

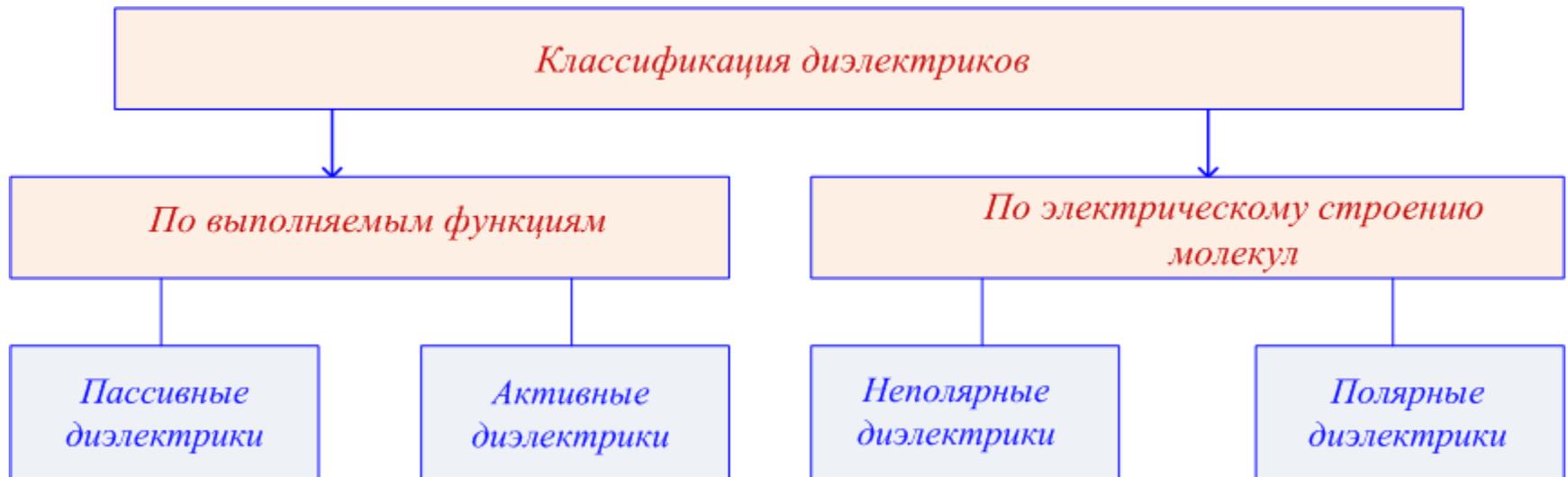
Дисциплина
«Материалы электронной техники»

ТЕМА 3: «Пассивные и активные диэлектрики»

Легостаев Николай Степанович,
профессор кафедры «Промышленная электроника»

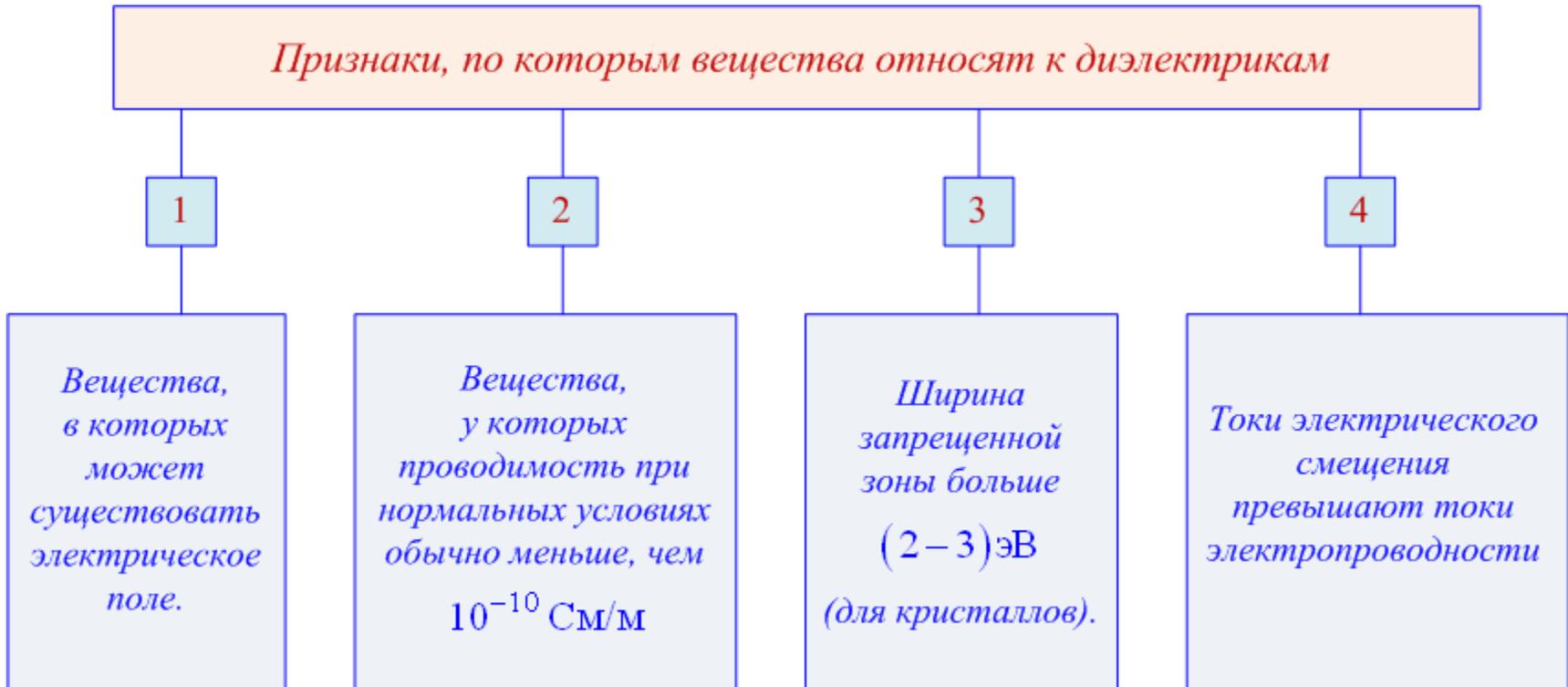
Основные физические процессы в диэлектриках.

По выполняемым функциям диэлектрики делятся на *пассивные диэлектрики* и *активные диэлектрики*. По электрическому строению молекул различают *неполярные* и *полярные диэлектрики*.



