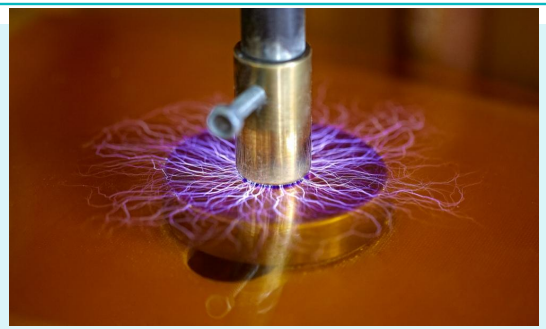
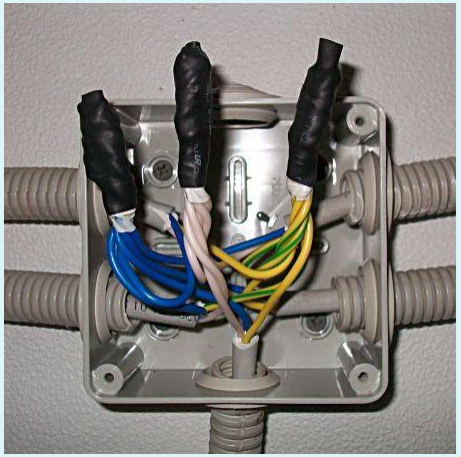
Дисциплина:

Электротехнические материалы и материаловедение

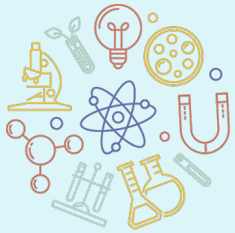


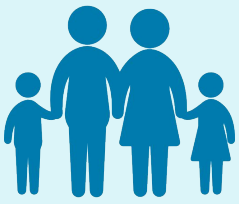


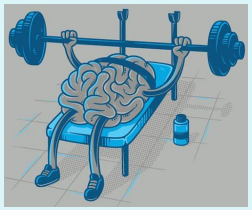
Фоминых Антон Анатольевич

Зав. кафедрой, к.т.н., доцент

Кафедра электрических машин и аппаратов (8-302)







Тел.: 49-29-49

aa_fominyh@vyatsu.ru

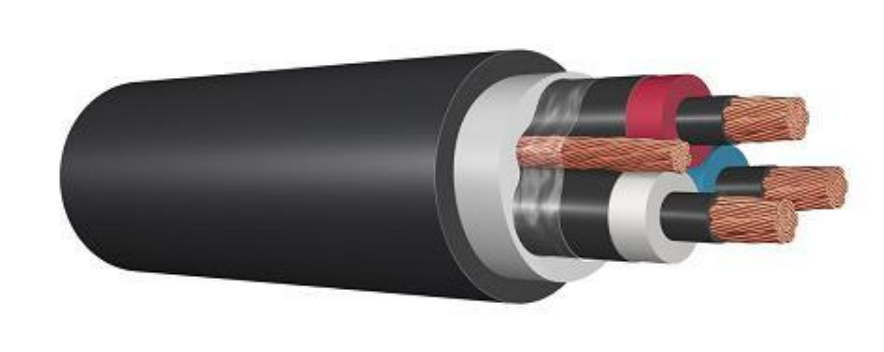
Материаловедение - наука, занимающаяся изучением состава, структуры, свойств материалов, поведением материалов при различных воздействиях: тепловых, электрических, магнитных и т.д.

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)

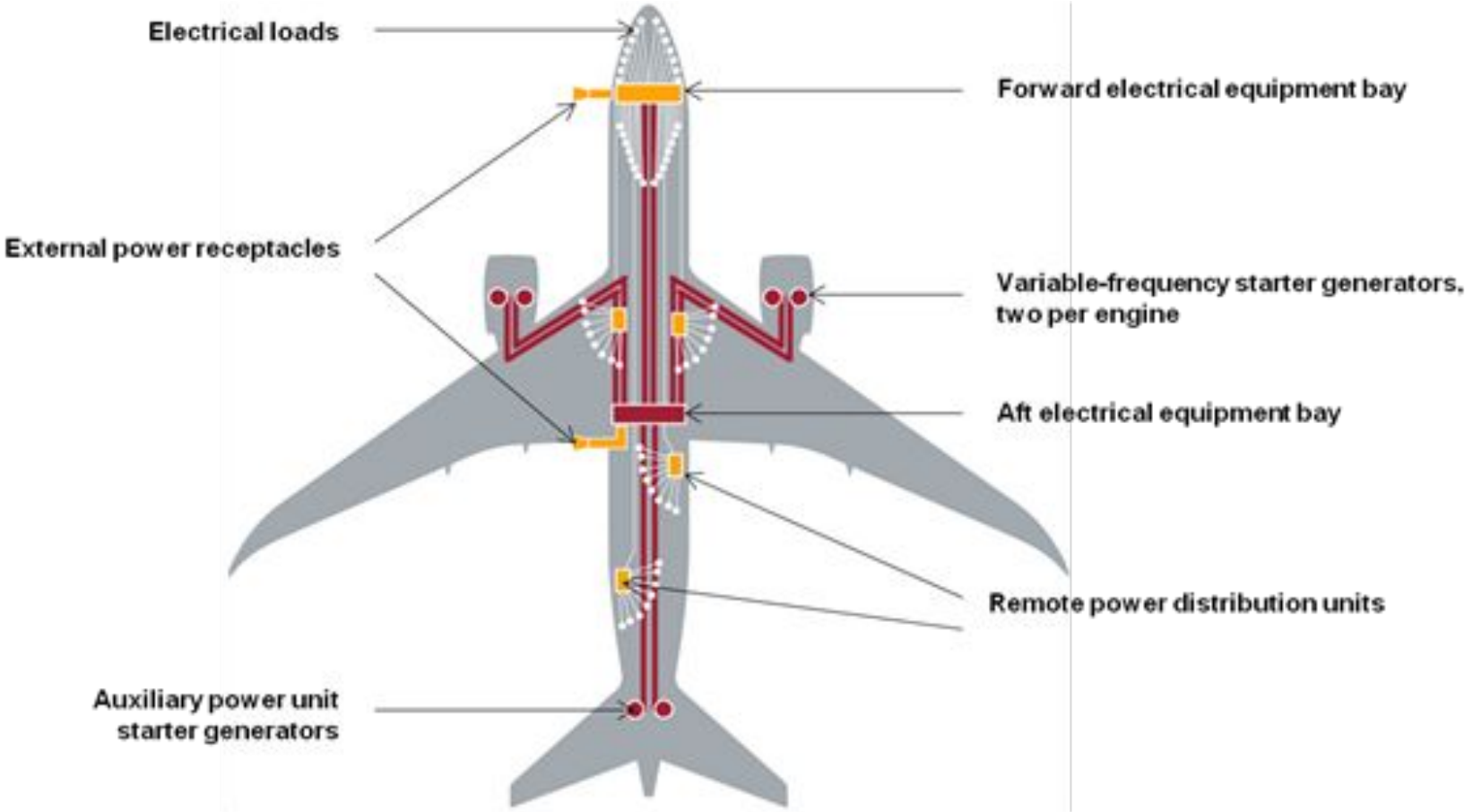
Электрофизические характеристики

(диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность, трекингостойкость)

Физико-химические характеристики

химическая стойкость, влагопроницаемость

Электросистема самолета Boeing 787



Длина проводки примерно 70 миль (112 км)

Электросистема самолета Boeing 787

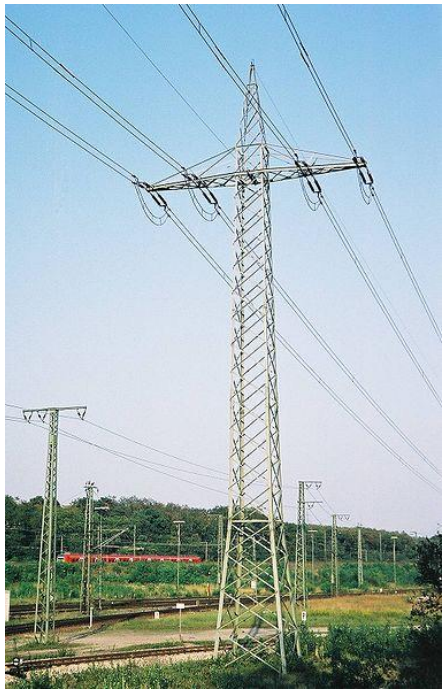
Материал - это объект обладающий определенным составом, структурой и свойствами, є для выполнения определенных функций.

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.

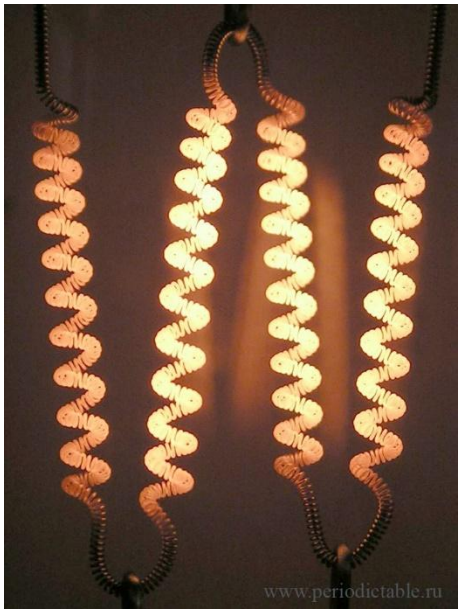
Диэлектрики - основные материалы для изоляции токоведущих частей электрооборудования. Они включают в себя такие типы электрической изоляции, как:

