

Состав, свойства, применение.

# ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

# Строение и свойства диэлектриков

- Диэлектрики образуют самую многочисленную группу электротехнических материалов.
- Объединяет их общие свойства:
- Высокое удельное сопротивление
- Способность к поляризации.

# Органические диэлектрики

- Представляют собой различные соединения углерода: углеводороды и их производные, окисленные, азотистые соединения, хлорированные и др.
- Источники: природные продукты растительного и животного происхождения, а также синтетические продукты, полученные путем переработки каменного угля, нефти и природных газов.

# Достоинства органических диэлектриков

- Удобство обработки, в том числе в разогретом виде (экструзия, прессовка, литьё);
- Возможность получения тонких, электрически и механически прочных пленок;
- Гибкость и эластичность.

# Недостатки органических диэлектриков

- Сравнительно низкая нагревостойкость;
- Склонность к старению;
- Недостаточная химостойкость;
- Влагопроницаемость.

# Неорганические диэлектрики

- Представляют собой сложные системы, состоящие из окислов, преимущественно с ионной связью.
- Могут быть как природные (слюда, кварц, асбест, мрамор), так и искусственные, созданные переработкой природных материалов (стекло, керамика),
- полученные химическим путем (синтетическая слюда).

# Достоинства неорганических диэлектриков

- Высокая нагревостойкость
- Высокая химостойкость
- Высокая механическая прочность
- В меньшей степени подвержены старению
- Не горючие материалы
- Пригодны для работы на открытом воздухе, т.к. мало влагопроницаемы

# Недостатки неорганических диэлектриков

- Трудность обработки. Невозможность обработки в разогретом виде;
- Невозможность изготовления лаков и пропитывающих составов;
- Хрупкость тонких пленок из неорганических материалов;



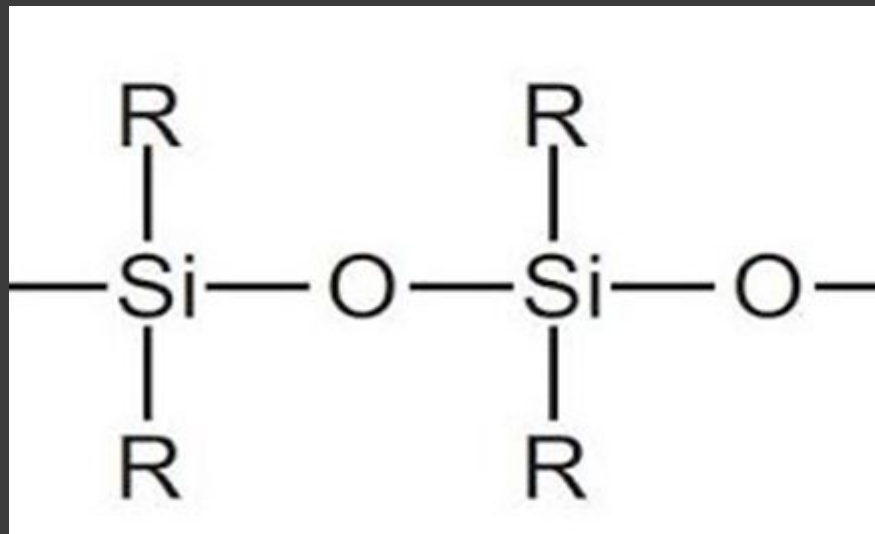
# Элементоорганические вещества

Эти вещества помимо атомов углерода могут содержать атомы элементов, обычно не входящих в состав органических веществ (Si, F, B, P и др.) В природе не встречаются, производятся путем химического синтеза. Сочетают свойства органических и неорганических материалов.

В технике нашли применение *кремнийорганические* и *фторорганические* соединения.

# Кремнийорганические соединения (силиконы)

Могут находиться в жидком и твердом состоянии, отличаются повышенной нагревостойкостью по сравнению с органическими материалами.