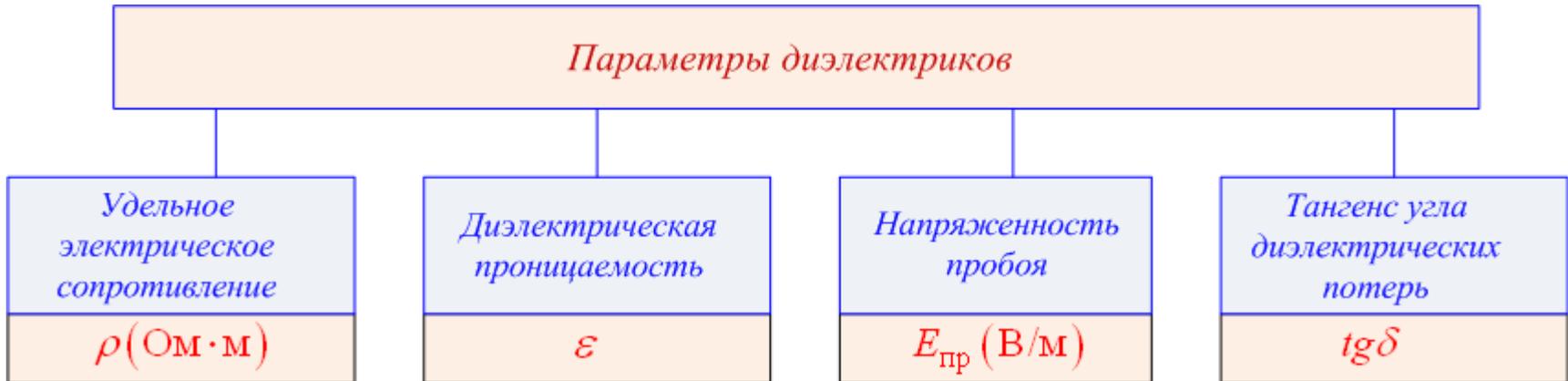
Основные физические процессы в диэлектриках.

К диэлектрикам относят такие вещества, в которых: может существовать электрическое поле; проводимость при нормальных условиях обычно ниже, чем 10^{-10} См/м; ширина запрещенной зоны больше 2–3 эВ (для кристаллов); токи электрического смещения превышают токи электропроводности.



Основные физические процессы в диэлектриках.

Диэлектрики характеризуются рядом электрофизических параметров.



С точки зрения электродинамики диэлектрик представляет собой среду, в которой происходит распространение, накопление и рассеяние электрической энергии. Распространение электромагнитных волн в диэлектрике замедляется в $\sqrt{\varepsilon}$ раз. Накопление энергии в диэлектрике пропорционально величине ε (электрический конденсатор), а рассеяние энергии представляет собой потери, характеризуемые параметром $\text{tg}\delta$ (тангенсом угла диэлектрических потерь).

Основные физические процессы в диэлектриках.

Важнейшим свойством диэлектриков является *электрическая поляризация*.



Основные физические процессы в диэлектриках.

Известно, что для описания поляризации диэлектриков в макроскопической теории вводится вектор поляризованности \mathbf{P} . Поляризованность количественно характеризует меру электрического момента в диэлектрике и зависит как от значения электрического поля, так и от структурных особенностей (химического состава) данного диэлектрика. Поляризованность тем больше, чем выше напряженность электрического поля.

В электрическом поле, приложенном к диэлектрику, связанные электрические заряды смещаются по отношению друг к другу, вследствие чего диэлектрик становится поляризованным. Внешнее электрическое поле индуцирует в частицах диэлектрика элементарные электрические моменты $\vec{p} = q\vec{l}$.

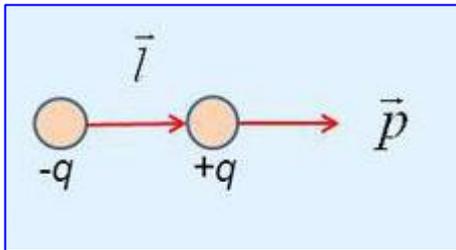
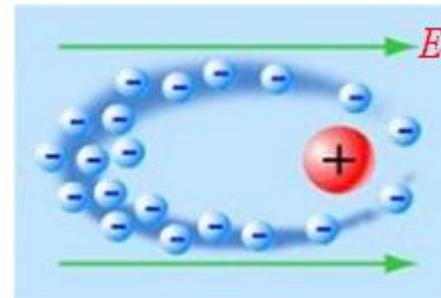
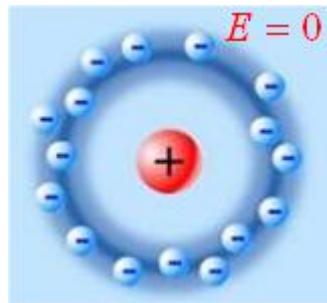


Рисунок 3.1 – Элементарный электрический момент.

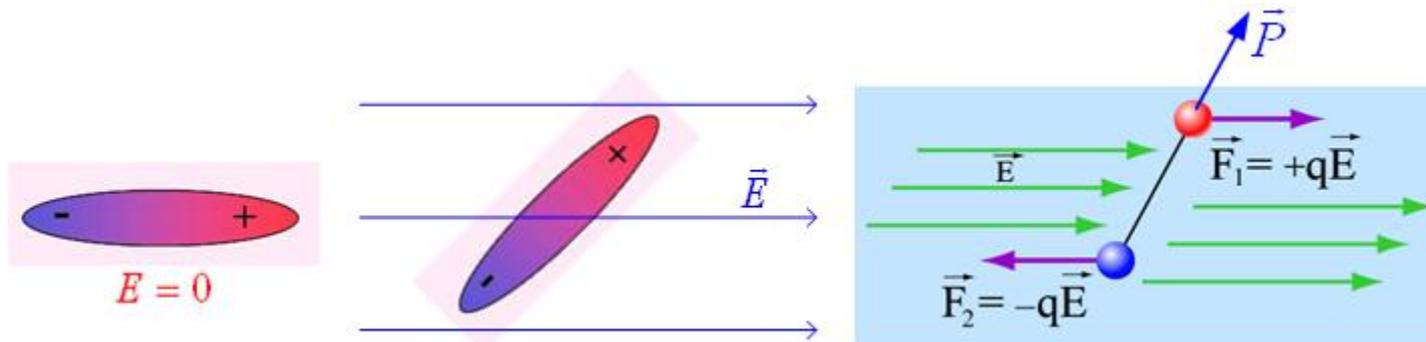
Основные физические процессы в диэлектриках.

В образовании электрического момента, *индуцированного полем*, могут участвовать:

электроны, смещающиеся из равновесных положений в атомах относительно положительно заряженных ядер;



ионы, отклоняющиеся от равновесного состояния в кристаллической решетке;
диполи (полярные молекулы или радикалы), изменяющие свою ориентацию под действием электрического поля.



Основные физические процессы в диэлектриках.

Электроны, ионы и диполи (макродиполи) могут образовывать электрический момент (поляризованное состояние) посредством различных механизмов.

Известны следующие виды поляризации: упругая поляризация (поляризация смещения), тепловая поляризация и миграционная.



Основные физические процессы в диэлектриках.