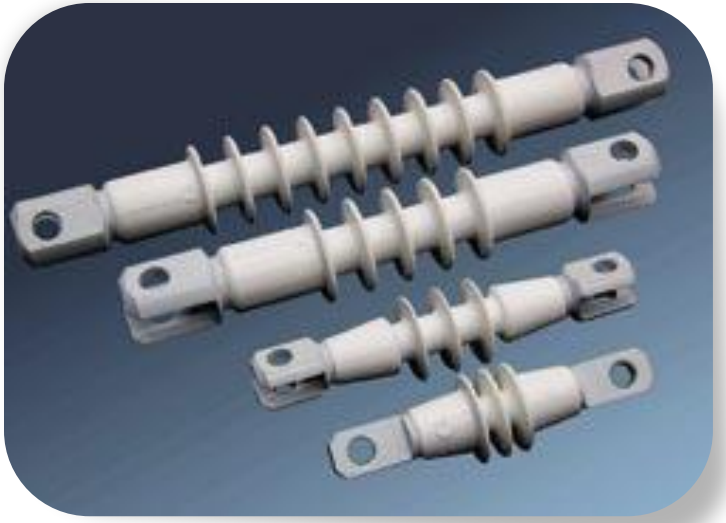
- Воздух в ЛЭП



- Масла в трансформаторах

- Твердые диэлектрики в изоляторах воздушных линий

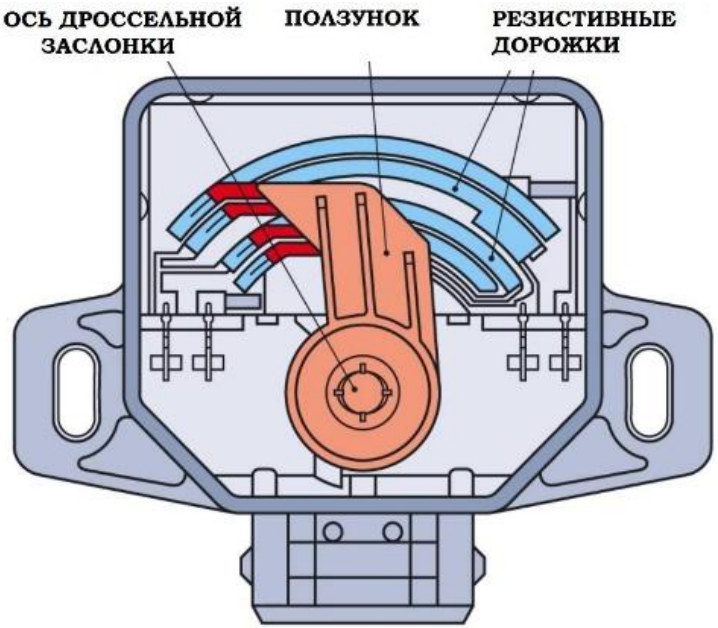

www.periodictable.ru

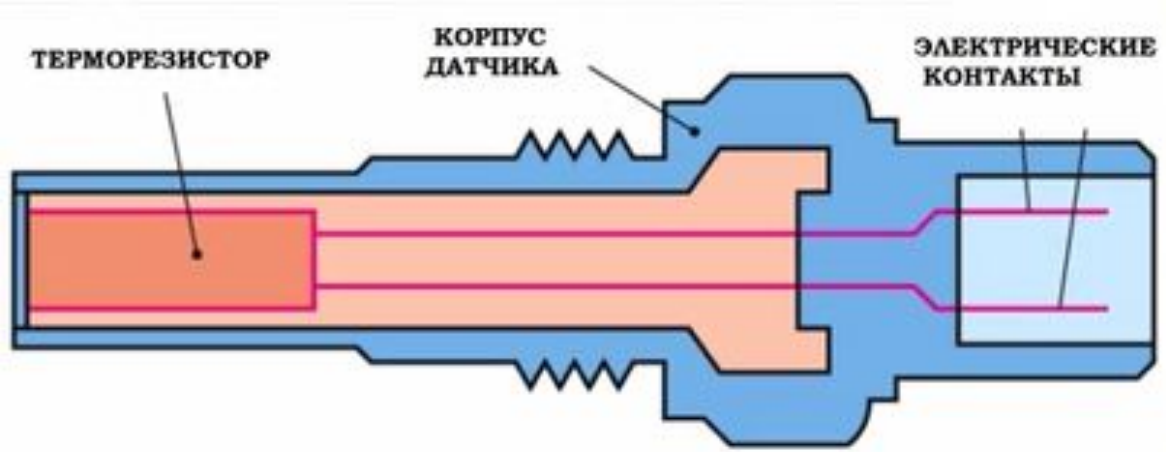


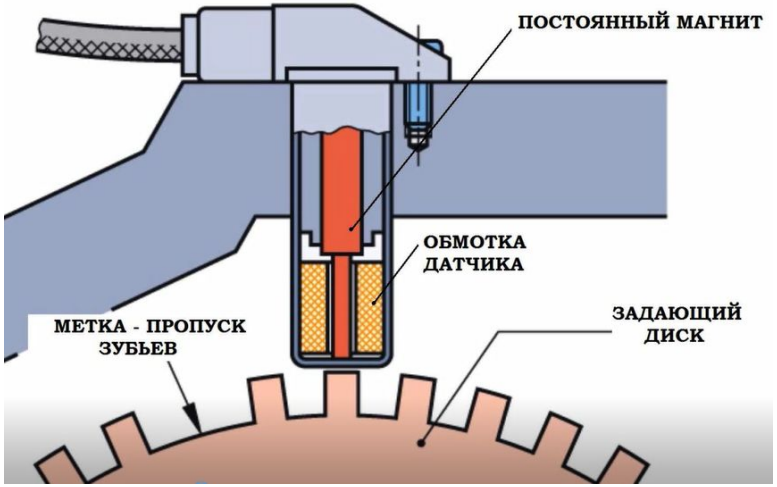
Кремнийорганическая резина

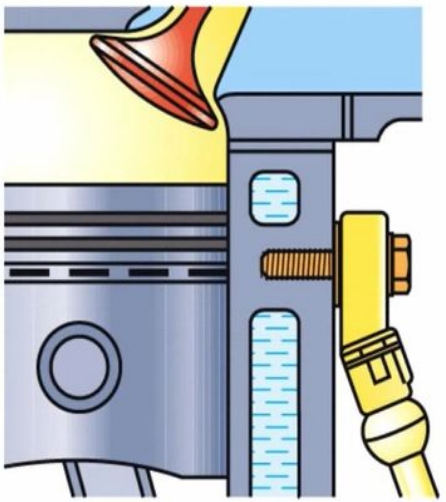
Стекло

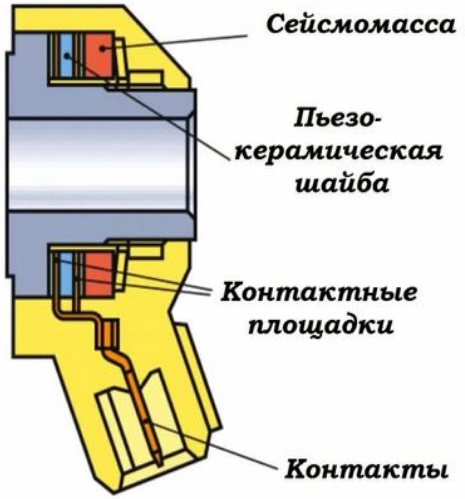
Фарфор

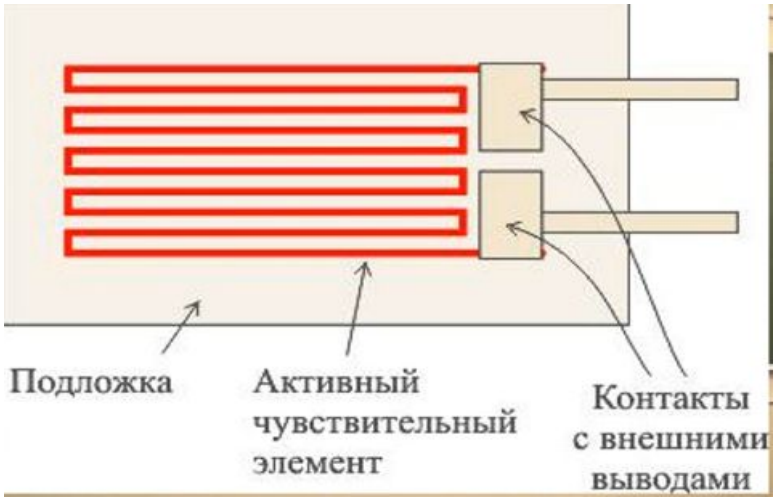

ОСЬ ДРОССЕЛЬНОЙ ЗАСЛОНКИ
ПОЛЗУНОК
РЕЗИСТИВНЫЕ ДОРОЖКИ

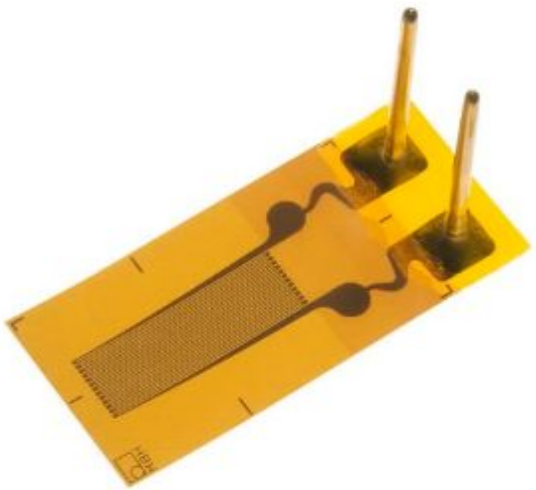

ТЕРМОРЕЗИСТОР
КОРПУС ДАТЧИКА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

