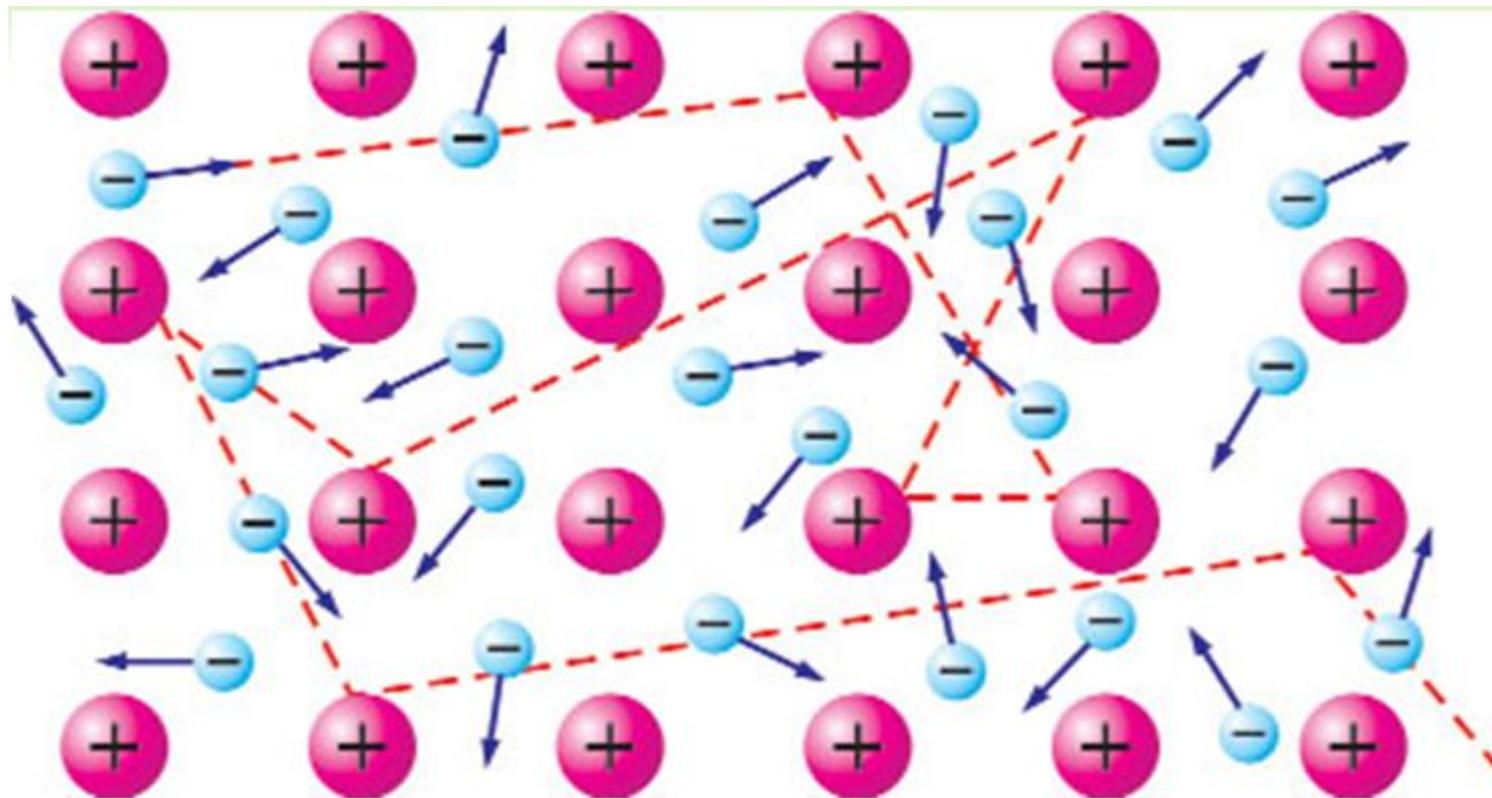
# Металлическая связь -

Химическая связь, обусловленная наличием относительно свободных электронов.

Характерна как для чистых металлов Характерна как для чистых металлов, так и их сплавов Характерна как для чистых металлов, так и их сплавов и интерметаллических соединений. **Важнейшие свойства:**

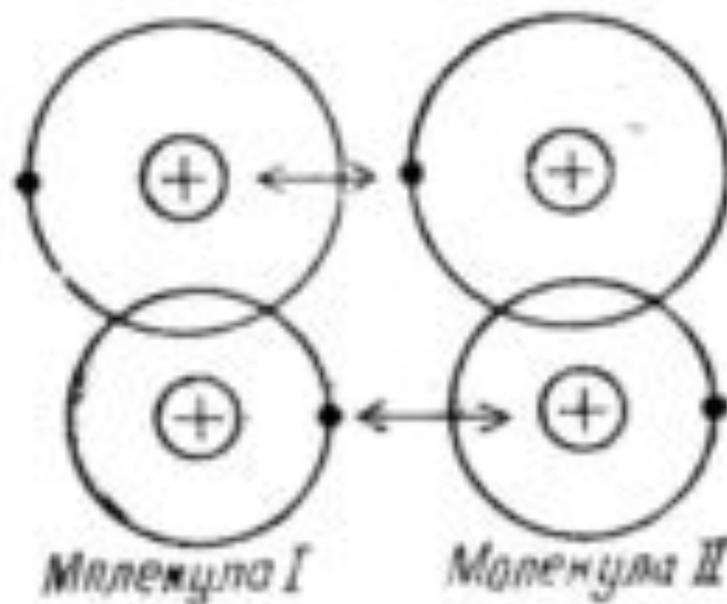
- высокая электро- высокая электро- и теплопроводность.
- сочетание прочности с пластичностью, так как при смещении атомов друг относительно друга не происходит разрыв связей.