Если выключить приложенное извне электрическое поле, то отмеченные механизмы поляризации способствуют быстрому возвращению системы в равновесное, неполяризованное состояние. Электроны займут электрически симметричное положение относительно ядер за счет кулоновских сил притяжения к ядру; катионы и анионы вернутся в свое стабильное (равновесное) положение в узлах кристаллической решетки под действием сил отталкивания электронных оболочек ионов. Область «согласованной дипольной поляризации» обычно также возвращается в исходное положение, где механические напряжения для данной системы ориентированных диполей минимальны.

В связи с широким применением в электронике тонких диэлектрических пленок, в которых велика напряженность электрического поля, а также из-за повышения рабочих температур компонентов электронной техники вопрос об электропроводности диэлектриков и связанных с ней явлений старения (деградации) и электрического пробоя является актуальным.

Электропроводность диэлектриков.

Разнообразие типов несвязных заряженных частиц и механизмов их генерации (возбуждения) приводит к тому, что электрический ток в диэлектриках представляет собой достаточно сложное физическое явление. В зависимости от физической природы носителей заряда различают следующие *виды электропроводности диэлектриков*.



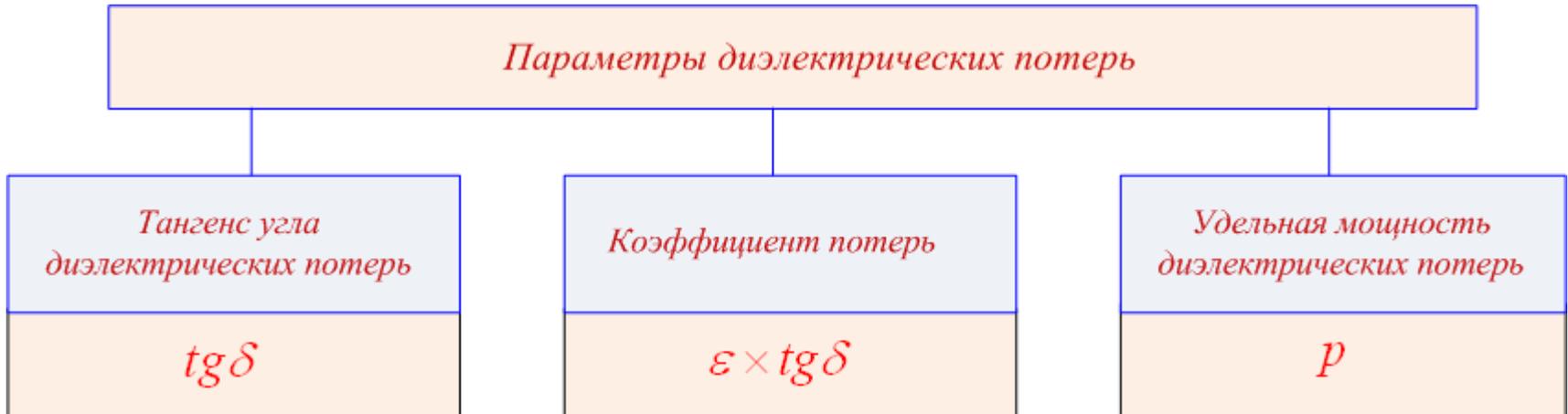
Электрическая прочность диэлектриков.

В сильном электрическом поле в связи с переносом зарядов в диэлектрике происходят необратимые изменения свойств – электрическое старение и пробой, сопровождающийся для твердых диэлектриков разрушением. Пробой наступает при достижении некоторого порогового поля, выше которого электрическая прочность (характеризуемая малым и стационарным током) нарушается. При пробое ток через диэлектрик катастрофически возрастает, и сквозь диэлектрик проходит мощный электрический разряд (искра или дуга).

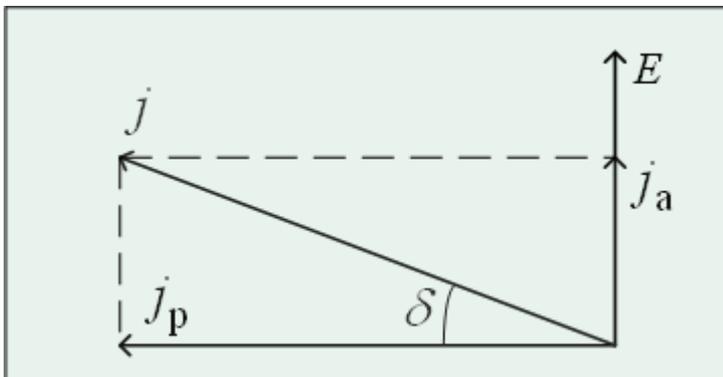
*Развитие пробоя во времени принято разделять на две стадии: **потеря электрической прочности (устойчивости) и разрушение диэлектрика.** На первой стадии пробоя нарушается равновесная стационарность носителей заряда и ток начинает лавинно нарастать. Анализ первой стадии пробоя базируется на расчетах пробивной напряженности диэлектрика и эмпирическом определении **пробивного напряжения.** Характер второй стадии пробоя зависит от физико-химических свойств диэлектрика и мощности источника энергии: при большой мощности источника энергии возникает электрическая дуга, а при малой мощности источника энергии пробой завершается искровым разрядом существенно меньшей разрушительной силы.*

Диэлектрические потери в диэлектриках.

Диэлектрические потери представляют собой ту часть электрической энергии, которая переходит в тепло. Для количественного описания диэлектрических потерь используются следующие параметры.



Диэлектрические потери принято характеризовать углом δ .



j_a – плотность тока проводимости;

j_p – плотность тока смещения.

Рисунок 3.2 – Диаграмма тангенса угла потерь.

Диэлектрические потери в диэлектриках.

Природа поглощения электромагнитной энергии в диэлектрике различна. Наиболее простым механизмом потерь является *рассеяние носителей заряда, участвующих в электропроводности (потери на электропроводность)*. При направленном перемещении электрических зарядов во внешнем электрическом поле (дрейф или диффузия) носители заряда на пути свободного пробега приобретают от электрического поля энергию. Приобретенная энергия тратится при «соударениях» - взаимодействиях с молекулами и атомами вещества, которые находятся в состоянии теплового движения. Отдавая энергию при соударении, носитель заряда повышает интенсивность хаотического движения частиц вещества и, следовательно, повышает температуру диэлектрика. По этой причине электропроводность увеличивает коэффициент потерь, тангенс угла диэлектрических потерь и мощность рассеяния энергии в единице объема диэлектрика.

Различают и другие виды диэлектрических потерь - *релаксационные, ионизационные, резонансные, поляризационные*.

Пассивные диэлектрики.

Зависимость поляризованности от напряженности электрического поля $P(E)$ для большинства диэлектриков, если электрическое поле невелико, носит линейный характер, а $\varepsilon(E) = \text{const}$. Это свойство используют в пассивных диэлектриках.

Классификация пассивных диэлектриков по механизму поляризации молекул

Неполярные диэлектрики

Углеводороды, нефтяные масла, полиэтилен, полистирол и другие.