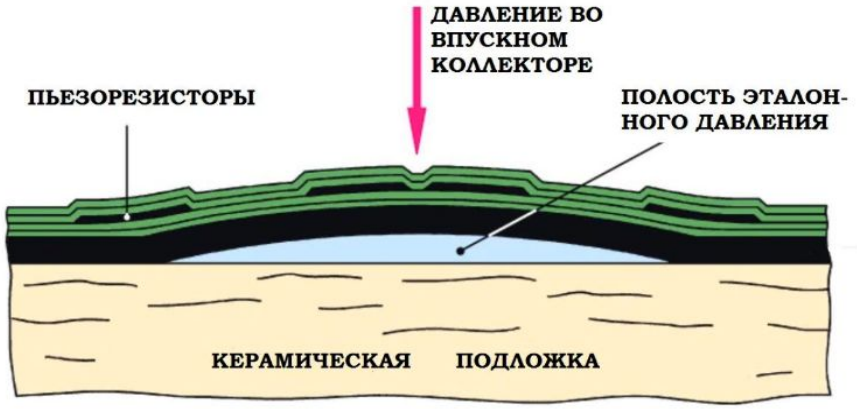

ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ
ОБМОТКА ДАТЧИКА
ЗАДАЮЩИЙ ДИСК
МЕТКА - ПРОПУСК ЗУБЬЕВ




Сейсмомасса
Пьезо-керамическая шайба
Контактные площадки
Контакты


Подложка
Активный чувствительный элемент
Контакты с внешними выводами




ДАВЛЕНИЕ ВО ВПУСКНОМ КОЛЛЕКТОРЕ
ПЬЕЗОРЕЗИСТОРЫ
ПОЛОСТЬ ЭТАЛОННОГО ДАВЛЕНИЯ
КЕРАМИЧЕСКАЯ ПОДЛОЖКА

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

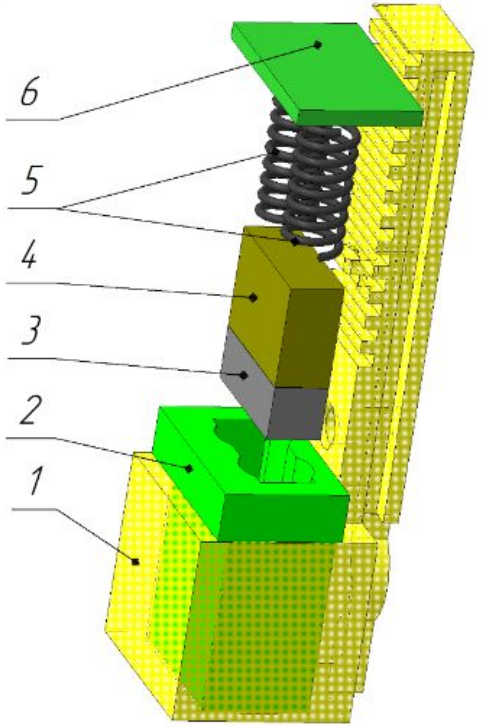
Щеткодержатель для подачи твердой смазки

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

Комплектность для оборудования 1 турбогенератора – 56 шт.

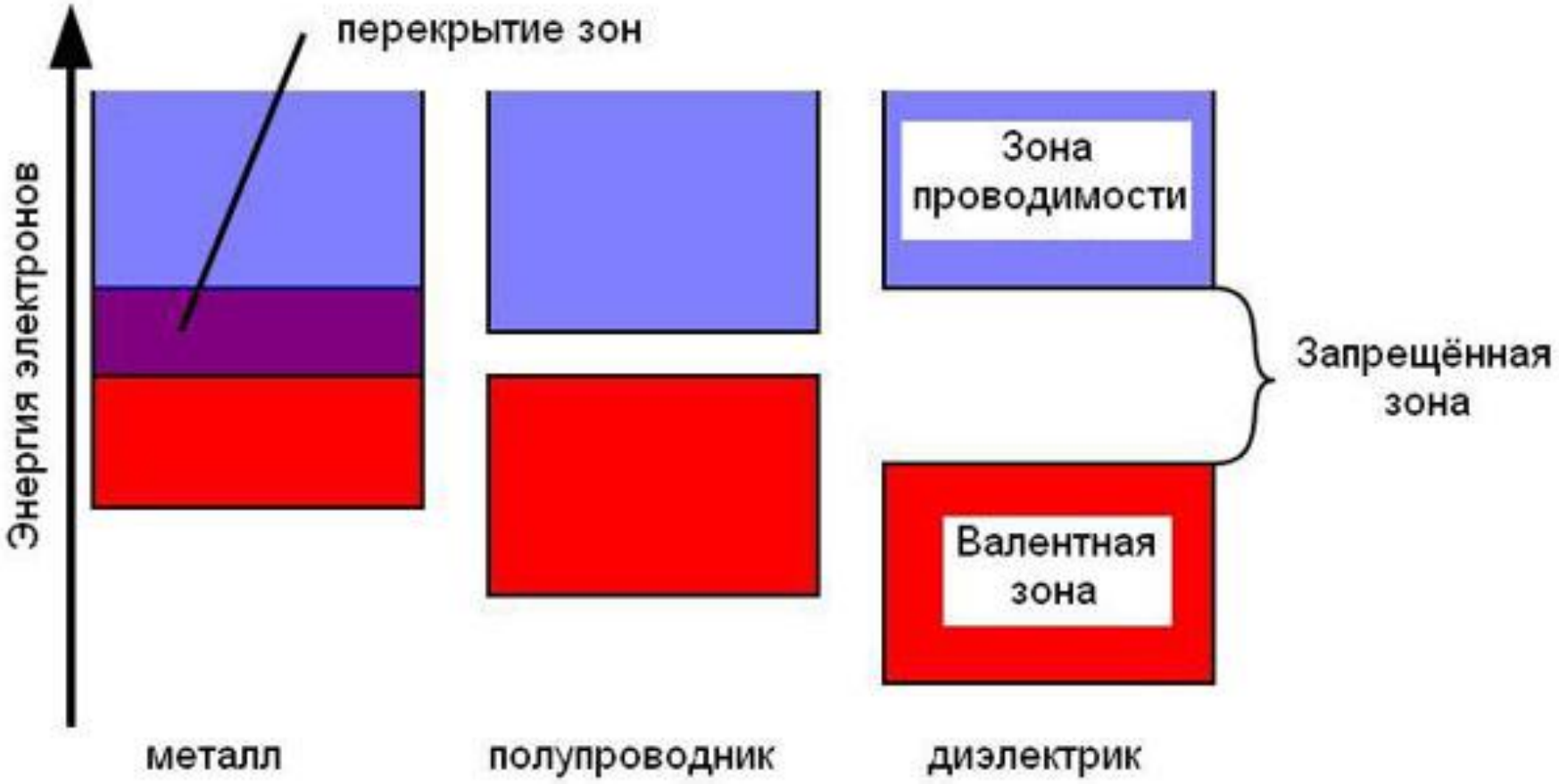
Стоимость комплекта – 100 000 руб.

Себестоимость комплекта – 56 000 руб.



Вариант узла для турбогенератора ТВВ - 320

Классификация ЭТМ в соответствии с зонной теорией электропроводности:



Классификация ЭТМ:

- Сильно магнитные
- Слабо магнитные (немагнитные)
- Проводниковые
- Диэлектрические
- Полупроводниковые

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

Основные электрические характеристики ЭТМ:

1. ε – диэлектрическая проницаемость.
2. ρ_v ; ρ_s – удельные сопротивления.
3. δ и $tg\delta$ – угол диэлектрических потерь.
4. $E_{пр}$ – напряжённость пробоя (электрическая прочность).

Классификация ЭТМ по магнитным свойствам:

$$\mu = \frac{B}{H}\left[{}^{Г}/_{м}\right]$$

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

μ – абсолютная магнитная проницаемость;

$B\left[{}^{Вб}/_{м^2}\right]$ – магнитная индукция;

$H\left[{}^{А}/_{м}\right]$ – напряжённость магнитного поля;

μ_r – относительная магнитная проницаемость;

μ_o – магнитная постоянная

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}\left[{}^{Г}/_{м}\right]$$

По величине μ материалы делятся на виды:

1. Диамагнетики

$\mu < 1$

Значение μ не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

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

2. Парамагнетики

$\mu > 1$

Значение μ не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

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

3. Магнитные материалы

$\mu \gg 1$

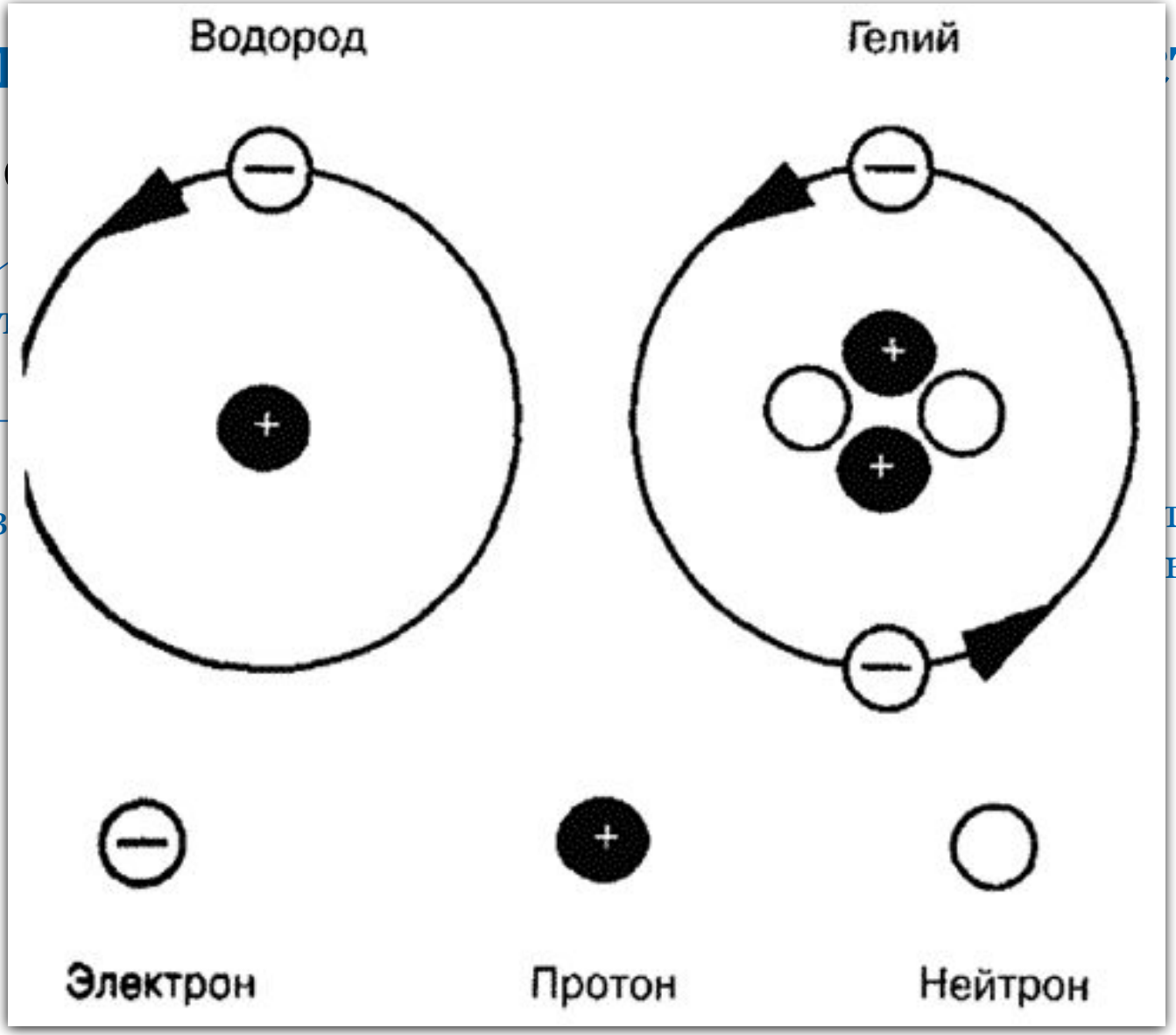
Значение μ зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