# Пример Ме связи

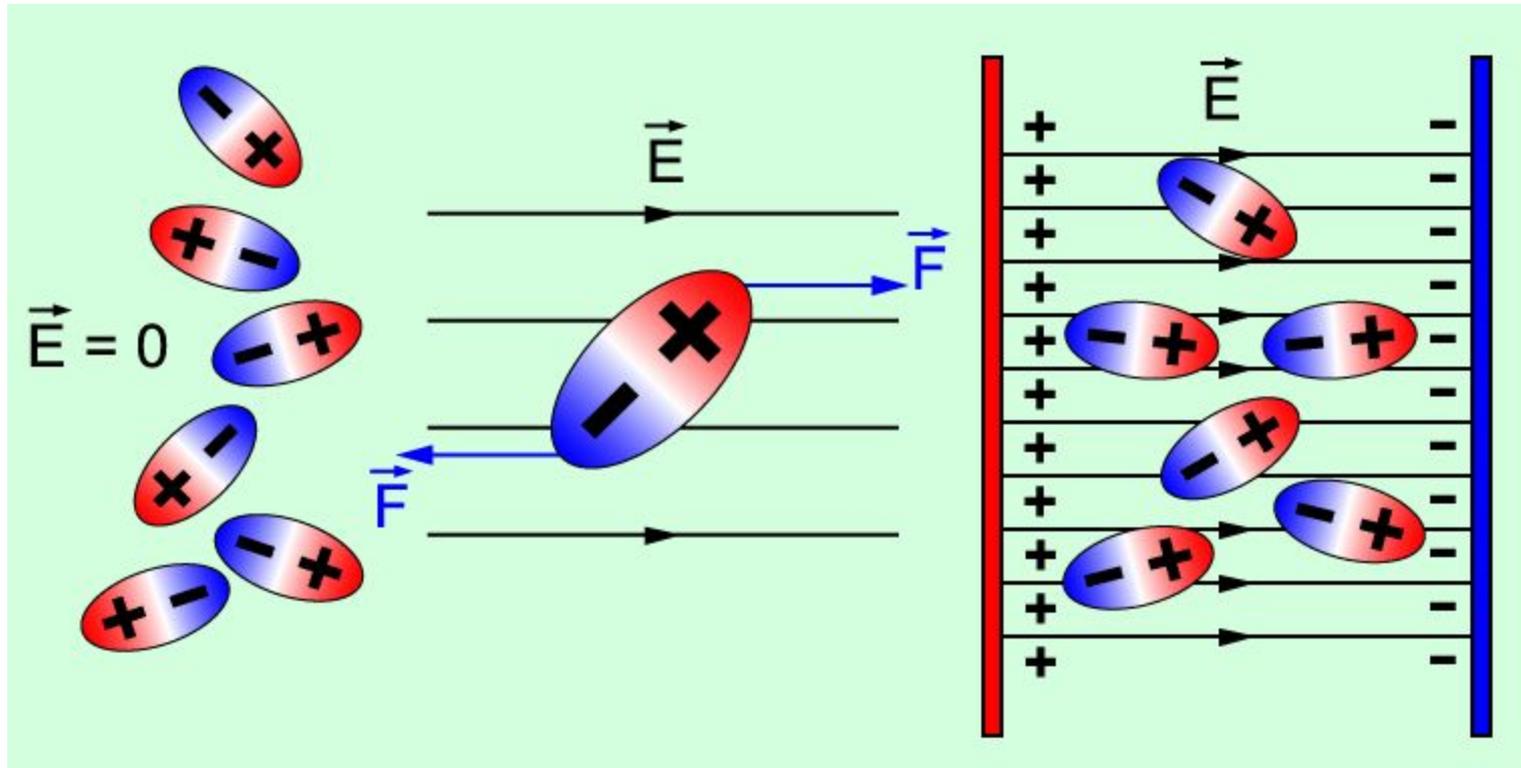


# Молекулярная связь -

Такая связь существует в некоторых веществах между молекулами с ковалентными внутримолекулярными связями. Наблюдается между молекулами некоторых веществ, например, у парафина, имеющих низкую температуру плавления, свидетельствующую о непрочности их кристаллической решетки.



# Поляризация диэлектриков

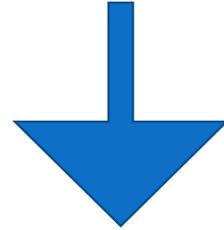


# Поляризация – ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул.

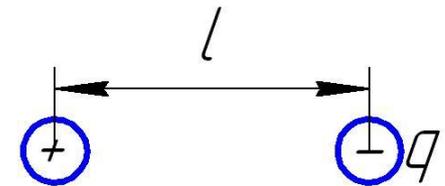
## Поляризация характеризуется:

- значением диэлектрической проницаемости;
- углом диэлектрических потерь.