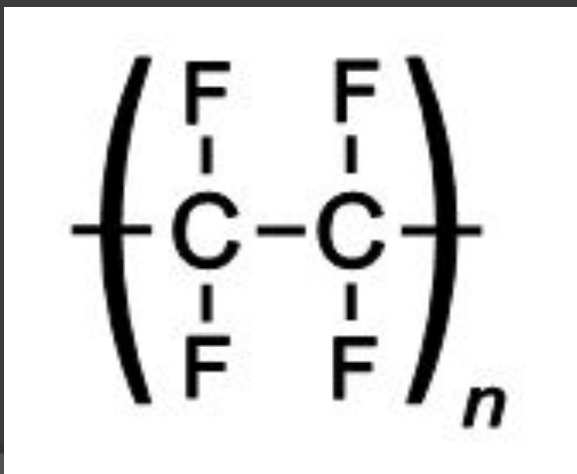
# Фторорганические материалы

Могут быть газообразными, жидкими и твердыми.

- Политетрафторэтилен

(*фторопласт-4*-тефлон)

Обладает повышенной нагревостойкостью 250<sup>0</sup>С, самый химостойкий материал в природе, а также влагостоек и морозостоек.



# Газообразные диэлектрики

# Достоинства и недостатки газовой изоляции

## ◎ *Достоинства:*

- ◎ Высокое удельное сопротивление и малые потери в отсутствие ионизации;
- ◎ Малый вес;
- ◎ Способность восстанавливать свойства после пробоя;
- ◎ Отсутствие старения;

## ◎ *Недостаток:*

- ◎ Низкая электрическая прочность.

## ⦿ Воздух ( $E_{пр} = 3.2$ кВ/мм)

Он входит в состав электрических устройств независимо от нашего влияния и играет в них роль электрической изоляции в дополнение к специально созданной твердой или жидкой. В отдельных случаях, например, на участках воздушных линий электропередачи, воздух является единственным изолятором.

Недостаток – низкая электрическая прочность, а также кислород, содержащийся в воздухе вызывает окисление материалов.

## ⦿ Азот

По сравнению с воздухом не вызывает окисления. Может применяться вместо воздуха, например для заполнения газовых конденсаторов, в силовых кабелях и трансформаторах.

# ⦿ Элегаз – гексафторид серы SF<sub>6</sub>

- ⦿ Широко распространенная газовая изоляция

Имеет электрическую прочность в 2,5 раза большую чем у воздуха ( $E_{пр}=8,9$  кВ/мм)

Применяется в газонаполненных кабелях, конденсаторах, трансформаторах и высоковольтных выключателях.

Элегазовая изоляция имеет малую электрическую емкость, пониженные потери, хорошую теплопроводность, нагревостойкость, малый вес.

Заполнение элегазом трансформаторов делает их взрывобезопасными.

В высоковольтных выключателях элегаз используется для гашения электрической дуги.

Элегаз в чистом виде не токсичен, но вытесняет кислород из воздуха, а также продукты разложения элегаза возникающие при воздействии эл. дуги весьма токсичны.

- Газообразные фреоны

представитель: дихлордифторметан  $\text{CCl}_2\text{F}_2$

Электрическая прочность фреонов может в 6-10 раз превышать эл.прочность воздуха.

Легко сжижаются при повышении давления при нормальных температурах, вызывают коррозию металлов и некоторых твердых органических диэлектриков. Разрушают озоновый слой.

Имеют ограниченное применение.



## ⦿ Водород ( $E_{пр}=1,8$ кВ/мм)

Имеет меньшую электрическую прочность по сравнению с азотом и применяется в основном для охлаждения электрических машин, поскольку удельная теплопроводность водорода значительно выше, чем у воздуха. Также при применении водорода снижаются потери мощности на трение, что позволяет повысить как мощность, так и КПД электрической машины.

## ⦿ Инертные газы аргон, неон, гелий

Применяются в газоразрядных и электровакуумных приборах

# Жидкие диэлектрики

# Применение жидких диэлектриков

- ⦿ Для заливки в трансформаторы, высоковольтные вводы, маслонаполненные кабели для создания электрической изоляции и осуществления теплоотвода.
- ⦿ Для пропитки волокнистой изоляции в силовых кабелях, конденсаторах и т.д.
- ⦿ В масляных выключателях для гашения электрической дуги.

# Жидкие диэлектрики

- ◎ **Нефтяные электроизоляционные масла**  
(трансформаторное, конденсаторное и кабельное масло).
- ◎ **Синтетические жидкие диэлектрики**  
(хлорированные углеводороды, кремнийорганические жидкости, фторорганические жидкости)
- ◎ **Растительные масла.**

# Нефтяные электроизоляционные масла

- Получают из соляровой фракции, выделенной при перегонке нефти.