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

Общ тва

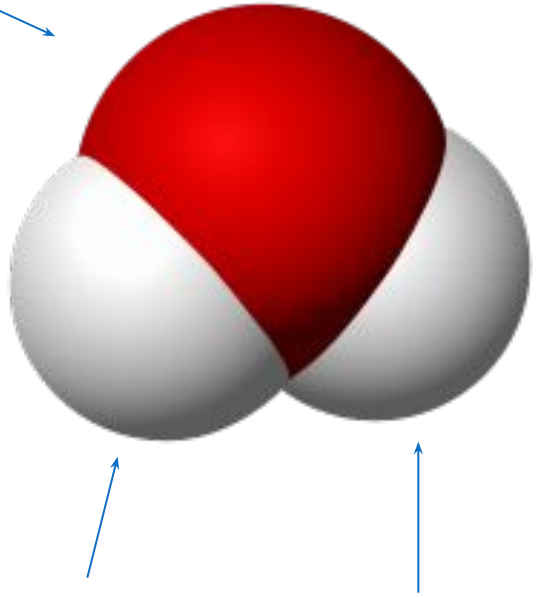
Прот

Из тома,
ый заряд



По величине μ 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:

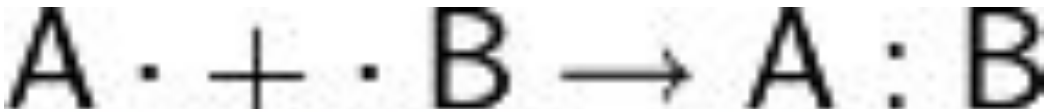
NH_3

По величине μ 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

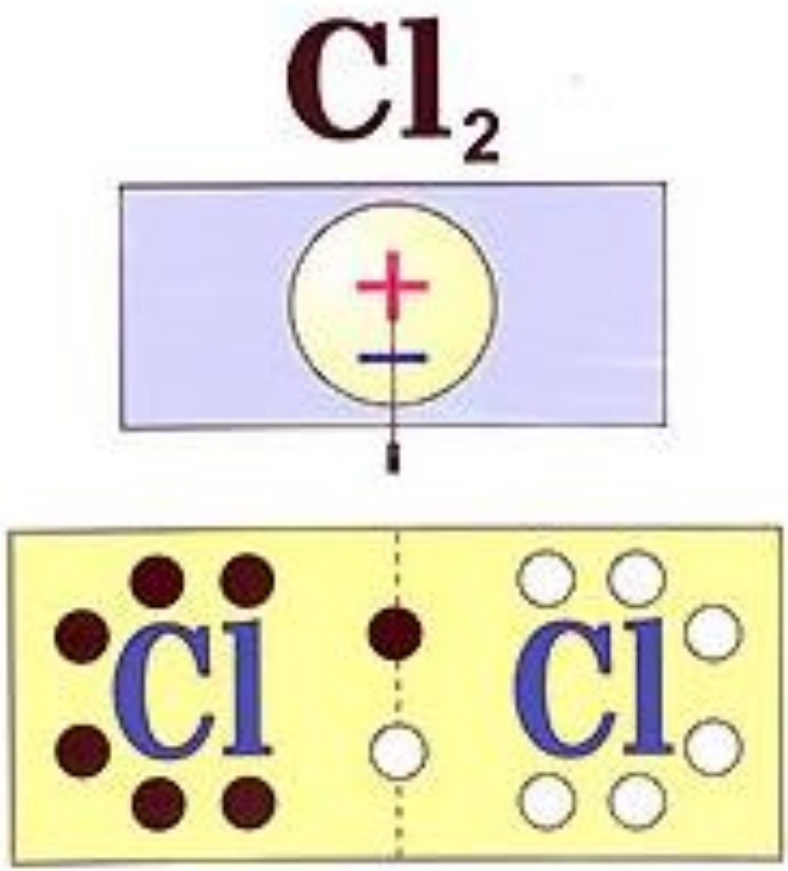


Ex. $Cl \cdot + \cdot Cl = Cl \cdot\cdot Cl$

В результате образуется устойчивая конфигурация молекул за счет двух не спаренных электронов

Ковалентная связь

Неполярная



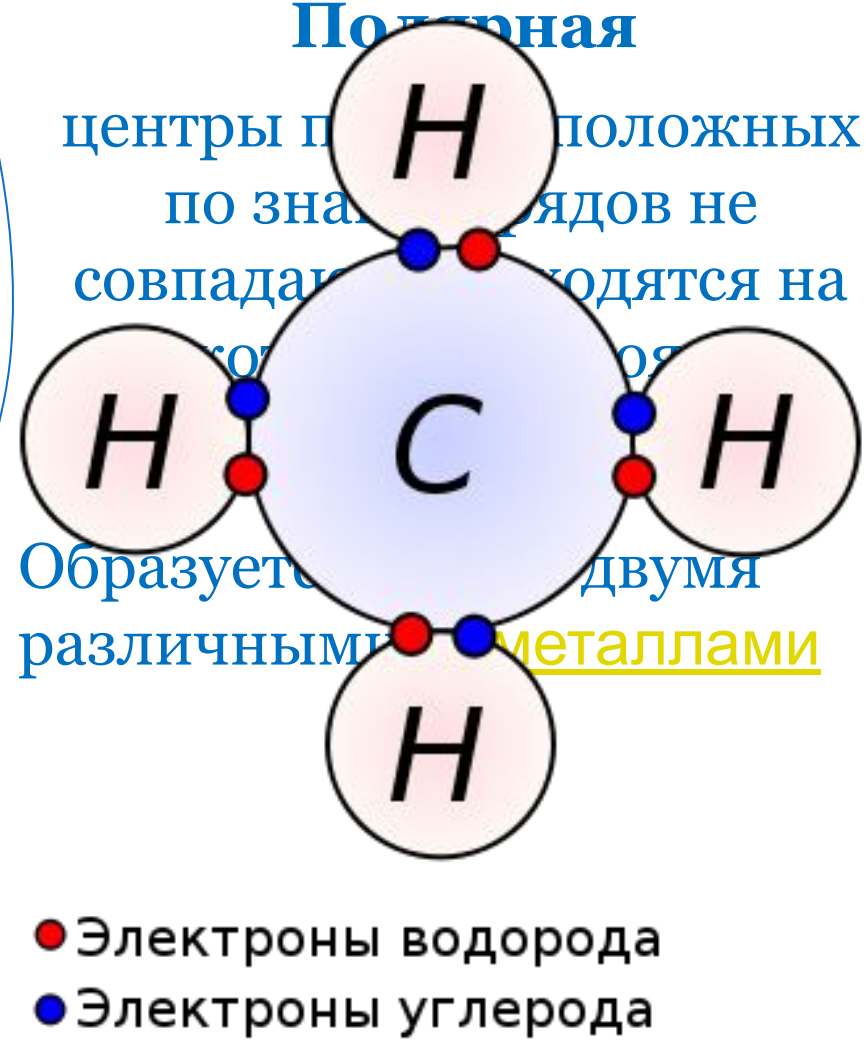
ых
по
и
ов

2’

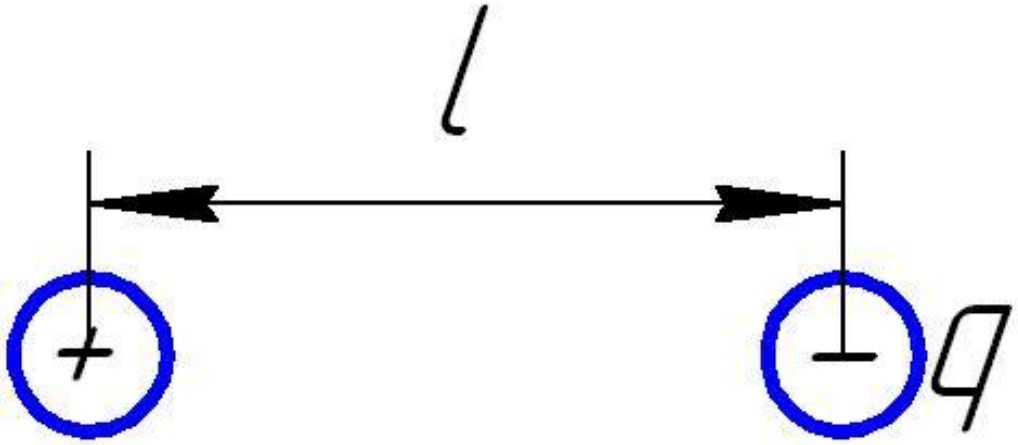
Полярная

центры п положных
по зна рядов не
совпада одятся на
ко ря

Образуете двумя
различными металлами



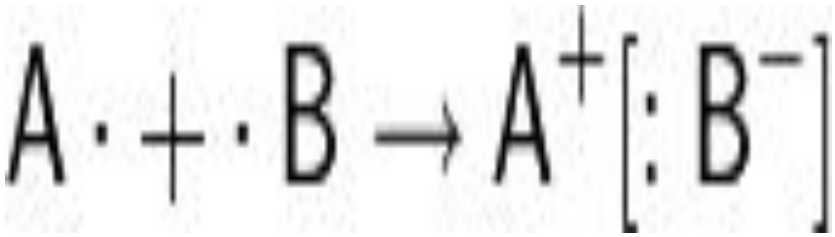
Полярная молекула характеризируется дипольным моментом