если она сопровождается рассеянием энергии, т.е. нагревом



центры противоположных по знаку зарядов не совпадают и находятся на некотором расстоянии друг от друга



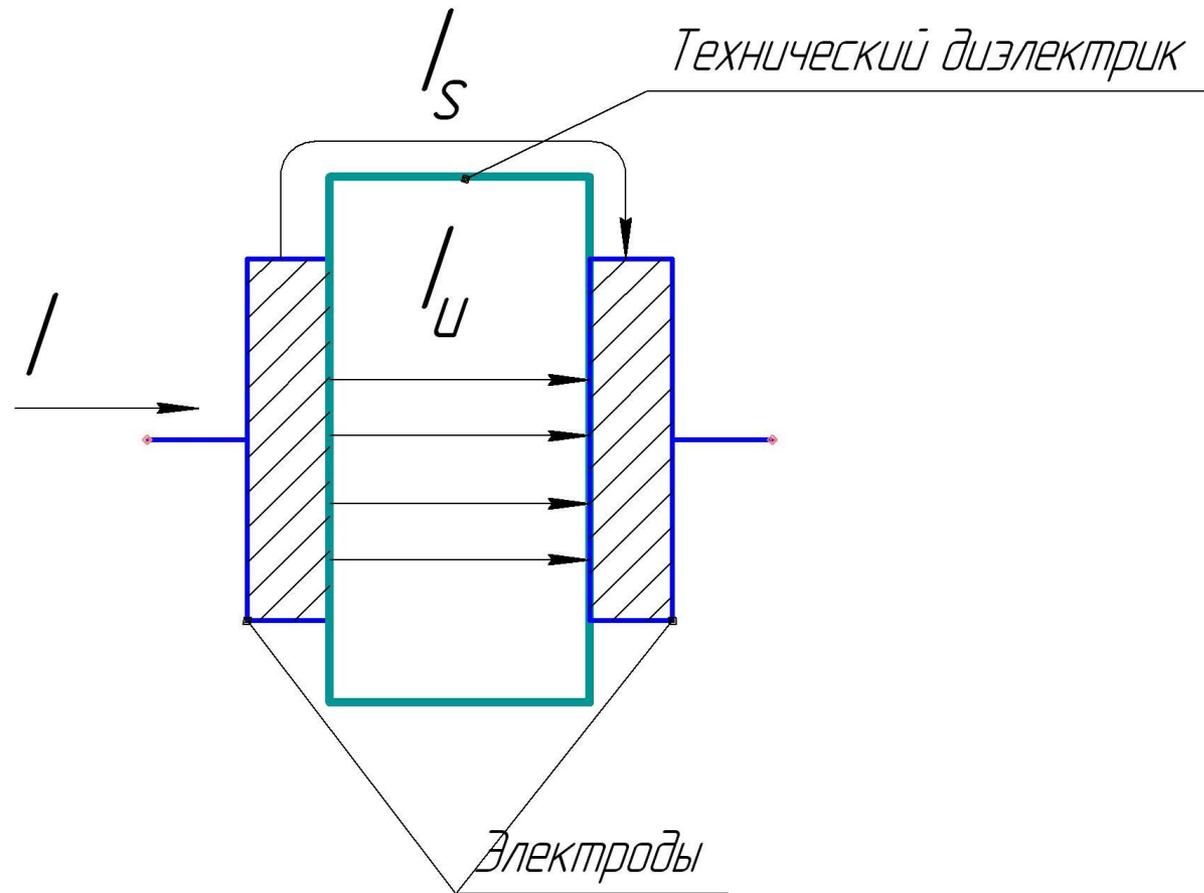
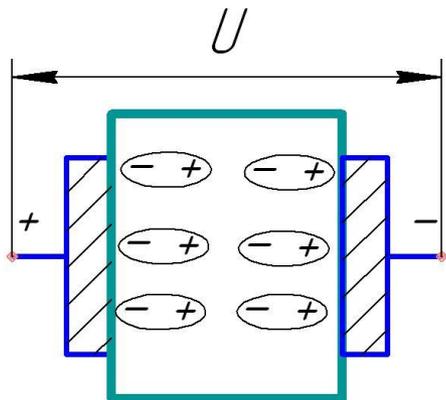


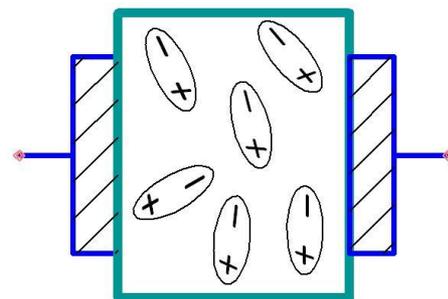
Рисунок 1 – Виды токов проводимости в твердом диэлектрике  
 $I$  – ток, подведенный к электродам (ток сквозной проводимости).  
 $I_s$  – ток поверхностной проводимости;  
 $I_u$  – ток объемной проводимости.