Полярные диэлектрики

Феноло-формальдегидные и эпоксидные смолы, кремнийорганические соединения, хлорированные углеводороды и другие.

Ионные соединения

Твердые неорганические диэлектрики с ионным типом химических связей.

Пассивные диэлектрики.

Нефтяные масла (трансформаторное, конденсаторное) – неполярные жидкие диэлектрики с электронной поляризацией и ионной проводимостью)

*Трансформаторное масло.
Электрофизические характеристики.*

Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2,1 - 2,5$.

Удельное электрическое

сопротивление $\rho = (10^{11} - 10^{13}) \text{ Ом} \cdot \text{ м}$.

Тангенс угла диэлектрических

потерь $\text{tg } \delta = 20 \cdot 10^{-4}$.

Напряженность пробоя $E_{\text{пр}} = (20 - 25) \text{ МВ/м}$.

*Конденсаторное масло.
Электрофизические характеристики.*

Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2,1 - 2,3$.

Удельное электрическое

сопротивление $\rho = (10^{14} - 10^{15}) \text{ Ом} \cdot \text{ м}$.

Тангенс угла диэлектрических

потерь $\text{tg } \delta = (3 - 5)10^{-4}$.

Напряженность пробоя $E_{\text{пр}} = (25 - 30) \text{ МВ/м}$.

Конденсаторное масло имеет более низкие диэлектрические потери и более высокую электрическую прочность.

Пассивные диэлектрики.

Твердые неорганические диэлектрики

Слюда

Стекла

Керамика

Ситаллы

Оксидные стекла
на основе SiO_2 ,
 B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5

Стекла
технического
назначения

Электровакуумные
стекла

Изоляторные
стекла

Лазерные стекла

Стекловолокно

Установочная
керамика

Корундовая
керамика

Брокерит

Цельзиановая
керамика

Стеатитовая
керамика

Форстеритовая
керамика

Конденсаторная
керамика

Титановая
керамика

Титано-циркониевая
керамика

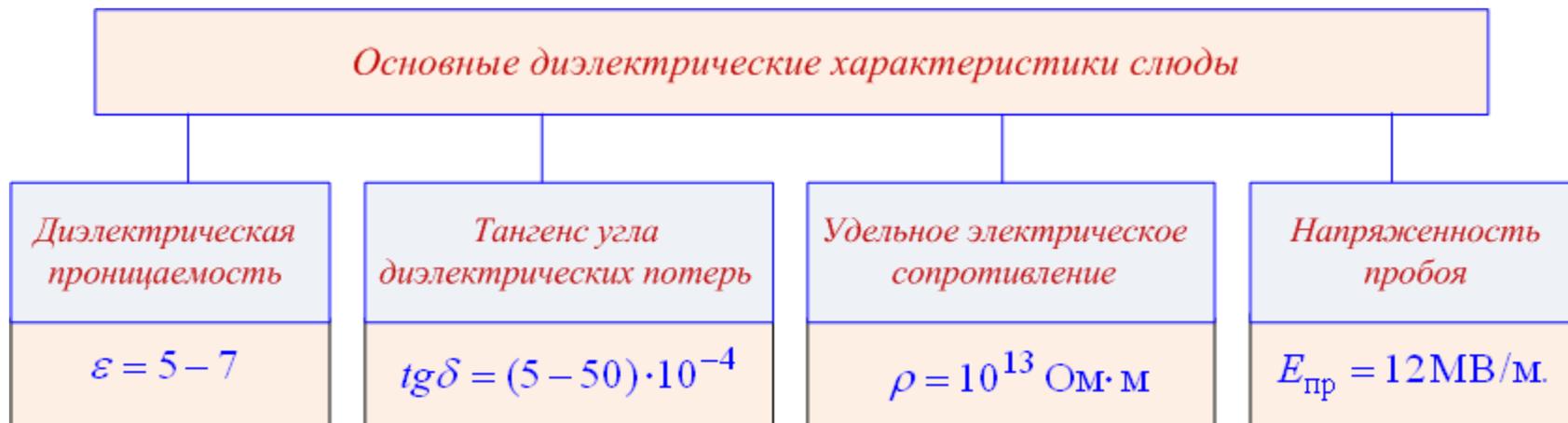
Лантановая
керамика

Станнатная
керамика

Пассивные диэлектрики.

Слюда – минерал ионно-кристаллического строения, является важнейшим из природных электроизоляционных материалов, обладает высокими электроизоляционными свойствами, высокой стойкостью к нагреванию, механической прочностью, гибкостью.

Синтетическая слюда в отличие от природной не содержит химически связанной воды и загрязняющих примесей и поэтому значительно превосходит природную слюду по стойкости к нагреванию и электрическим свойствам, но более хрупкая, менее гибкая и более дорогая. Вследствие ярко выраженной кристаллографической анизотропии диэлектрические свойства слюды зависят от направления электрического поля.



Пассивные диэлектрики.

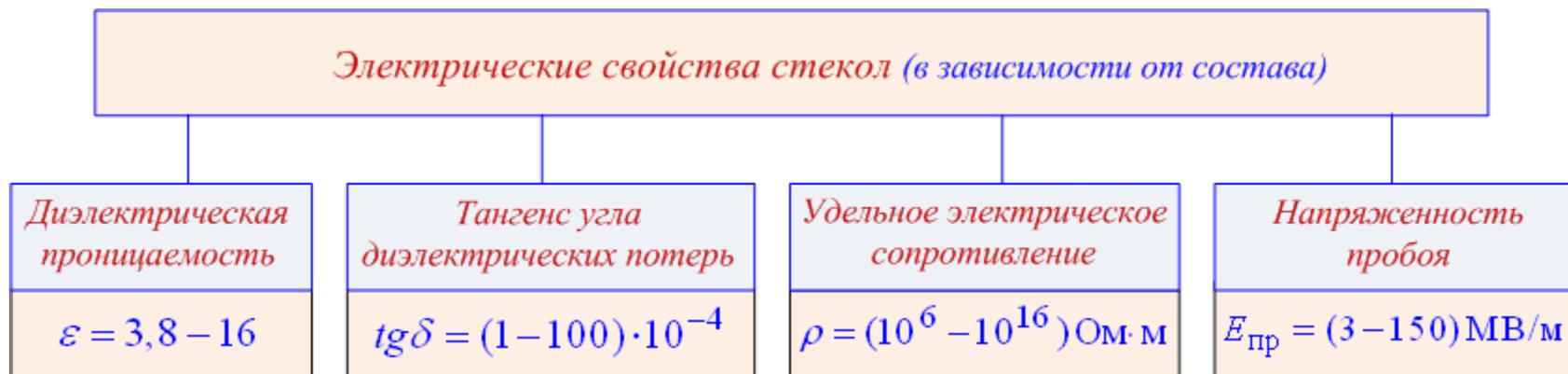
Стекла – неорганические твердые вещества, в которых отсутствует дальний порядок в расположении частиц. Диэлектрическими свойствами обладают только оксидные стекла на основе SiO_2 , B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 .