По величине μ материалы делятся на

Ионная связь -

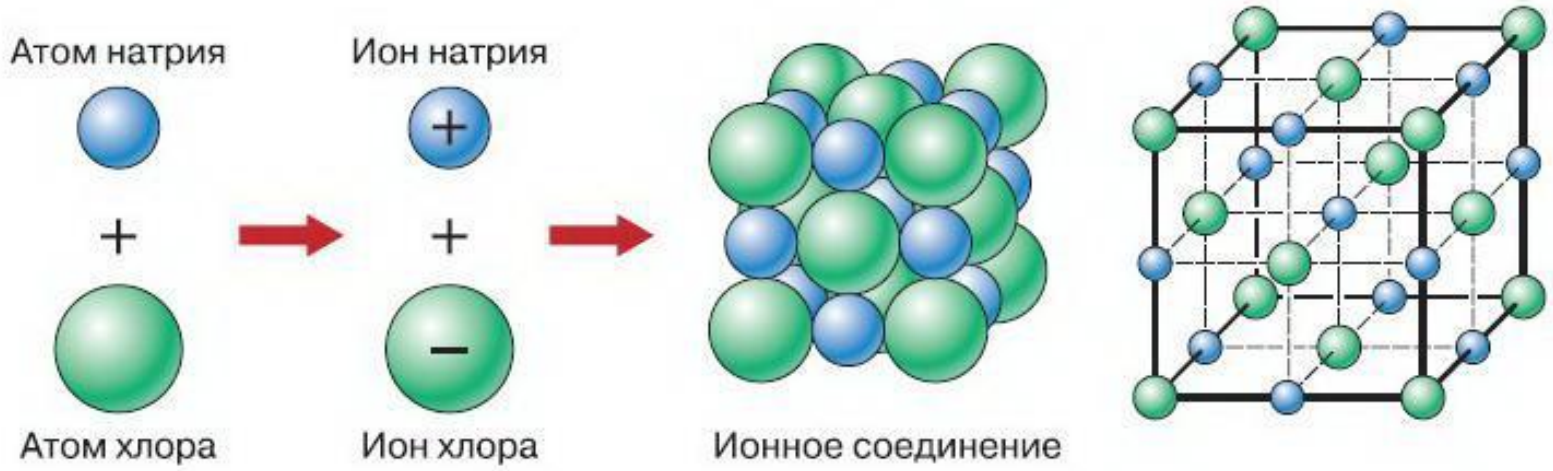
прочная химическая связь, образующаяся между атомами с большой разностью электроотрицательностей, при которой общая электронная пара полностью переходит к атому с большей электроотрицательностью.



Характеризуется:

- повышенной механической прочностью;
- относительно высокой температурой плавления.

Пример ионной связи



Металлическая связь -

Химическая связь, обусловленная наличием относительно свободных электронов.

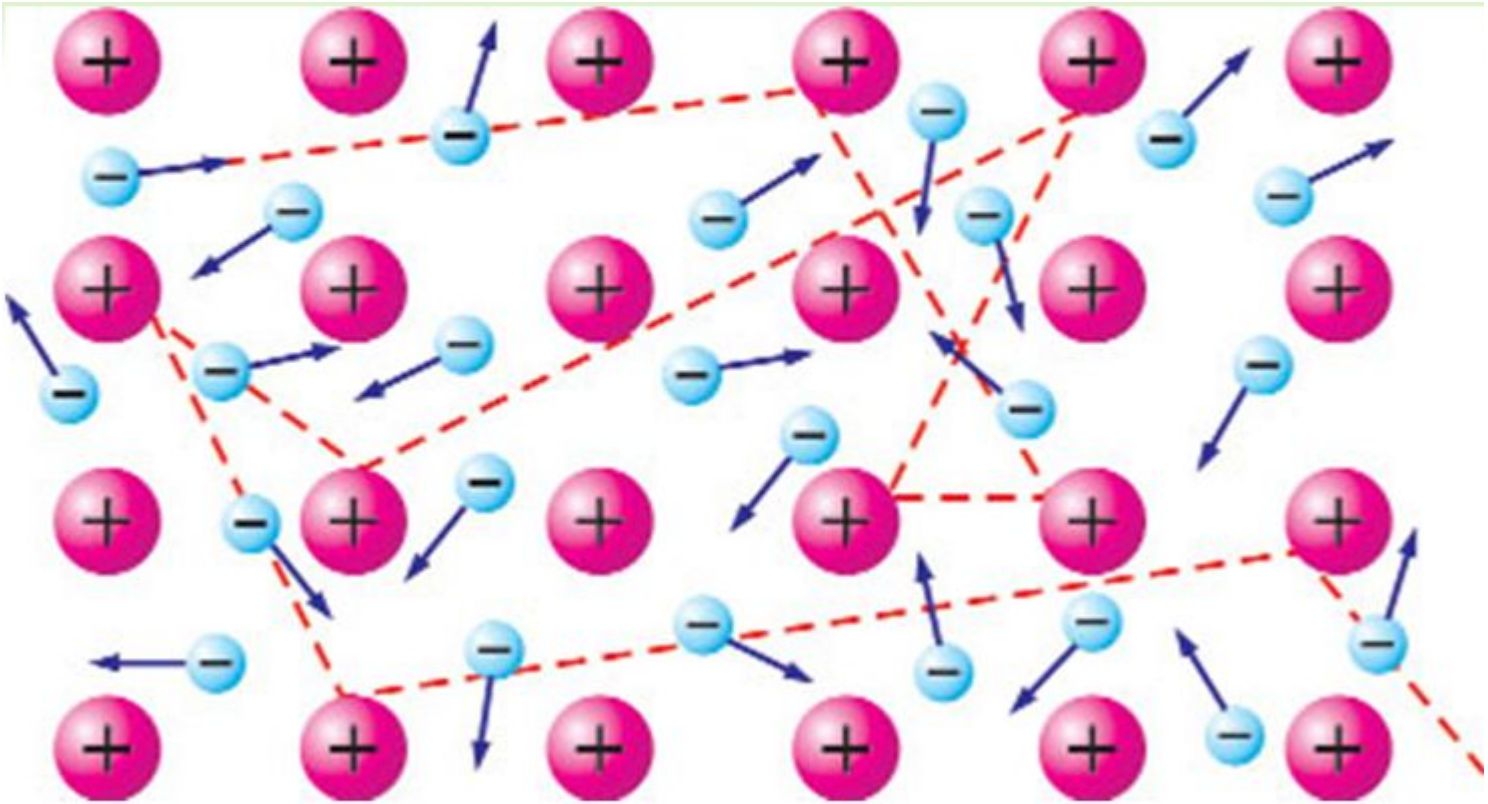
Характерна как для чистых металловХарактерна как для чистых металлов, так и их сплавовХарактерна как для чистых металлов, так и их сплавов и интерметаллических соединений.

Важнейшие свойства:

- высокая электро-высокая электро- и теплопроводность.

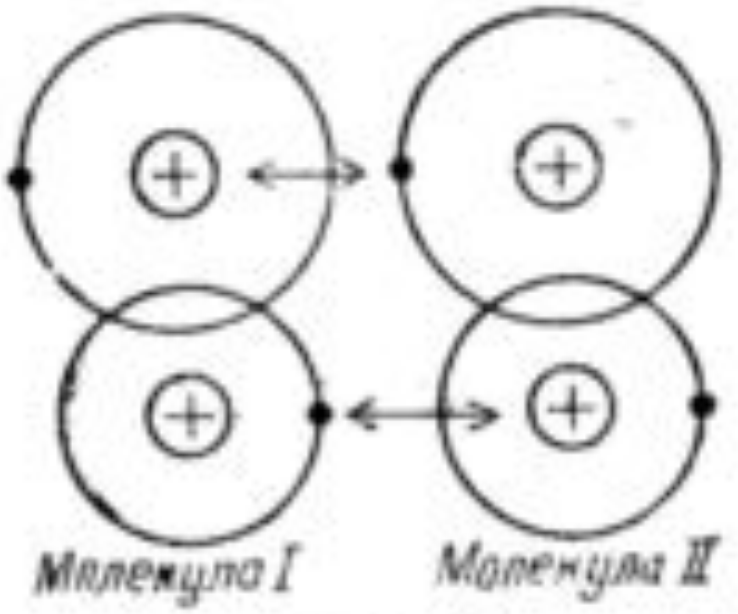
- сочетание прочности с пластичностью, так как при смещении атомов друг относительно друга не происходит разрыв связей.

Пример Me связи

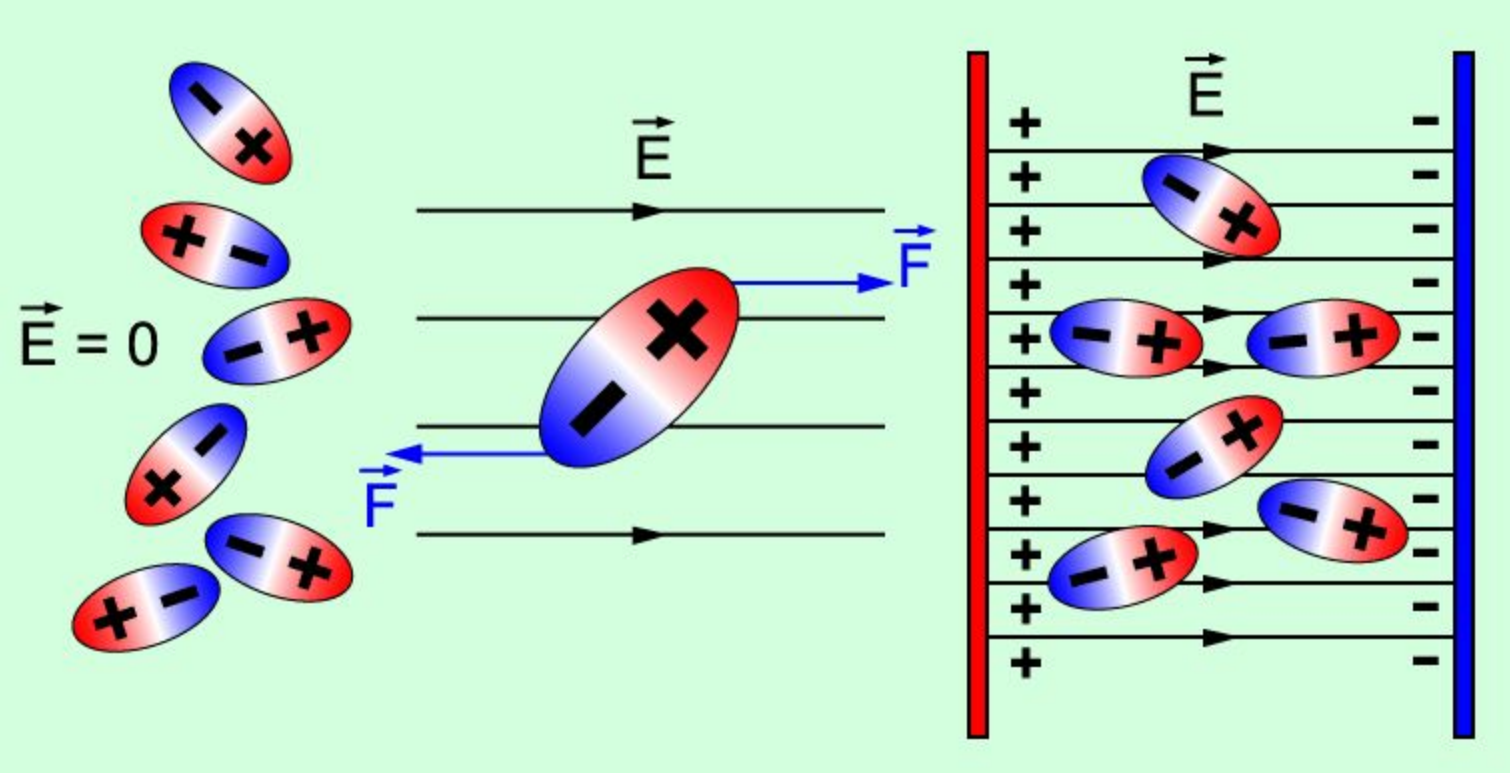


Молекулярная связь -

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



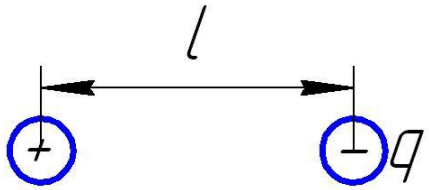
Поляризация – ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул.