Температурные интервалы, °С	Фракции	
До 140	бензиновая	
140 - 180	лигроиновая	
180 - 220	керосиновая	
220 - 300	газойлевая	дизельные фракции
300 - 350	соляровая	
350 - 500	смазочных масел	
Свыше 500	смолы и асфальтены (гудрон)	

● Нефтяные электроизоляционные масла имеют сложный углеводородный состав, и содержит следующие основные компоненты:

1. Парафины 10-15%
2. Нафтены или циклопарафины 60-70%
3. Ароматические углеводороды 15-20%
4. Асфальто-смолистые вещества 1-2 %
5. Сернистые соединения  $<1\%$
6. Азотистые соединения  $<0.8\%$
7. Нафтенновые кислоты  $<0.02\%$
8. Антиокислительная присадка 0.2-0.5%

# Основные свойства минеральных нефтяных масел

- ⊗  $\epsilon = 2.2-2.3$  - неполярный диэлектрик
- ⊙  $\text{tg}\delta = 10^{-4}$
- ⊙  $E_{\text{пр}} = 10-28$  кВ/мм
- ⊙ Температура застывания  $-45^{\circ}\text{C}$
- ⊙ Максимальная рабочая температура  $80^{\circ}\text{C}$
- ⊙ Кислотное число  $0.01-0.05$  мг КОН/1г масла

# Применение

- Трансформаторные масла применяют для заливки силовых и измерительных трансформаторов, реакторного оборудования, а также в масляных выключателях для гашения электрической дуги.



# Конденсаторное масло

- Получают из трансформаторного масла путем более глубокой очистки адсорбентами, обезгаживанием в вакууме.
- Используют для пропитки бумажных конденсаторов для повышения электрической емкости и рабочего напряжения.

# Нефтяное кабельное масло

- Применяют для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей с рабочим напряжением до 35 кВ.
- Для заполнения металлических оболочек маслонаполненных кабелей на напряжение от 110 до 500 кВ.

# Недостатки нефтяных изоляционных масел

- ⦿ Минеральные нефтяные масла огнеопасны;
- ⦿ Склонны к старению;
- ⦿ Имеют ограниченный диапазон рабочих температур.

# Синтетические жидкие диэлектрики

# Хлорированные углеводороды

- ⊗ Негорючие, пожаробезопасные, стойкие к окислению
- ⊙  $\epsilon = 5$  - полярные диэлектрики
- ⊙  $\text{tg}\delta = 10^{-3}$
- ⊙  $E_{\text{пр}} = 15$  кВ/мм
- ⊙ *Недостаток* - чрезвычайно токсичные, в 4-10 раз дороже нефтяных масел.

⊗ СОВОЛ (*советское масло*)

Полихлордифенил (  $C_{12}H_{10}$  )

Температура застывания  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Используется для пропитки бумажных конденсаторов. (Поскольку полярный материал заметно увеличивается емкость)

СОВТОЛ (*советское трансформаторное масло*)  
раствор совола в трихлорбензоле. Имеет меньшую вязкость, застывает при  $T = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , используется для заливки в трансформаторы.

# Кремнийорганические ЖИДКОСТИ

- ⊗ Основные свойства:
  - ⊙ Повышенная нагревостойкость , максимальные рабочие температуры +250-300 °С
  - ⊙ Стойкие к окислению
  - ⊙  $\varepsilon = 2.4-2.8$  - неполярные диэлектрики
  - ⊙  $\text{tg}\delta = 10^{-4}$
  - ⊙  $E_{\text{пр}}=14-18$  кВ/мм
  - ⊙ *Недостаток* - в 10-100 раз дороже нефтяных масел.

# Фторорганические жидкости

(фреоны, хладоны)

- ⊗ Негорючие, пожаробезопасные,
  - ⊙ Имеют высокую нагревостойкость (до +300 °С)
  - ⊙ Негигроскопичны
  - ⊙ Интенсивно отводят тепло
  - ⊙  $\epsilon = 2.2-2.5$  - неполярные диэлектрики
  - ⊙  $\text{tg}\delta = 10^{-4}$
  - ⊙  $E_{\text{пр}}=12-19$  кВ/мм
  - ⊙ *Недостаток*- вытесняют кислород из воздуха, некоторые виды токсичны. В 1000 раз дороже нефтяных масел.