*Расположение связанных зарядов под влиянием электрического поля*



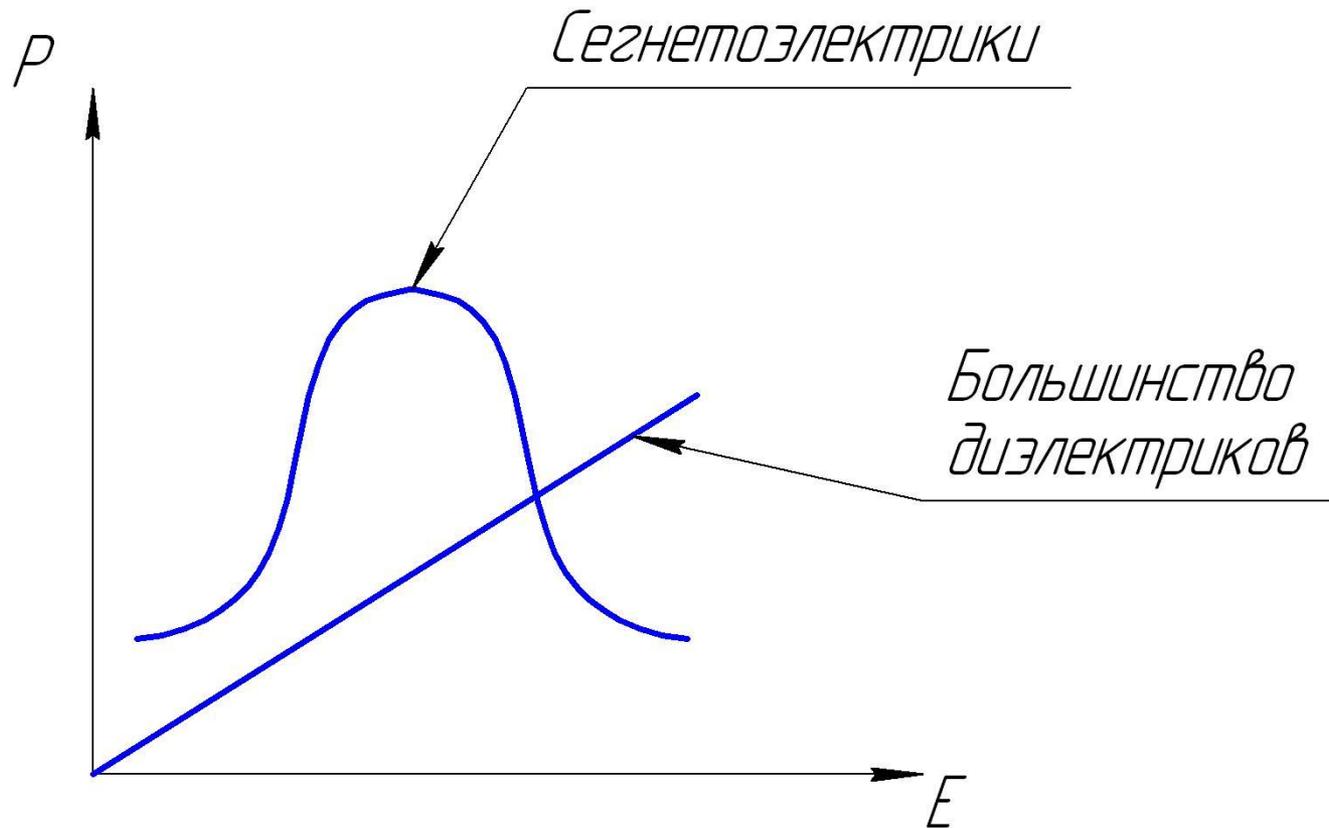
Под влиянием электрического поля связанные электрические заряды диэлектрика смещаются в направлении действующих на них сил и тем больше, чем выше напряженность поля



*Расположение связанных зарядов при отсутствии электрического поля*



При снятии электрического поля заряды возвращаются в исходное состояние.



Линейные диэлектрики

$$P = (\varepsilon - 1)\varepsilon_0 E$$

Сегнетоэлектрик

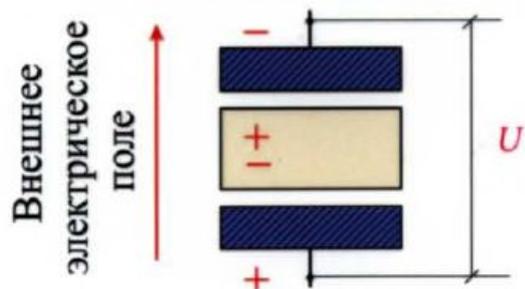
$$P = \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon_0} E$$

где  $P$  - поляризованность;

$\varepsilon_0$  - электрическая постоянная  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$

$\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость

## Электрическое поле внутри конденсатора



Заряд конденсатора

$$Q = C \cdot U$$

можно представить:

$$Q = Q_0 + Q_d, \text{ где}$$

$Q_0$  – между обкладками вакуум;

$Q_d$  – заряд на поверхности диэлектрика.

$\epsilon$  – определяет интенсивность процесса поляризации

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}$$

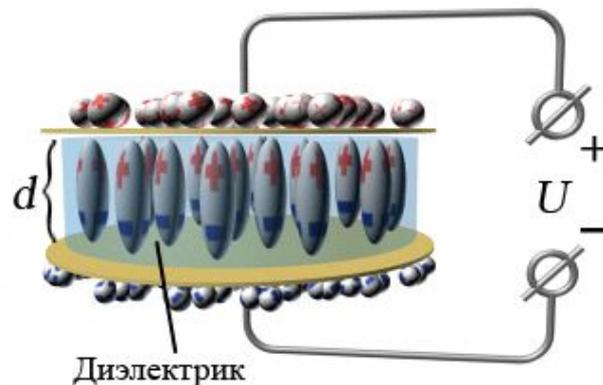
$\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость

$\epsilon = 1$  – только в случае вакуума

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = 1$$

Во всех остальных случаях  $\epsilon > 1$

$\epsilon$  воздуха = 1,00058



# Основные виды поляризации диэлектриков

## Частицы диэлектрика, вызывающие поляризацию

Упруго связанные частицы

имеют одно положение равновесия, около которого они совершают тепловые колебания, и под действием приложенного поля они смещаются на небольшие расстояния: электроны смещаются в пределах атома (иона), атомы – в пределах молекулы, ионы – в пределах элементарной ячейки и т. д.



упругие (деформационные) виды поляризации

Слабо связанные частицы

имеют несколько положений равновесия, в которых они в отсутствие электрического поля могут находиться равновероятно. Переход слабосвязанных частиц из одного равновесного положения в другое осуществляется под действием флуктуаций теплового движения.