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



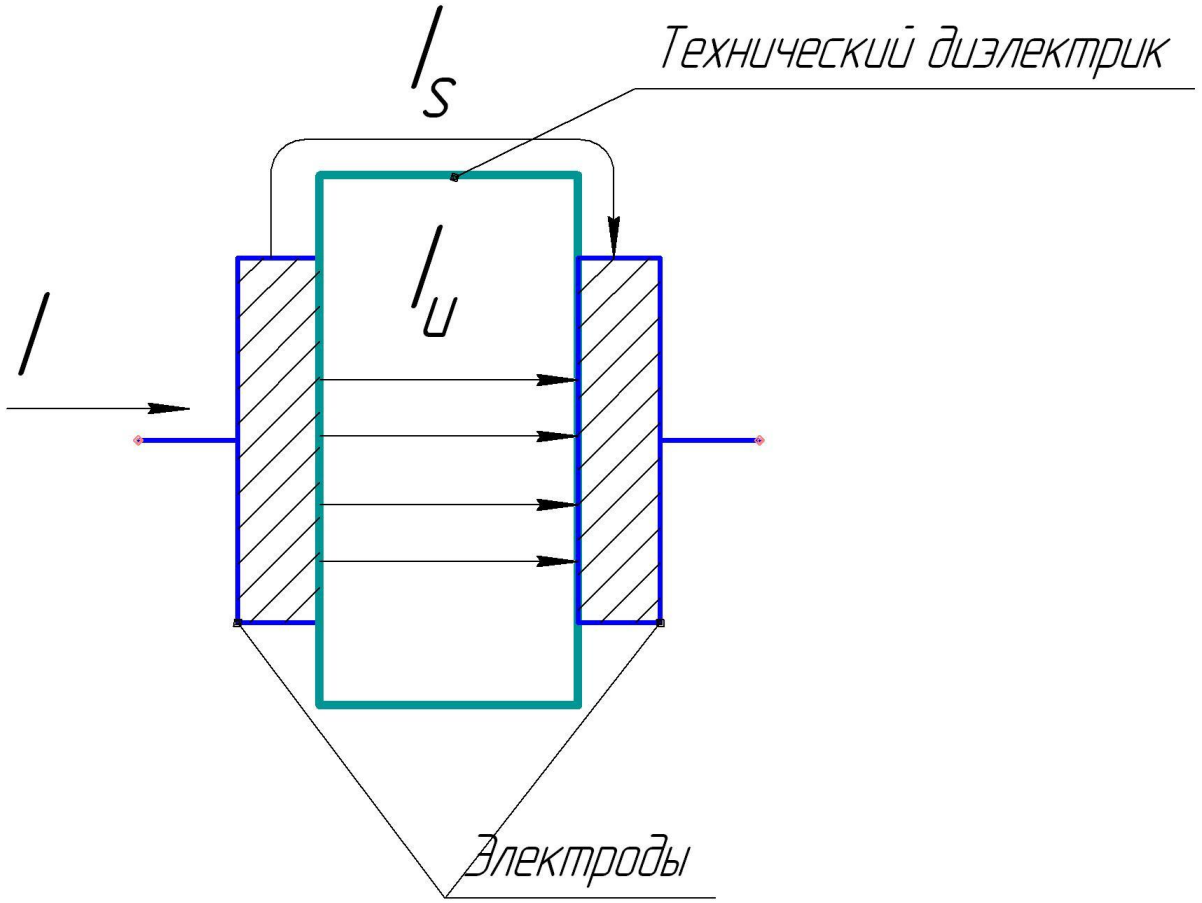
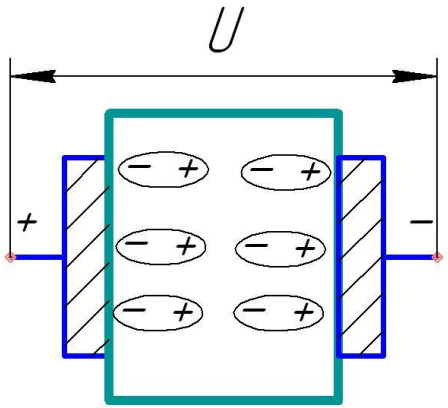


Рисунок 1 – Виды токов проводимости в твердом диэлектрике

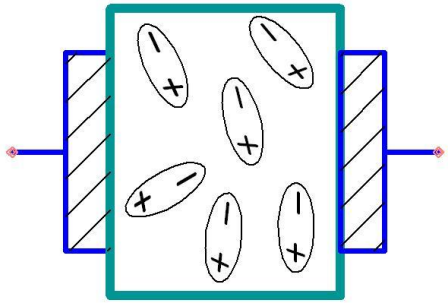
I – ток, подведенный к электродам (ток сквозной проводимости).

I_S – ток поверхностной проводимости;

I_U – ток объемной проводимости.



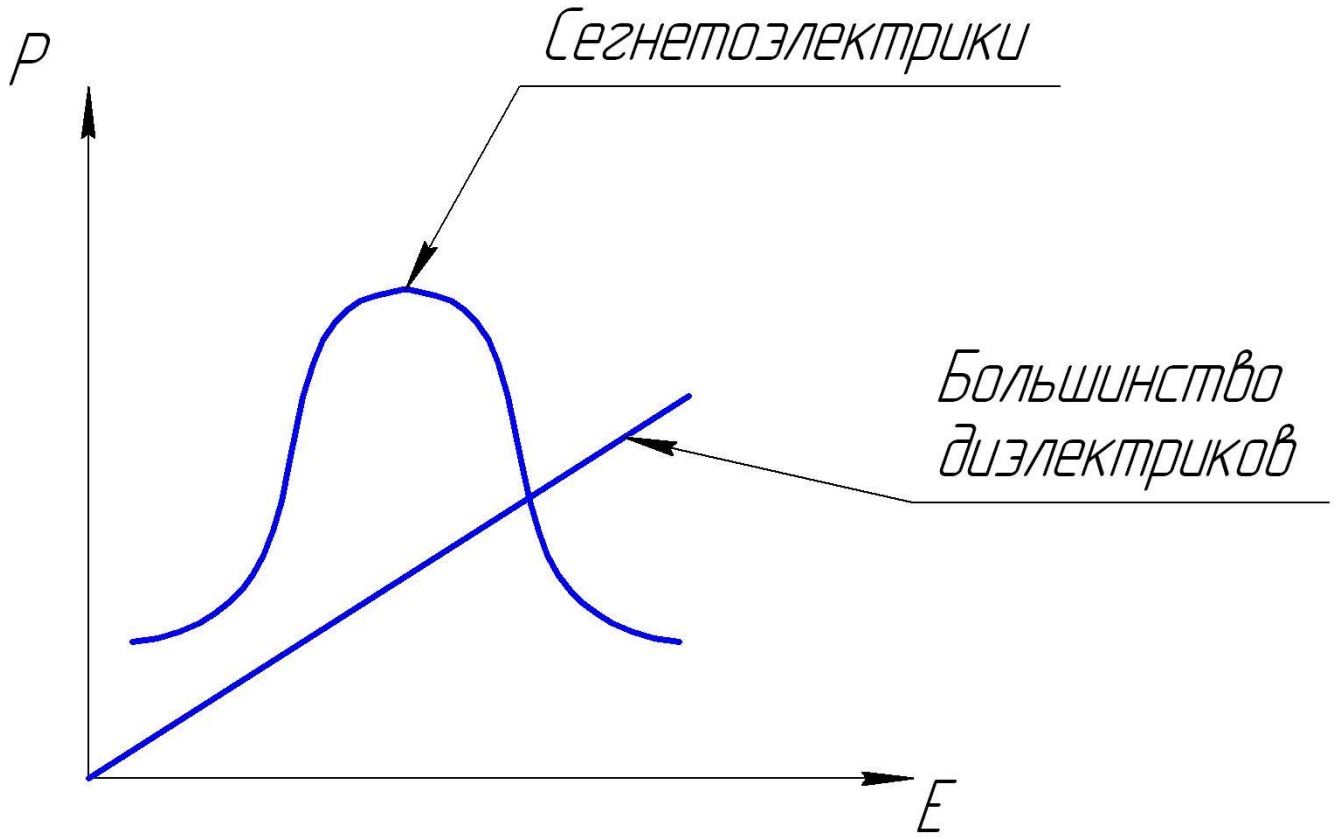
Расположение связанных зарядов под влиянием электрического поля



Расположение связанных зарядов при отсутствии электрического поля

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

При снятии электрического поля заряды возвращаются в исходное состояние.