# Растительные масла

- Высыхающие (способные к полимеризации) - *тунговое, льняное и конопляное*, применяют в электроизоляционных лаках и эмалях
- Невысыхающие – *касторовое*, используется для пропитки бумажных конденсаторов, а также как пластификатор.

# Твердеющие материалы (смолы, эластомеры, битумы)

# СМОЛЫ

- Применяются в составе лаков (пропиточных, покровных, клеящих), компаундов (пропиточных, заливочных), пластмасс, слоистых пластиков, пленок и волокон.
- Смолы по своим свойствам могут быть *термопластичные* и *терморезактивные*

- ◎ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ – полимеры, нагрев которых до температур соответствующих пластичному состоянию не вызывает необратимого изменения их свойств.
- ◎ ТЕРМОРЕАКТИВНЫЕ – полимеры, которые при нагреве необратимо меняют свое строение и свойства. Они запекаются, становятся прочными, неплавкими и нерастворимыми.

# Природные смолы

- ② Канифоль — смола, получаемая из смолы хвойных деревьев, применяется как добавка к нефтяным маслам, составная часть лаков, компаундов, используется как флюс.
- ② Янтарь — ископаемая смола растений, имеет самое высокое удельное сопротивление  $10^{18}$  Ом\*м не зависящее от влажности. Применяется в измерительной технике.
- ② Шеллак — терморезистивная смола, применяемая для изготовления спиртовых лаков для склеивания слюды в миканитах. Получают очисткой продуктов жизнедеятельности тропических насекомых.

# Синтетические смолы

## 1. ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ НЕПОЛЯРНЫЕ СМОЛЫ.

*Основные свойства:*

- $\varepsilon = 2.1-2.6$

- $\text{tg}\delta = 10^{-4}$

- $\rho = 10^{14} - 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

- $E_{пр} = 60 \text{ кВ/мм}$ , в тонких пленках повышается.

Параметры  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$  мало зависят от частоты электрического поля и температуры.

Такие свойства позволяют использовать неполярные термопласты при *повышенных частотах и напряжениях.*

# Неполярные термопласты

- Полиэтилен (ПЭ)

Нагревостойкость 80-90 °С,

у радиационношитоного полиэтилена  $T_{\text{раб}} = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  
кратковременно  $T_{\text{max}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- Полипропилен (ПП)

- Полистирол (ПС)

- Фторопласт-4 (ПТФЭ)

Нагревостойкость 250 °С, кратковременно  $T_{\text{max}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$

## 2. Термопластичные полярные смолы

### Основные свойства:

- $\varepsilon = 3-6$

- $\text{tg}\delta = 10^{-2}$

- $\rho = 10^{11} - 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Параметры  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$  принимают большие значения и существенно зависят от частоты электрического поля и температуры.

Полярные термопласты используют *только на низких частотах*.



# Полярные термопласты

- ◎ **Поливинилхлорид (ПВХ) (винипласт)**

Основной материал для изоляции кабелей и проводов.

- ◎ **Полиамиды (ПА) (Капрон, нейлон, анид)**

применяются для изготовления синтетических волокон, пленок и пластмасс.

- ◎ **Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) (лавсан)  $T_{\max} = 150^{\circ}\text{C}$**

Лавсановые пленки используются для межслойной изоляции в обмотках трансформаторов, в производстве конденсаторов, для изготовления лавсанового гетинакса.

- ◎ **Полиимиды (ПИ)**

Нагревостойкость 200-250  $^{\circ}\text{C}$ , радиационностойкие материалы, пластмассы, лаки, эмали, полиимидно-фторопластовые пленки.

- ◎ **Полиуретаны (ПУР)**

Волокна, пленки, лаки, клеи, изоляция самолудящихся проводов

- ◎ **Поликарбонаты (ПК)**

Отличаются механической прочностью, теплостойкостью.

- ◎ **Полиметилметакрилат (ПММА) (оргстекло)**

Используется в качестве конструкционного и как дугогасящий материал в разрядниках.

# Терморреактивные смолы

## ⊗ Основные свойства:

Основные свойства:

- ⊙  $\varepsilon = 3,5 - 7,7$  – полярные диэлектрики
- ⊙  $\text{tg}\delta = 10^{-3} - 10^{-1}$
- ⊙  $\rho = 10^9 - 10^{14}$  Ом \* м

Применяются в производстве слоистых пластиков: *гетинакса* (бумага, пропитанная смолой), *текстолита* (х/б ткань пропитанная смолой), *стеклотекстолита* (наполнитель – стеклоткань), терморреактивных пластмасс, клеев, лаков, компаундов, для герметизации и опрессовки.