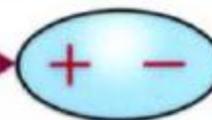


Релаксационные виды поляризации



Неполярная молекула

## строение молекул



Полярная молекула

### III. Мгновенные.

Они происходят:

- 1) Быстро
- 2) Упруго
- 3) Без рассеяния энергии

К ним относятся:

#### 1. Электронная

Во всех видах диэлектриков

#### 2. Ионная

В твердых телах с ионным строением (кварц, слюда, корунд)

### Поляризации

Характеризуются:  
интенсивностью  
процесса  
поляризации.

$\epsilon$

неполярные диэлектрики

(1,8 ÷ 2,5)

полярные диэлектрики

(3 ÷ 10)

### IV. Замедленные.

Они происходят:

- 1) Замедленно
- 2) С рассеянием энергии

К ним относятся:

#### 1. Электронно – релаксационная.

В двуокиси титана с примесью Са, Ва

#### 2. Ионно – релаксационная.

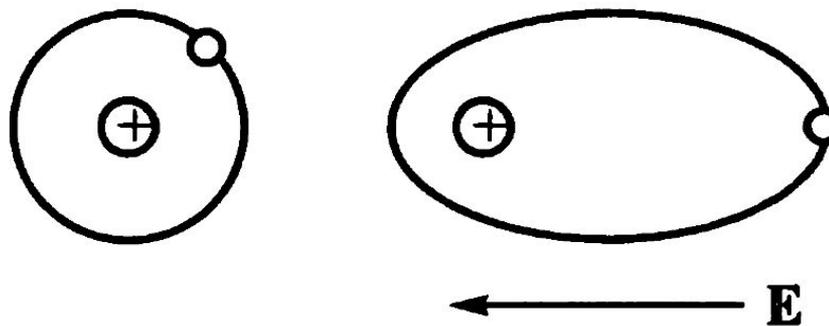
В неорганических стеклах

#### 3. Дипольно – релаксационная.

В дипольных диэлектриках (органические вещества – целлюлоза)

## Электронная поляризация

представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов относительно ядра и имеет место во всех диэлектриках.



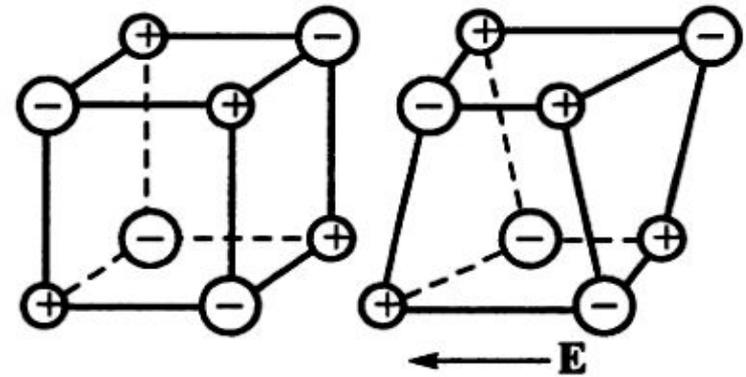
### Особенности электронной поляризации:

1. Время установления ничтожно мало (около  $10^{-15}$  с).
2. Диэлектрическая проницаемость вещества с чисто электронной поляризацией численно равна показателю преломления света  $n$ .
3. Смещение и деформация электронных орбит атомов и ионов не зависит от температуры, однако ЭП вещества уменьшается с повышением температуры в связи с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единицу объема.

## Ионная поляризация

наблюдается в кристаллических и аморфных телах ионного строения (кварц, слюда, асбест, стекло и т.п.)

**Заключается в смещении** упруго связанных ионов под действием приложенного поля на расстояния, меньшие постоянной решетки, т.е. в упругой деформации решетки.



**Рис. 2.5.** Механизм ионной поляризации на примере NaCl (схематически)

### Характер ионной поляризации:

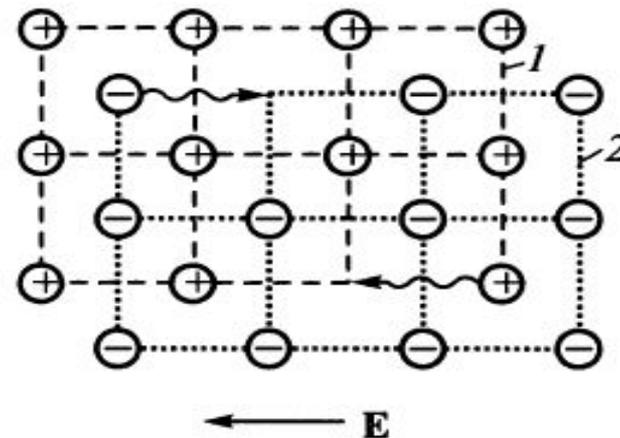
1. В этом виде поляризации принимают участия также слабо связанные и свободные ионы.
2. С повышением температуры она усиливается в результате ослабления упругих сил, действующих между ионами, из-за увеличения расстояния между ними при тепловом расширении.
3. Время установления около  $10^{-13}$  с.

## Ионно-релаксационная поляризация

имеет место в диэлектриках ионного строения (неорганические стекла и кристаллических с неплотной упаковкой ионов (электротехническая керамика, асбесте, мраморе и т.п.).

Этот вид поляризации заключается в некотором упорядочении, вносимом электрическим полем в хаотический тепловой перебор слабо связанных ионов.

Слабо связанными ионами являются собственные ионы диэлектрика, находящиеся в узлах решетки вблизи вакансии.