Наибольшее распространение получили **силикатные стекла на основе двуокиси кремния SiO_2** :

щелочные стекла, которые, помимо стеклообразующих оксидов, содержат оксиды щелочных металлов (Na_2O , K_2O), отличаются пониженными электрическими свойствами, невысокой стойкостью к нагреванию, но легко обрабатываются;

бесщелочные стекла не содержат оксидов щелочных металлов, обладают более высокой стойкостью к нагреванию и высокими электрическими свойствами;

щелочные стекла с добавлением оксидов тяжелых металлов (например, свинца и бария) удовлетворительно обрабатываются, а по электрическим свойствам приближаются к бесщелочным стеклам.



Пассивные диэлектрики.

Из стекол следует отметить кварцевое стекло. По электрическим параметрам **кварцевое стекло** относится к лучшим высокочастотным диэлектрикам. Из всех стекол кварцевое стекло (чистая двуокись кремния) имеет самое большое удельное сопротивление. Высокая прозрачность для излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области делают кварцевое стекло ценным оптическим материалом. Температурный коэффициент линейного расширения кварцевого стекла имеет самое малое значение из всех известных веществ. Предел прочности на растяжение и сжатие значительно выше, чем у других стекол. Кварцевое стекло очень стойко к нагреванию (до 1000°C).



Пассивные диэлектрики.

Электровакуумное стекло применяется для изготовления электровакуумных приборов. По химическому составу электровакуумные стекла относятся к группе силикатных ($B_2O_3 + SiO_2$) или алюмосиликатных ($Al_2O_3 + SiO_2$) с добавками щелочных оксидов. *Определяющим параметром для электровакуумного стекла является температурный коэффициент линейного расширения.* Поскольку стекла являются материалом с малым значением температурного коэффициента линейного расширения, то в стекла удается впаивать только такие металлы или металлические сплавы, для которых величина температурного коэффициента линейного расширения близка величине температурного коэффициента линейного расширения стекла. *Электровакуумные стекла подразделяются на платиновые, молибденовые и вольфрамовые стекла. Названия определяются не составом стекла, а температурными коэффициентами линейного расширения стекла и соответствующего металла.*

Изоляторные стекла используются для герметизации выводов элементов электронной техники, например, конденсаторов, диодов, транзисторов.

Лазерные стекла применяются в качестве рабочего тела в твердых лазерах. *Преимущества лазерных стекол перед монокристаллами – оптическая однородность, изотропность свойств, высокая технологичность, низкая теплопроводность.*

Пассивные диэлектрики.

Керамика – материал электронной техники (керамический материал), полученный спеканием порошкообразных неорганических веществ. По структуре керамический материал состоит из кристаллической фазы, участки которой сцементированы аморфной стекловидной фазой.

По применению различают **установочную керамику** (корундовая керамика, брокерит, цельзиановая керамика, стеатитовая керамика, форстеритовая керамика) и **конденсаторную керамику** (титановая, титано-циркониевая, лантановая, станнатная).

Установочная керамика используется для изготовления корпусов и подложек резисторов, интегральных микросхем, дискретных транзисторов, диодов и других элементов электронной техники.

Конденсаторная керамика используется для производства низкочастотных и высокочастотных конденсаторов. Для конденсаторной керамики характерны высокая диэлектрическая проницаемость ϵ , слабая зависимость ϵ от температуры, малые диэлектрические потери, минимальная зависимость диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь от напряженности электрического поля, высокие значения удельного электрического сопротивления и напряженности пробоя.

Пассивные диэлектрики.

Ситаллы – стеклокристаллические материалы, получаемые путем стимулированной кристаллизации стекол. В качестве катализаторов кристаллизации используют TiO_2 , FeS , B_2O_3 , Cr_2O_3 , V_2O_5 , фториды и фосфаты щелочных и щелочноземельных металлов. Структура ситаллов представляет собой смесь мелких (0,1...1мкм) беспорядочно ориентированных кристаллов (60...95% кристаллической фазы) в окружении остаточного стекла (5..40% аморфной фазы). По строению ситаллы занимают промежуточное положение между стеклами и керамикой. Ситаллы отличаются от стекол тем, что имеют в основном кристаллическое строение, а от керамики – значительно меньшим размером кристаллических зерен.

Ситаллы применяются для изготовления подложек интегральных микросхем, тонкопленочных резисторов, деталей электровакуумных приборов, конденсаторов и других дискретных элементов электронной техники.

Для ситаллов характерны повышенная механическая прочность, которая мало изменяется при нагреве до 700...900°C, высокая теплопроводность и **удовлетворительные электрические параметры:**

$$\varepsilon = 3,8 - 16; \quad tg \delta = (1 - 100) \cdot 10^{-4}; \quad \rho = 10^6 - 10^{16}; \quad E_{пр} = (30 - 150) \text{ МВ/м.}$$

Пассивные диэлектрики.

Органические твердые диэлектрики на основе полимеров – высокомолекулярных соединений, молекулы которых состоят из большого числа повторяющихся звеньев, соединенных химическими связями. Многие полимеры называют смолами, по аналогии с природными смолами за их способность проявлять клейкость при нагреве. **Полимеры получают** из простых веществ путем **полимеризации** или **поликонденсации**. **Основа строения полимера** – **макромолекула**, в которой различают главную цепь и боковые группы.