# Терморреактивные смолы

- Эпоксидные смолы
- Фенолоформальдегидные смолы, резольные смолы (бакелит, новолак (термопласт.))
- Глифталевые смолы, (трекингостойкие)
- Кремнийорганические смолы

# Эластомеры

- Резины и резиноподобные материалы.

Резину на основе натурального каучука получают при его вулканизации (нагрев с введением серы до температур 138 – 200 °С)

*1-3% S – мягкая резина*

*30-35% S – твердый материал ЭБОНИТ.*

Применяется резина в производстве проводов, кабелей, диэлектрических перчаток, ковриков, бот и др.

⊕ Натуральный каучук  $(C_5H_8)_n$ ,

⊙  $\varepsilon = 2,6$  – неполярный диэлектрик

⊙  $\rho = 10^{13}$  Ом \* м

⊙ При  $T=50$  °С каучук размягчается

⊙ Растворяется в бензине – резиновый клей.

В состав резины входят до 65% наполнителей:

Мел, тальк, сажа, каолин, пластификаторы:  
парафин и канифоль.

- ⦿ *Недостатки:*
- ⦿ Подверженность старению под действием УФ, озона, температуры.
- ⦿ Разрушается при контакте с маслом
- ⦿ Низкая нагревостойкость (до 55 °С)
- ⦿ Горючая, огнеопасная.
- ⦿ Лучшими характеристиками обладают резины на основе синтетических каучуков. Они масло-, бензо-, озоностойкие, не распространяющие горение, более нагревостойкие. (хлоропреновый каучук – найрит, кремнийорганические резины, и т.д.)

# Битумы

- Битумы- сложные смеси углеводородов, тяжелые продукты перегонки нефти.
- Слабополярные ( $\epsilon=2,5-3$ ), химически инертные, не растворяются в спиртах, растворимы в нефтяных маслах, влагостойкие. Температура размягчения от 50 до 125 °С
- Применяются для изготовления битумных и маслянобитумных лаков и компаундов.

# Воскообразные диэлектрики

- ◎ Парафин — неполярный диэлектрик, получаемый из нефти.  $T_{пл} = 50-56 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- ◎ Церезин — получают отчисткой *озокерита* — горного воска  $T_{пл} = 57-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- ◎ Галовакс — хлорированный нафталин — синтетический материал  $T_{пл} = 100-105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , полярный  $\epsilon = 4,5-5,5$ .

Применяют для пропитки бумажных конденсаторов, пористой и волокнистой изоляции, как составная часть компаундов, в качестве пластификаторов в резинах и т.п.



# Волокнистые и текстильные материалы

- ◎ *Бумага*, (кабельная, конденсаторная, пропиточная, микалентная и др.)
- ◎ *Картон* (воздушный и масляный)
- ◎ *Ткани* (для производства текстолита и лакотканей)
- ◎ *Пряжи*
- ◎ *Изоляционные ленты*

# Неорганические твердые диэлектрики

- *Неорганические стекла*
- *Керамика (установочная и конденсаторная)*
- *Слюда (мусковит, флогопит)*
- *Асбест*
- *Неорганические диэлектрические пленки*

# Неорганические стекла

- Стеклообразующие окислы  $\text{SiO}_2$   $\text{B}_2\text{O}_3$   $\text{P}_2\text{O}_5$
- Щелочные  $\text{Na}_2\text{O}$   $\text{K}_2\text{O}$
- Щелочноземельные  $\text{CaO}$   $\text{BaO}$  (кроны)
- Различные добавки  $\text{PbO}$  (флинты)  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
 $\text{TiO}_2$   $\text{MgO}$  и др.
  
- Свойства широко меняются в зависимости от состава и тепловой обработки.
  