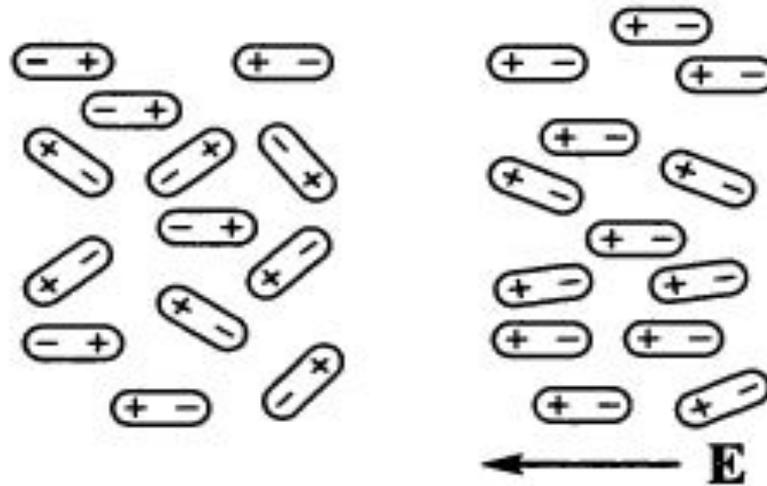
**Рис. 2.7.** Схематическое изображение ионно-релаксационной поляризации на примере CsCl:

1 — подрешетка ионов цезия  $\text{Cs}^+$ ;  
2 — подрешетка ионов хлора  $\text{Cl}^-$

## Дипольно-релаксационная поляризация

Наблюдается только в полярных диэлектриках (полихлоридфенил, канифоль).

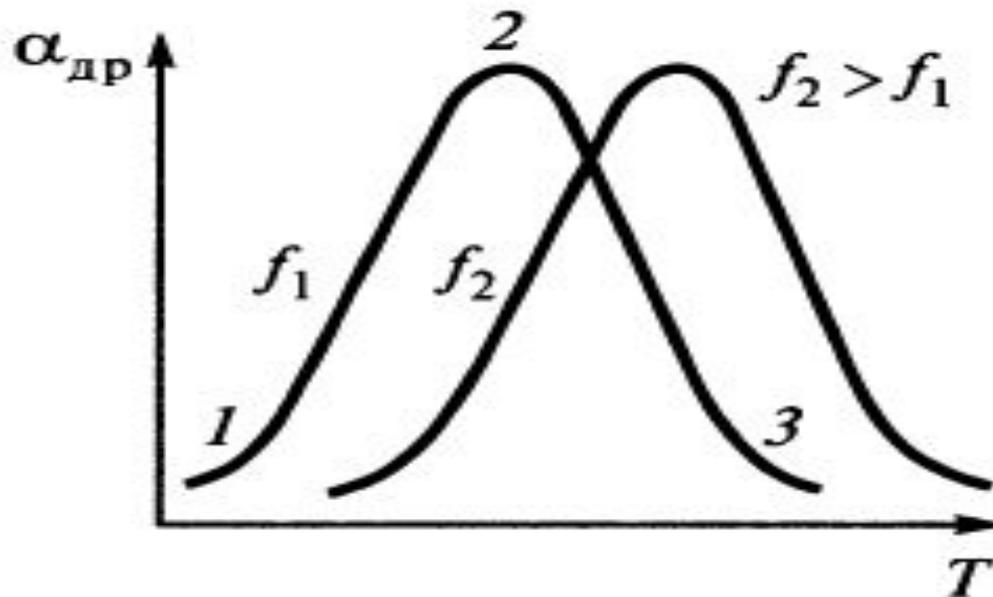
Заключается в том, что дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля, что и является причиной поляризации.



**Рис. 2.8.** Схематическое изображение дипольно-релаксационной поляризации

## Характер дипольно-релаксационной поляризации:

1. Зависимость от частоты приложенного напряжения;
2. Зависимость от температуры.



**Рис. 2.9.** Зависимость дипольно-релаксационной поляризуемости  $\alpha_{др}$  от температуры  $T$

## Электронно-релаксационная поляризация

возникает вследствие возбуждения тепловой энергией избыточных (дефектных) электронов или дырок.

Характерна для диэлектриков:

- с высоким показателем преломления;
- большим внутренним полем и электронной электропроводностью;
- имеет высокое значение диэлектрической проницаемости.

## Миграционная поляризация

наблюдается в твердых диэлектриках с макроскопически неоднородной структурой (например, в слоистых материалах), а также в диэлектриках, содержащих проводящие и полупроводящие включения (поры, заполненные влагой).

При внесении в электрическое поле диэлектрика, имеющего слоистое строение (гетинакс, текстолит), в результате разной электропроводности различных слоев, на границе их раздела и в приэлектродных объемах, начнут накапливаться заряды медленно движущихся ионов, и возникнет межслойная поляризация, которая и обуславливает миграционную поляризацию.

### Особенности миграционной поляризации:

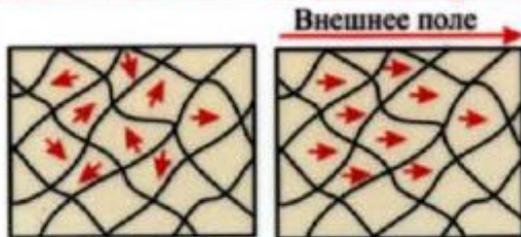
1. Протекает очень медленно;
2. Проявляется при постоянном напряжении и на низких частотах (до 0,5 кГц);
3. С увеличением частоты напряжения поляризуемость снижается;
4. Вызывает заметное увеличение ОДП материала и особенно ДП.