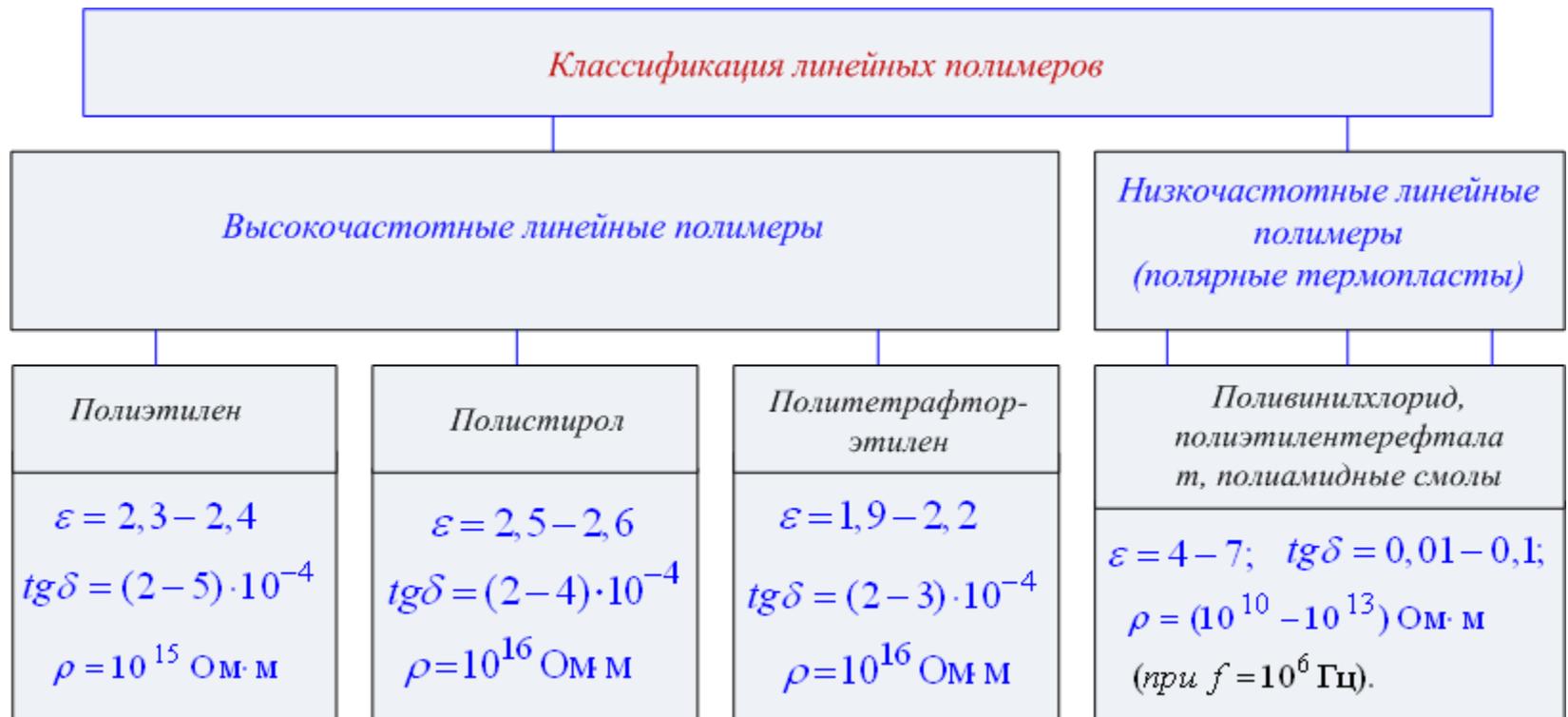


Пассивные диэлектрики.

Свойства линейных и пространственных полимеров *существенно отличаются*.

Линейные полимеры эластичные, при повышении температуры размягчаются и расплавляются, растворяются в специальных растворителях.

Пространственные полимеры обладают повышенной прочностью, твердостью, при высоких температурах происходят необратимые структурные изменения (растрескивание, обугливание и т.п.) с потерей электроизоляционных свойств, нерастворимы.



Активные диэлектрики.

Т а б л и ц а 3.1 – Основные эффекты в активных диэлектриках

[Поплавко Ю.М. Физика активных диэлектриков: учеб. пособие / Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева, И.П. Раевский; под. ред. проф. В.П. Сахненко. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 480 с. – ISBN 978-5-9275-0636-1]

<i>Воздействие</i>	<i>Отклик</i>				
	<i>Электрический</i>	<i>Магнитный</i>	<i>Механический</i>	<i>Тепловой</i>	<i>Изменение оптических свойств</i>
<i>Электрическое поле</i>	<i>Поляризация, электрический ток</i>	<i>Электромагнитный эффект</i>	<i>Обратный пьезоэффект</i>	<i>Электрокалорический эффект</i>	<i>Электрооптический эффект</i>
<i>Магнитное поле</i>	<i>Магнитоэлектрический эффект</i>	<i>Намагничивание</i>	<i>Магнитострикция</i>	<i>Магнитокалорический эффект</i>	<i>Магнитооптический эффект</i>
<i>Механическое напряжение</i>	<i>Прямой пьезоэффект</i>	<i>Пьезомагнитный эффект</i>	<i>Деформация</i>	<i>Упруго-тепловой эффект</i>	<i>Фотоупругий эффект</i>
<i>Изменение теплоты</i>	<i>Пироэлектрический эффект</i>	<i>Термомагнитный эффект</i>	<i>Термическое расширение</i>	<i>Теплоемкость</i>	<i>Термооптический эффект</i>
<i>Свет</i>	<i>Фотовольтаический эффект</i>	<i>Фотомагнитный эффект</i>	<i>Фотострикция</i>	<i>Поглощение света</i>	<i>Преломление и отражение</i>

Активные диэлектрики. Пьезоэлектрические и электрострикционные материалы.

В электрическом поле в диэлектриках возникают различные электромеханические эффекты: «свободный» кристалл под действием поля деформируется, а в «зажатом» кристалле возникают упругие напряжения. Физической причиной электромеханических эффектов являются микроскопические смещения электрических зарядов в приложенном электрическом поле – **электрическую поляризацию непременно сопровождают механические эффекты**. Характер зависимости электрически индуцированной механической деформации от напряженности электрического поля определяется симметрией структуры диэлектрика.

В диэлектриках с центросимметричной структурой знак возникающей в электрическом поле деформации (сжатие или растяжение) не зависит от направления электрического поля. Этот эффект называется **электрострикцией**, которая имеет место во всех диэлектриках без исключения. При этом в большинстве диэлектриков в направлении приложенного поля происходит механическое растяжение, но эффект электрострикции весьма мал.

В диэлектриках с нецентросимметричной структурой наблюдается выраженный электромеханический эффект – **пьезоэлектричество**. В случае пьезоэффекта при перемене направления приложенного извне электрического поля **знак индуцированной им механической деформации (x)** изменяется на противоположный (**$x > 0$ – растяжение; $x < 0$ – сжатие**). Кроме того, такой электромеханический эффект обратим – механическое напряжение вызывает электрическую поляризацию. Следовательно, **пьезоэлектрик преобразует механическую энергию в электрическую, а электрическую энергию – в механическую**.

Активные диэлектрики. Пьезоэлектрические и электрострикционные материалы.

Различают *прямой пьезоэлектрический эффект* (при воздействии механического напряжения возникает электрическая поляризация) и *обратный пьезоэлектрический эффект* (электрическое поле деформирует нецентросимметричный кристалл). Величина деформации кристалла *линейно* изменяется с изменением величины напряженности электрического поля: $x = d \cdot E$.

Этот признак *отличает обратный пьезоэффект от электрострикции*, при которой деформация диэлектрика, вызванная электрическим полем, находится в квадратичной зависимости от величины электрического поля: $x = R \cdot E^2$ – *электрострикционная деформация не изменяется с изменением направления электрического поля.*

Электрострикция отличается от пьезоэффекта еще и тем, что не имеет обратного эффекта, то есть эффект является исключительно электромеханическим. Следует отметить, что если для проявления пьезоэффекта диэлектрик непременно должен быть нецентросимметричным, то *электрострикция* не имеет ограничений по симметрии и *проявляется в любых диэлектриках.*

Активные диэлектрики. Пьезоэлектрические и электрострикционные материалы.