Линейные диэлектрики

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

Сегнетоэлектрик

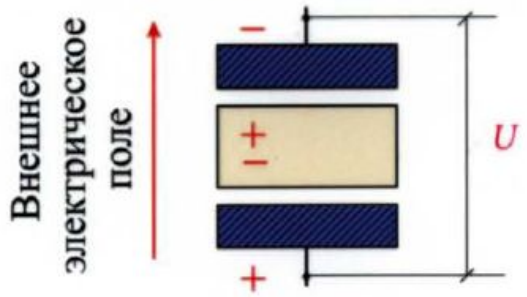
$$P = \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon_0 E}$$

где P- поляризованность;

ε_0 - электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}\ \frac{Ф}{м}$

ε - относительная диэлектрическая проницаемость

Электрическое поле внутри конденсатора



Заряд конденсатора

$$Q = C \cdot U$$

можно представить:

$$Q = Q_o + Q_д \text{ , где}$$

Q_o – между обкладками вакуум;

$Q_д$ – заряд на поверхности диэлектрика.

ε – определяет интенсивность процесса поляризации

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_o} = \frac{Q_o + Q_д}{Q_o} = 1 + \frac{Q_д}{Q_o}$$

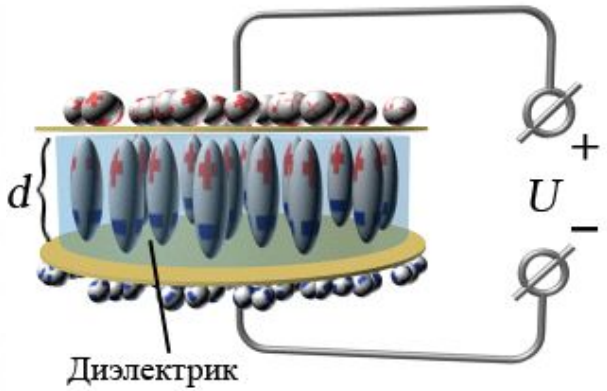
ε – относительная диэлектрическая проницаемость

$\varepsilon = 1$ – только в случае вакуума

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_o} = 1$$

Во всех остальных случаях $\varepsilon > 1$

ε 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

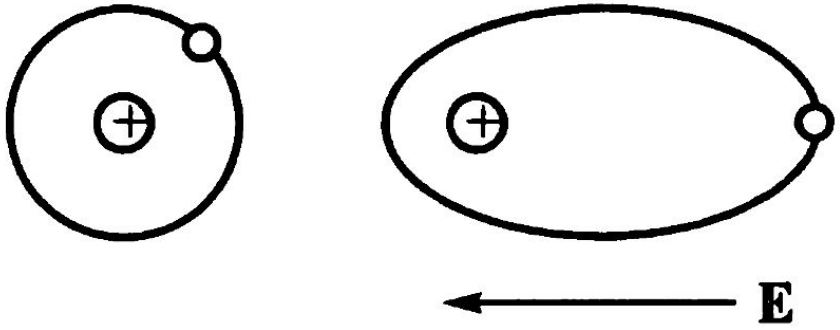
имеют несколько положений равновесия, в которых они в отсутствии электрического поля могут находиться равновероятно. Переход слабосвязанных частиц из одного равновесного положения в другое осуществляется под действием флуктуаций теплового движения.

Релаксационные виды поляризации

строение молекул
Неполярная молекула
Полярная молекула
Поляризации
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)
Характеризуются:
Интенсивностью процесса поляризации.
ε
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.

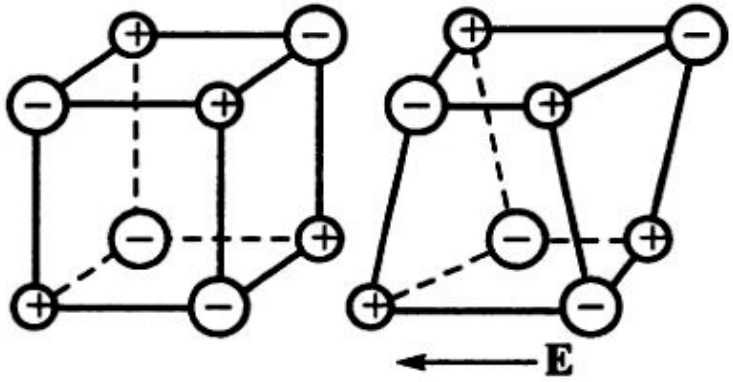


Рис. 2.5. Механизм ионной поляризации на примере NaCl (схематически)

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 переброс слабо связанных ионов.

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

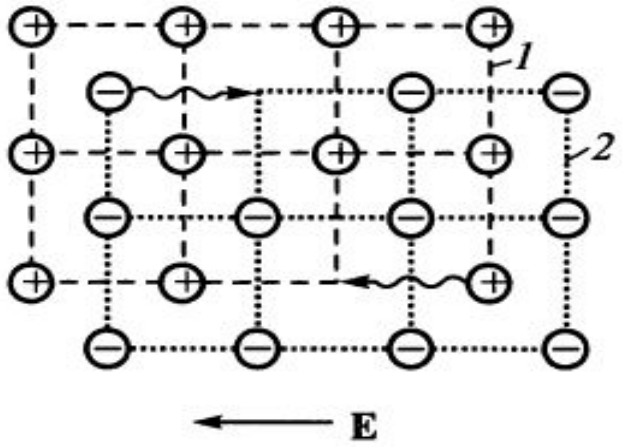


Рис. 2.7. Схематическое изображение ионно-релаксационной поляризации на примере CsCl:
1 — подрешетка ионов цезия Cs^+;
2 — подрешетка ионов хлора Cl^-

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.

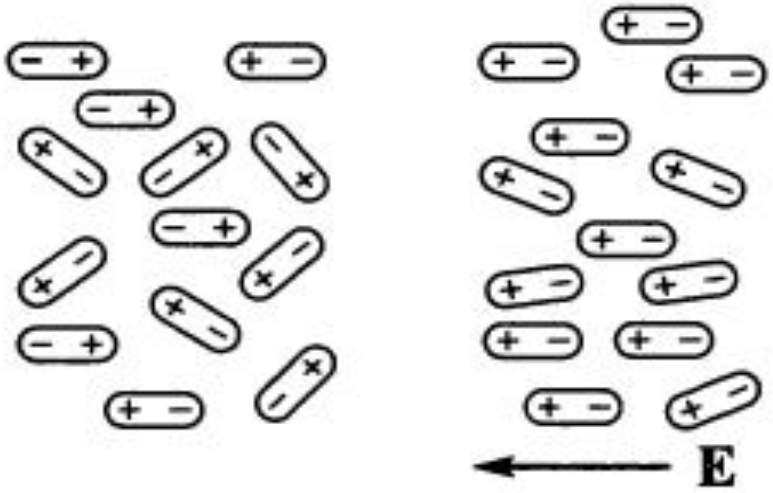


Рис. 2.8. Схематическое изображение дипольно-релаксационной поляризации

Характер дипольно-релаксационной поляризации:

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

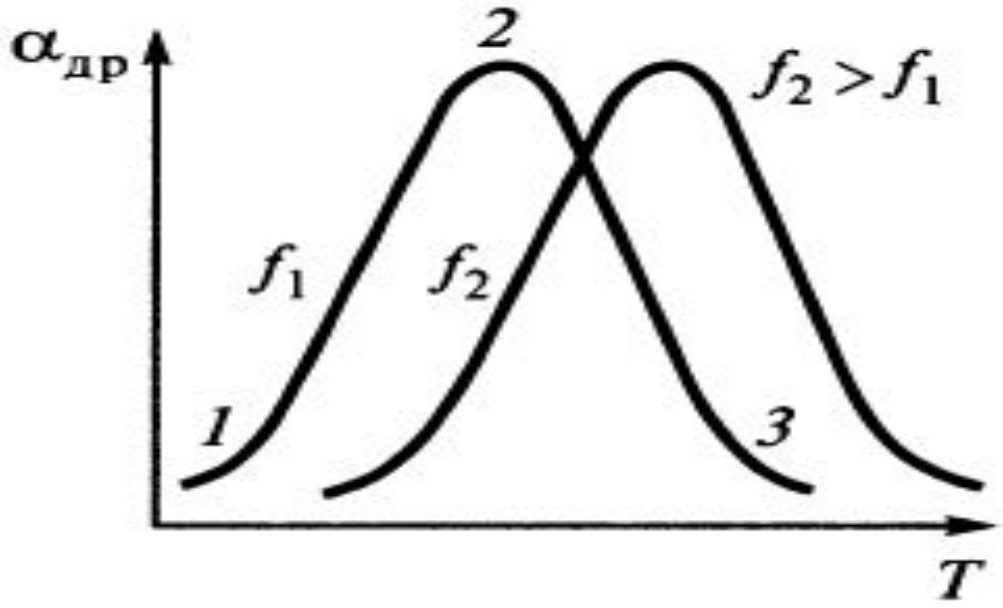


Рис. 2.9. Зависимость дипольно-релаксационной поляризуемости $\alpha_{др}$ от температуры T

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 отсутствии 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.

Классификация диэлектриков по виду поляризации

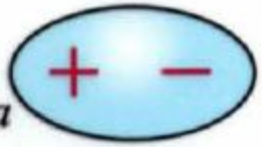
Все·диэлектрики·по·виду·подразделяются·на·несколько·групп.¶

1·группа¤	**2·группа**¤	**3·группа**¤		**4·группа**¤
неполярные·и·слабополярные·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·слабополярные·жидкости·и·газы¤	масляно-канифольные компаунды,·эпоксидные·смолы,·целлюлоза	кварц,·слюда,·каменная·соль¤	фарфор,·миканит	сегнетова·соль·титан·бария¤

Диэлектрическая проницаемость газов

ε водорода = 1,00027

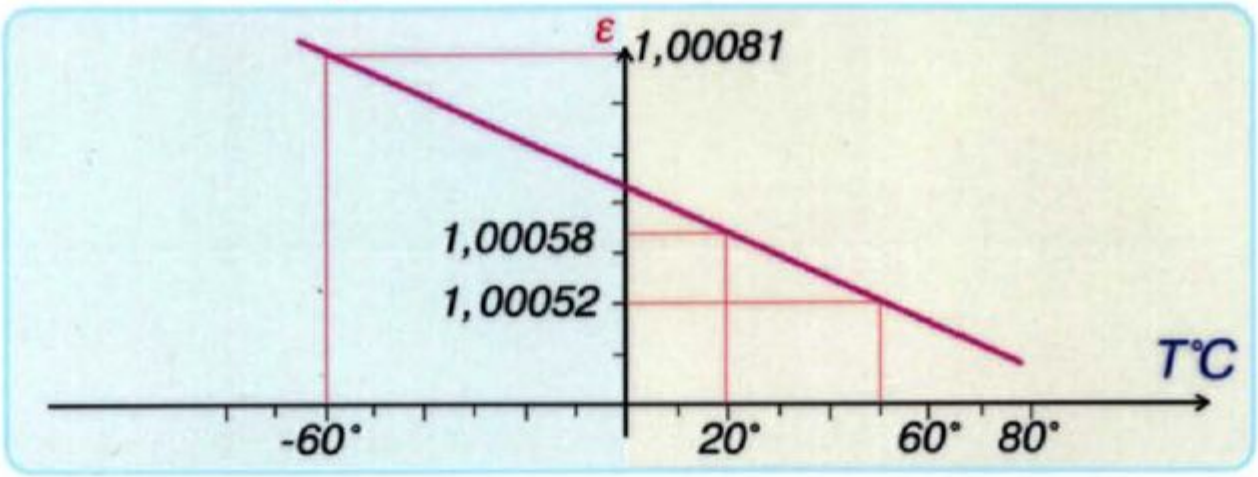
строение молекул



Неполярная молекула → Электронная поляризация

Полярная молекула → Дипольная поляризация

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



Показатель преломления и диэлектрическая проницаемость некоторых газов

Газ	Радиус молекулы, нм	Показатель преломления n	n^2	Диэлектрическая проницаемость ε_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).