## Спонтанная поляризация

существует у сегнетоэлектриков. В таких веществах имеются отдельные области (домены), обладающие электрическим моментом в отсутствие внешнего поля. Однако при этом ориентация электрических моментов в разных доменах различна. Наложение внешнего поля способствует преимущественно ориентации электрических моментов доменов в направлении поля, что дает эффект очень сильной поляризации. В отличие от других видов поляризации при некотором значении напряженности внешнего поля наступает насыщение, и дальнейшее усиление поля уже не вызывает возрастания интенсивности поляризации.

### II. Спонтанная или самопроизвольная поляризация.

Строение  
вещества



Особенности поляризации:

- 1) Домены
- 2) Очень сильное рассеяние энергии в сегнетоэлектриках

## Классификация диэлектриков по виду поляризации

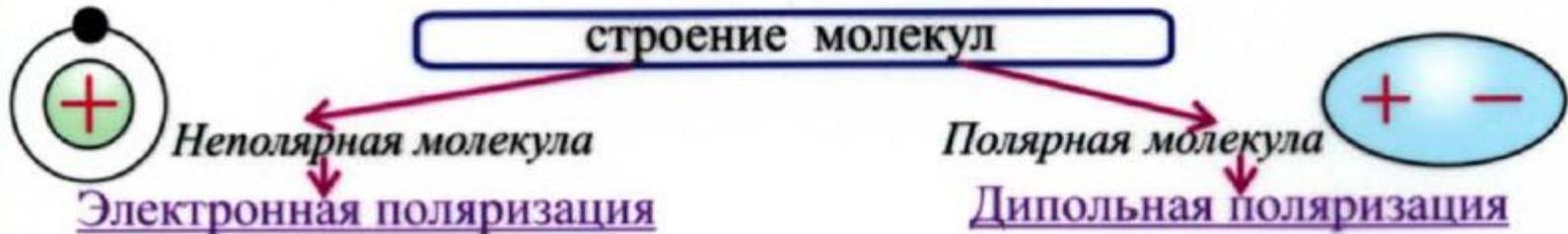
Все диэлектрики по виду подразделяются на несколько групп. ¶

+

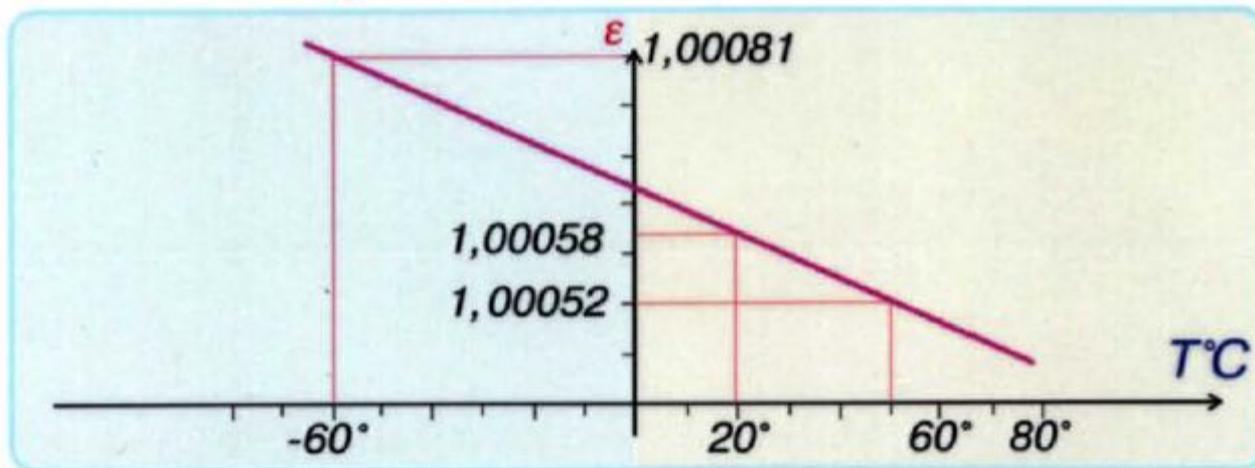
1 группа	2 группа	3 группа		4 группа
неполярные и <u>слабополярные</u> твердые вещества в кристаллическом и аморфном состоянии	полярные (дипольные) органические, полужидкие и твердые вещества	Твердые неорганические диэлектрики		Сегнетоэлектрики
		кристаллические вещества с плотной упаковкой ионов	неорганические стекла, материалы, содержащие стекловидную фазу, кристаллические диэлектрики с неплотной упаковкой ионов	
Э	Э, ДР	Э, И	Э, И, ЭР, ИР	С, Э, И, ЭР, ИР
парафин, сера, неполярные и <u>слабополярные</u> жидкости и газы	масляно-канифольные компаунды, эпоксидные смолы, целлюлоза	кварц, слюда, каменная соль	фарфор, миканит	сегнетова соль, титан, бария

# Диэлектрическая проницаемость газов

$$\epsilon_{\text{водорода}} = 1,00027$$



Зависимость  $\epsilon = f(T)$  для воздуха при постоянном давлении .