Пьезоэлектрические и электрострикционные материалы

Монокристаллы кварца

*Недостатки: низкое значение пьезомодуля.
Достоинства: высокая механическая добротность, температурная и временная стабильность параметров.*

Сегнетоэлектрические кристаллы

Дигидрофосфат калия

Сегнетовая соль

Сульфат лития

Вследствие гигроскопичности, малой прочности, температурной и временной нестабильности параметров практически полностью вытеснены пьезокерамикой (сегнетопьезокерамическими материалами) на основе титаната бария и твердых растворов цирконата-титаната свинца.

Активные диэлектрики. Пироэлектрики и электреты.

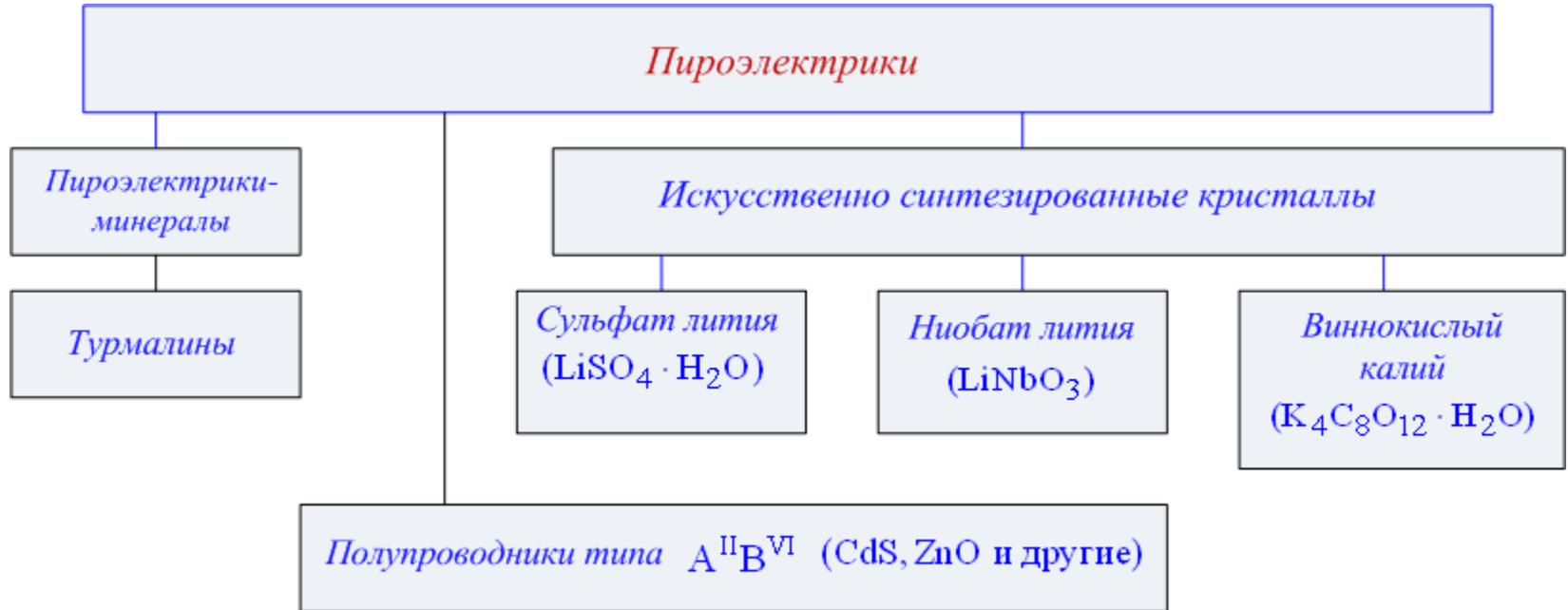
Пироэлектрический эффект обусловлен температурным изменением *спонтанной* (самопроизвольной) *поляризации полярных кристаллов*, однако подобный эффект может быть искусственно индуцирован в любых твердых диэлектриках, если к ним приложено извне электрическое поле.

В некоторых диэлектриках электрическая поляризация может длительно существовать в отсутствие приложенного извне электрического поля. Это поляризованное состояние может быть как энергетически выгодным (стабильным и весьма устойчивым к внешним воздействиям), так и существовать в виде метастабильного состояния (которое может быть нарушено). В первом случае поляризация называется *спонтанной*, а во втором случае – *остаточной*.

В спонтанно поляризованных диэлектриках тепловая энергия может непосредственно превращаться в электрическую энергию за счет *пироэлектрического эффекта*, то есть за счет изменения собственной поляризации диэлектриков при их нагревании или охлаждении. Таким образом, ***пироэлектрик представляет собой твердотельный преобразователь энергии – теплоэлектрический (или электротепловой) преобразователь энергии.***

Пироэлектрическая поляризация проявляется при изменении температуры полярного вещества. При подключении к пироэлектрическому элементу сопротивления через сопротивление протекает *пироэлектрический ток*. В случае разомкнутого кристалла на кристалле появляется *пироэлектрическое напряжение*. Если температура кристалла не изменяется, то пироэлектрический ток (или пироэлектрическое напряжение) постепенно уменьшается.

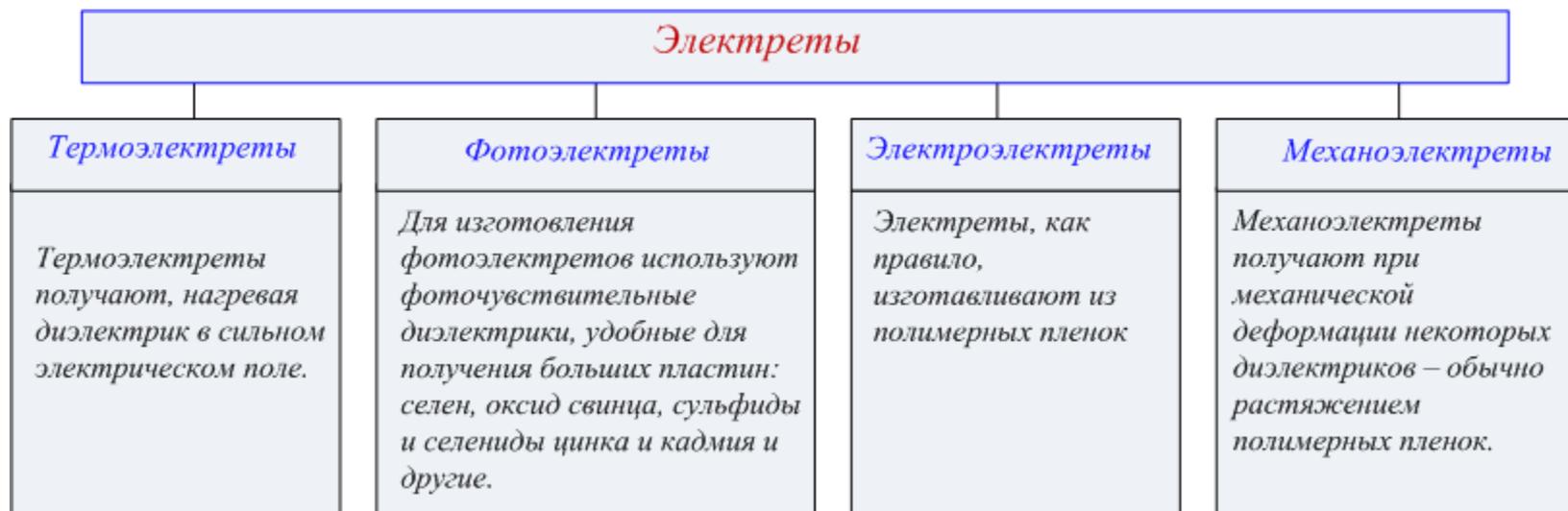
Активные диэлектрики. Пироэлектрики и электреты.