- $T_{\text{разм}} = 400-1600$  °С,  $\varepsilon = 3,8 - 16,2$ ,  
 $\rho = 10^6-10^{15}$  ом·м,  $E_{\text{пр}}$  до 500 кВ/мм

# Применение стекол

- ◎ *Конденсаторные стекла*
- ◎ *Установочные* (пр-во изоляторов и различных деталей)
- ◎ *Ламповые* (электровакуумные)
- ◎ *Микалекс* (стекло с наполнителем из слюды)
- ◎ *Стеклоэмали* (изоляция проволочных резисторов, защитные покрытия керамических изделий)
- ◎ *Стекловолокно*
- ◎ *Стеклокерамика* - ситалл

# Керамика

*Технологический процесс:*

- Очистка от примесей составных частей
- Измельчение и перемешивание с водой
- Формовка изделий
- Сушка от лишней влаги
- Обжиг
- Глазуровка

## ⦿ Установочная низкочастотная керамика

### *Применение:*

Изготовление изоляторов на напряжение до 1500 кВ постоянного и 1150 кВ переменного напряжения, а также ламповые патроны, детали штепсельных розеток, плавких предохранителей и т.п.

- ⦿ Электрофарфор (на основе глины «каолин»)
- ⦿ Высоковольтная стеатитовая керамика (на основе талька)
- ⦿ Термодугостойкая керамика (кордиеритовая керамика)

## ⦿ Высоочастотная установочная керамика

Используется для изготовления различных установочных деталей, работающих на высоких частотах и несущих механическую нагрузку: проходные изоляторы, каркасы катушек индуктивности, корпуса п/п приборов.

- ⦿ Глиноземистая керамика ( высокое содержание  $Al_2O_3$ , радиофарфор, ультрафарфор, беспористая прозрачная керамика *ПОЛИКОР* (люкалос))
- ⦿ Форстеритовая керамика
- ⦿ Стеатитовая керамика

# Конденсаторная керамика

- Рутитовая керамика  $\text{TiO}_2$  Рутит ( $\epsilon = 173$ )  
 $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$  титанат кальция ( $\epsilon = 168$ )  
 $\text{SrO} \cdot \text{TiO}_2$  титанат стронция ( $\epsilon = 233$ )  
 $\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2$  титанат бария (активный диэлектрик)
- Станнатная керамика  $\text{SnO}_2$  ( $\epsilon = 12-30$ )
- Лантановая керамика ( $\epsilon = 40-150$ )
- Сегнетокерамика ( $\epsilon$  до 10 000) активный диэлектрик  
Сегнетова соль  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$



# Слюда

- Природный кристаллический минерал с характерным слоистым строением.
- *Мусковит* – калийная слюда
- *Флогопит* – железомagneзиальная
- Слюда имеет класс нагревостойкости от 500<sup>0</sup>С у мусковита до 1000<sup>0</sup>С у флогопита, а также электрическую прочность от 800 до 1000 кВ/мм.

# Применение слюды

- ◎ Лучшая, «Щепаная слюда» идет на производство конденсаторов.
- ◎ *Флогопит* используют в изоляции нагревательных приборов, а также в коллекторных прокладках электрических машин.
- ◎ *Миканиты* – лепестки слюды, проклеенные лаками
- ◎ *Слюдиниты* – по технологии изготовления бумаги
- ◎ *Слюдопласты* – прессованные отходы слюды
- ◎ *Микалексы* – стекла с наполнителем из порошка слюды

# Электроизоляционные неорганические пленки

- В отличие от большинства электроизоляционных материалов они не получают в свободном состоянии, а образуются в процессе изготовления на подложке, являющейся элементом электротехнической конструкции. Такие пленки имеют высокую нагревостойкость, эл. свойства, но плохие механические свойства.

*Методы получения:*

- Осаждением пленок из газовой или жидкой среды, не вступающей в реакцию с веществом подложки. (например напыление в вакууме)
- Химическими и электрохимическими реакциями вещества подложки с активным веществом среды. (термическое окисление, химическая обработка и т.д.)

*Применяют* в электролитических конденсаторах - анодом служит фольга, покрытая оксидной пленкой, в оксидных конденсаторах (пленки  $Ti_2O_5$ ,  $Nb_2O_5$ ), в изоляции алюминиевых обмоточных проводов и др.

# Активные диэлектрики

- Материалы, свойствами которых можно управлять с помощью внешнего энергетического воздействия.

# Активные диэлектрики

- ◎ Сегнетоэлектрики – из-за спонтанной поляризации  $\epsilon$  изменяется под действием электрического поля.
- ◎ Пьезоэлектрики – электрическая поляризация диэлектрика появляется при механическом воздействии.
- ◎ Электрооптические материалы – под действием электрического поля изменяется  $\epsilon$ , показатель преломления и рассеяния света
- ◎ Электреты – твердые диэлектрики, длительно сохраняющие поляризованное состояние.