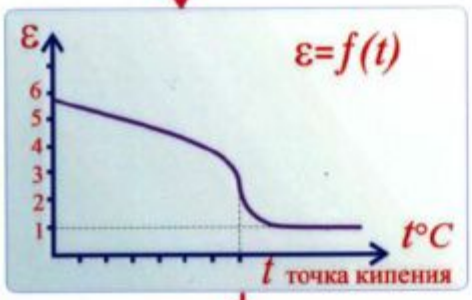
Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков

$\varepsilon \gg 1$, т.к. плотность жидкости n_0 большая величина.

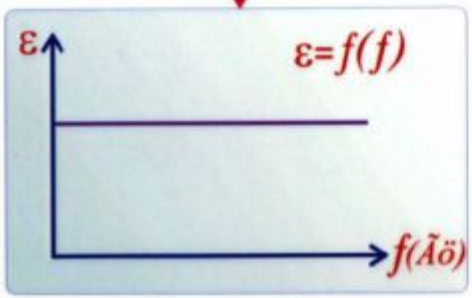
строение молекул

неполярные молекулы (трансформаторное масло)

$\varepsilon = 2{,}1 \div 2{,}5$



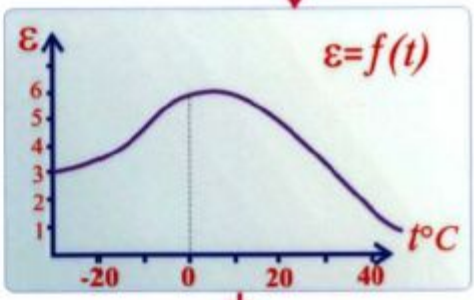
Поляризация – электронная



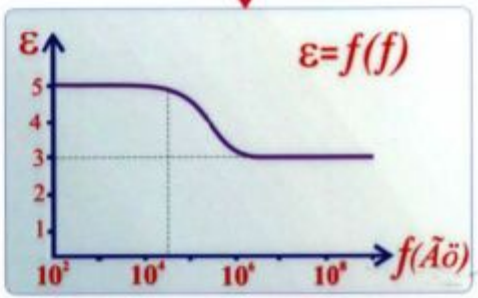
Эти диэлектрики применяются на всех частотах

полярные молекулы (совол)

$\varepsilon = 3{,}5 \div 5$



Поляризации – электронная и дипольная



Эти диэлектрики применяются на низких частотах

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

В твердых диэлектриках возможны все виды поляризации

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

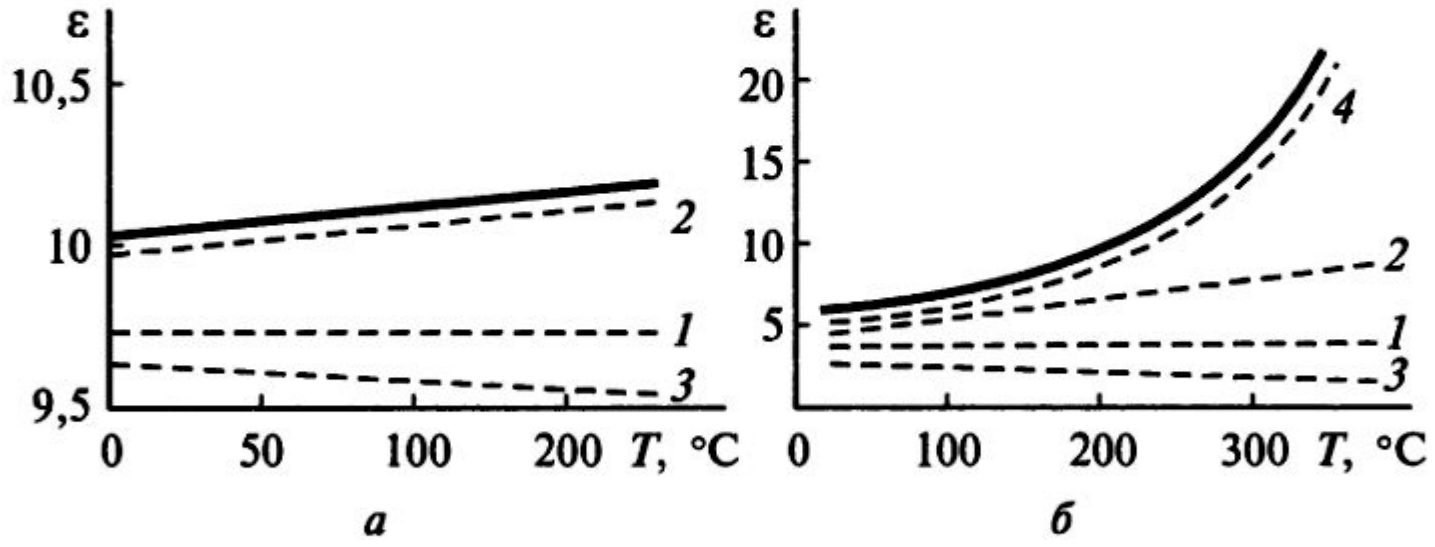
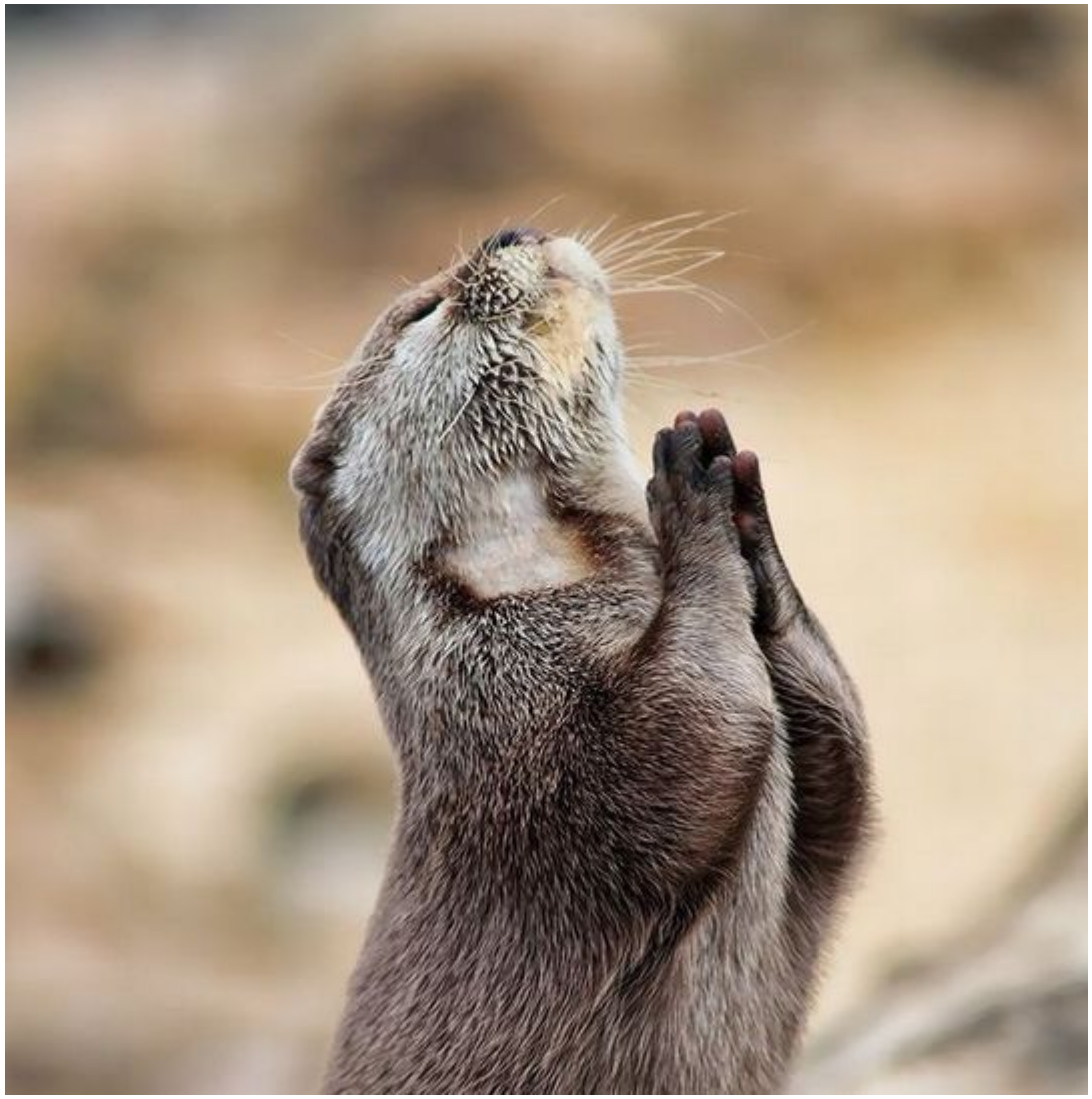


Рис. 2.14. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ε диэлектрика с плотной упаковкой решетки — корунда (*а*) и с неплотной упаковкой решетки — электротехнического фарфора (*б*).

Образующие ε: *1* — $\alpha_э(T)$; *2* — $\alpha_и(T)$; *3* — $n(T)$; *4* — $\alpha_{ир}(T)$