Твердые диэлектрики, в которых искусственно получено и длительное время сохраняется поляризованное состояние (остаточная поляризация) и которые способны создавать в окружающем пространстве постоянное электрическое поле, называются электретами.

Активные диэлектрики. Пироэлектрики и электреты.

Способы формирования электретов различны. Обычным технологическим способом создания остаточной поляризации является использование дополнительного активизирующего воздействия на диэлектрик (кроме сильного электрического поля). В зависимости от вида дополнительного к полю активизирующего воздействия (нагрев, освещение, радиация, магнитное поле, механическое растяжение) электреты классифицируются на **термоэлектреты, фотоэлектреты, электроэлектреты, механоэлектреты и другие.**

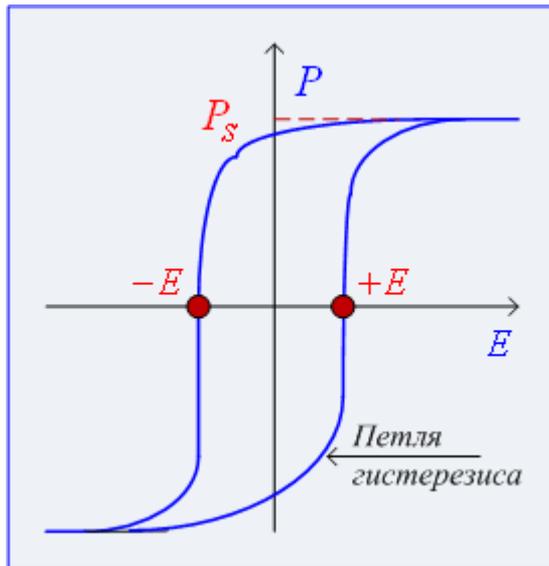


К термоэлектретным материалам относятся: **керамические материалы** (титанаты кальция и стронция, рутил и другие), **стекла, ситалы, различные монокристаллы** (оксиды, фториды, халькогениды); **сегнетокерамика** (преимущественно цирконат-титанат свинца), температурная поляризация которой обусловлена ориентацией доменов; **полимерные материалы**, изготавливаемые по технологии термоэлектретов, например, поливинилиденфторид.

Активные диэлектрики. Сегнетоэлектрики.

Сегнетоэлектрик – полярный диэлектрик, в котором спонтанная поляризация P_c может изменять свое направление под воздействием электрического поля.

Особенностью сегнетоэлектриков является наличие множества доменов. Внутри каждого домена спонтанная поляризация направлена одинаковым образом, но в различных доменах направление спонтанной поляризации различается. Электрическое поле заставляет сегнетоэлектрические домены, ориентированные хаотично, приобретать одинаковую ориентацию, при этом с ростом величины напряженности электрического поля поляризация достигает насыщения.



Состояние с ориентированными доменами сохраняется и при снижении напряженности электрического поля до нуля.

Наличие диэлектрического гистерезиса является необходимым и достаточным свойством сегнетоэлектрического состояния.

Повышение температуры выше критической приводит к исчезновению петли гистерезиса и сегнетоэлектрического состояния.

Рисунок 3.3 – Зависимость поляризованности сегнетоэлектриков от напряженности электрического поля (диэлектрический гистерезис).

Активные диэлектрики. Сегнетоэлектрики.

Активными диэлектриками, прежде всего, являются сегнетоэлектрики или родственные им диэлектрики. Именно в сегнетоэлектриках все преобразовательные характеристики выражены наиболее сильно. Например, рекордно высокие значения пьезоэлектрических модулей наблюдаются в кристаллах сегнетовой соли. Наиболее высокие значения пироэлектрических коэффициентов также имеют место в сегнетоэлектрических кристаллах.

<i>Сегнетоэлектрик</i>	<i>Критическая температура, °C</i>
<i>Титанат бария (BaTiO₃)</i>	+130
<i>Титанат свинца (PbTiO₃)</i>	+490
<i>Ниобат лития (LiNbO₃)</i>	+1200
<i>Танталат лития (LiTaO₃)</i>	+25
<i>Сегнетовая соль (KNaC₄H₄O₆)</i>	-18, +24
<i>Нитрат калия (KNO₃)</i>	+124, +110
<i>Селенат калия (KSeO₂)</i>	-180

Вопросы для самоконтроля

1. Какие вещества относят к диэлектрикам?
2. Что характеризует поляризованность диэлектриков?
3. Какие виды электропроводности диэлектриков различают?
4. Что называют диэлектрическими потерями?
5. Какие полимеры используются в качестве высокочастотных диэлектриков и почему?
6. Какие виды стекол нашли наиболее широкое применение в электронной технике?
7. Какие диэлектрики принято называть активными диэлектриками?
8. Чем электрострикция отличается от пьезоэлектрического эффекта?
9. Чем обусловлен пироэлектрический эффект?
10. Какие диэлектрики называют электретами?
11. В чем состоит особенность сегнетоэлектриков?

Рекомендуемая литература

1. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники: учебное пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Эль Контент, 2012. – 184 с. ISBN 978-5-4332-0023-4

2. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники: учеб.-метод. пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 74 с. ISBN 978-5-86889-678-1

Тема следующего занятия «Магнитные материалы».

Для подготовки к занятию изучите материал, представленный в разделе 7 учебного пособия на страницах 97-118. Необходимо знать классификацию материалов по магнитным свойствам. Постарайтесь уяснить природу ферромагнетизма. Особое внимание следует уделить методике определения потерь в ферромагнетике. Необходимо знать магнитомягкие материалы и их разновидности. Особое внимание следует уделить полупроводниковым высокопроницаемым магнитным материалам, магнитодиэлектрикам, аморфным и нанокристаллическим магнитомягким материалам.

Вопросы и пожелания можно присылать через диспетчерский отдел ФДО.

Спасибо за внимание