**Показатель преломления и диэлектрическая  
проницаемость некоторых газов**

Газ	Радиус молекулы, нм	Показатель преломления $n$	$n^2$	Диэлектри- ческая про- ницаемость $\epsilon_r$
Гелий . . . . .	0,112	1,000035	1,000070	1,000072
Водород . . . . .	0,135	1,00014	1,00028	1,00027
Кислород . . . . .	0,182	1,00027	1,00054	1,00055
Аргон . . . . .	0,183	1,000275	1,00055	1,00056
Азот . . . . .	0,191	1,00030	1,00060	1,00060
Углекислый газ . . . . .	0,230	1,00050	1,00100	1,00096
Этилен . . . . .	0,278	1,00065	1,00130	1,00138

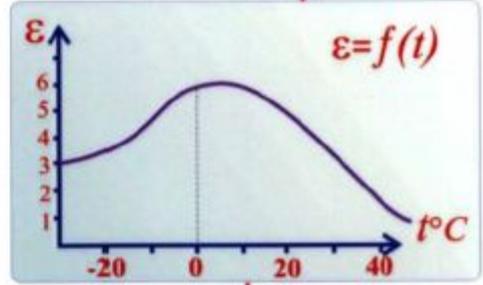
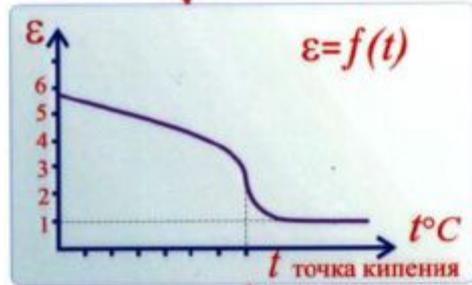
**Примечание.** Приведенные значения справедливы при температуре 20 °С и давлении 760 мм рт. ст. (0,1 МПа).

# Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков

$\epsilon \gg 1$  , т.к. плотность жидкости  $\rho$ , большая величина.  
строение молекул

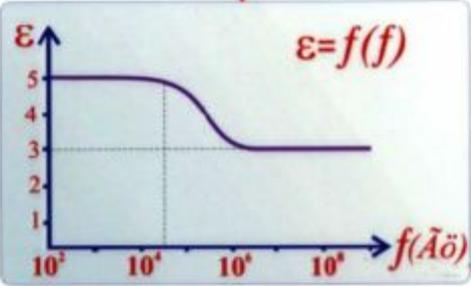
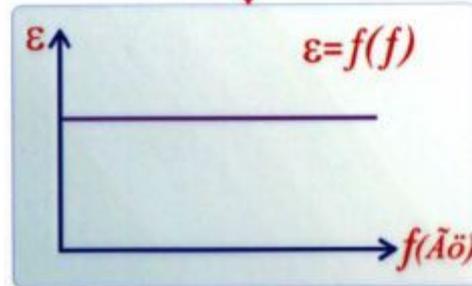
неполярные молекулы  
 (трансформаторное  
 масло)  
 $\epsilon = 2,1 \div 2,5$

полярные молекулы  
 (совол)  
 $\epsilon = 3,5 \div 5$



Поляризация – электронная

Поляризации – электронная  
и дипольная



Эти диэлектрики применяются  
на всех частотах

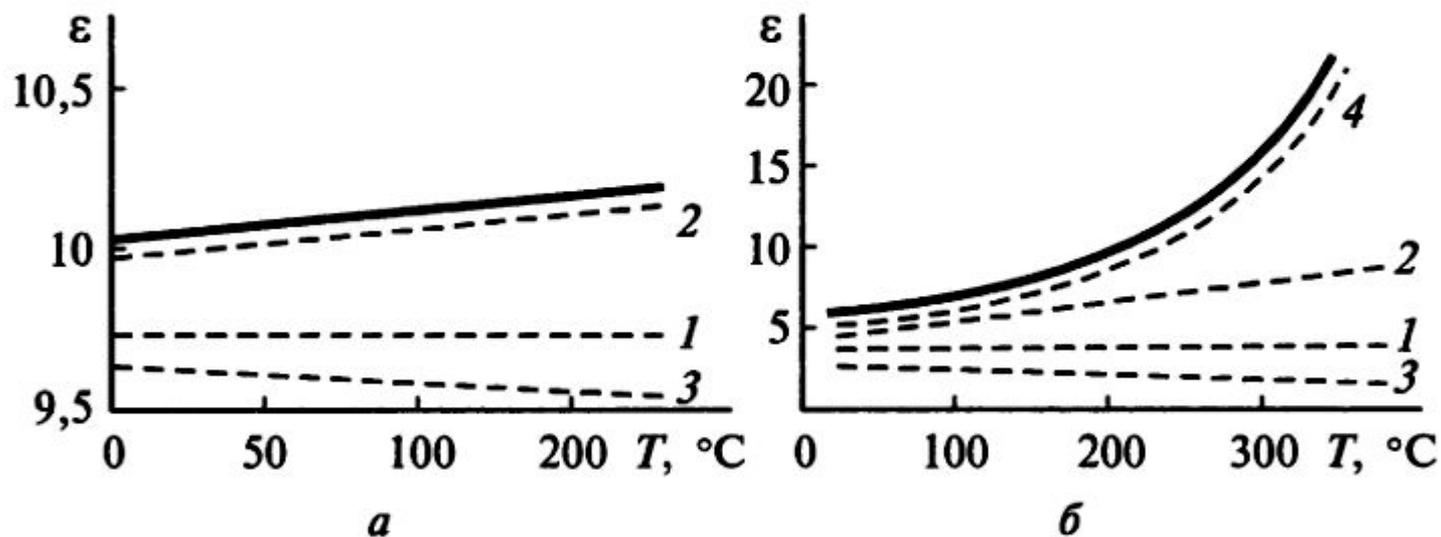
Эти диэлектрики применяются  
на низких частотах

# Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

В твердых диэлектриках возможны все виды поляризации



## Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков



**Рис. 2.14.** Температурная зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  диэлектрика с плотной упаковкой решетки — корунда (а) и с неплотной упаковкой решетки — электротехнического фарфора (б).

Образующие  $\epsilon$ : 1 —  $\alpha_3(T)$ ; 2 —  $\alpha_n(T)$ ; 3 —  $n(T)$ ; 4 —  $\alpha_{np}(T)$

