Диэлектрические материалы

Классификация диэлектриков

- **Диэлектрик –** вещество, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле.
- Диэлектрики **по способу использования** подразделяются на **активные** − с управляемыми свойствами, и **электроизоляционные**.
- **Активные диэлектрики** по их электрофизическим **свойствам**, определяющим применение, можно разделить на:
  - **сегнетоэлектрики –** позволяющие управлять своей диэлектрической проницаемостью;
  - **пьезоэлектрики –** преобразующие механическую энергию в электрическую и обратно;
  - **пироэлектрики –** преобразующие тепловую энергию в электрическую и обратно;
  - **электреты –** источники электрического поля;
  - **активные элементы оптических устройств –** активные среды лазеров, жидкие кристаллы и др.

Классификация электроизоляционных материалов

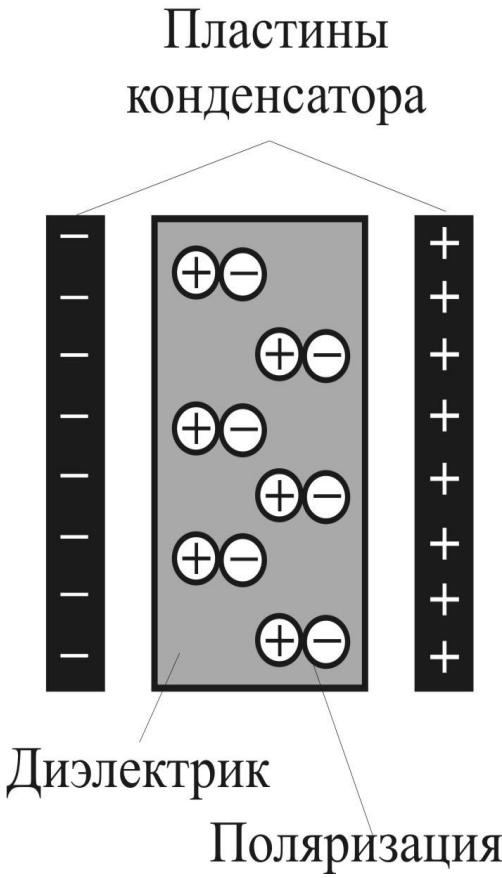
- **По агрегатному состоянию: газообразные**, **жидкие** и **твердые**. К группе твердых также относят **твердеющие материалы**, которые вводятся в электрическую изоляцию в жидком или пластичном состоянии, но в работающей изоляции являются твердыми.
- **По структуре** твердые электроизоляционные материалы можно классифицировать как **кристаллические** и **аморфные**.
- **По химическому составу** электроизоляционные материалы делятся на **органические** и **неорганические**.
- **По электрическому состоянию молекул** электроизоляционные материалы подразделяют на **неполярные** и **полярные**. Диэлектрики подразделяются также на **гетерополярные** (ионные), молекулы которых сравнительно легко диссоциируют, и **гомеополярные**, для которых диссоциация на ионы не характерна.
- **По происхождению**: **природные**, применяемые без химической переработки; **искусственны**е, получаемые путем химической переработки природного сырья; **синтетические**, получаемые методом химического синтеза.
- **По технологическому признаку**: **электрокерамические**, **полимерные**, **лаки**, **компаунды**, материалы **на основе слюды** и др.

Относительная диэлектрическая проницаемост

- **Поляризация** - обратимое смещение электрически заряженных частиц, входящих в состав диэлектрика, при приложении к нему электрического поля.
  - Емкость конденсатора, имеющего на пластинах заряд Q и заполненного вакуумом,

$$C_0 = Q / U_0,$$

- где U_0 – разность потенциалов. После того, как в зазор будет вставлен диэлектрик,
  - $C = Q / U = \varepsilon C_0.$
- Величину $\varepsilon = E_0 / E$ (E – напряженность электрического поля) называют **относительной диэлектрической проницаемостью**, она зависит от свойств диэлектрика и характеризует **уменьшение силы взаимодействия электрических зарядов в диэлектрике по сравнению с вакуумом**.



Вектор поляризации

- При наложении электрического поля в диэлектрике возникают **элементарные электрические дипольные моменты** $\boldsymbol{p}_j$.
- **Вектор поляризации** представляет собой объемную плотность электрического дипольного момента диэлектрика: $\boldsymbol{P} = (\Sigma \boldsymbol{p}_j) / V$.
- При поддержании постоянной разности потенциалов и введении в конденсатор изотропного диэлектрика возрастает **электрическая индукция** (**электрическое смещение**)$\boldsymbol{D}$:
  - $\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P} = \varepsilon_0 \varepsilon \boldsymbol{E} = \varepsilon \boldsymbol{D}_0$.
- $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Кл / (В · м) – **электрическая постоянная**.
- Вектора $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{D}$ направлены от положительного заряда к отрицательному. Вектор $\boldsymbol{P}$ направлен от отрицательного заряда к положительному. Векторы $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{D}$ и $\boldsymbol{P}$ в изотропных диэлектриках имеют одно и то же направление.
  - $\boldsymbol{P} = \chi_e \varepsilon_0 \boldsymbol{E} = \alpha \boldsymbol{E}$,
- где χ_e – **диэлектрическая восприимчивость.** $\chi_e = \varepsilon - 1$,;
- α – **поляризуемость**.
- В анизотропных диэлектриках диэлектрическая проницаемость является симметричным тензором второго ранга ε_{ij} (i, j = 1, 2, 3).

Диэлектрические потери

- **Диэлектрические потери –** электрическая мощность, поглощаемая в диэлектрике под действием приложенного к нему напряжения рассеивается, превращаясь в теплоту.
- Потери складываются из:
  - мощности, теряемой при прохождении постоянного сквозного тока утечки через сопротивление изоляции, в соответствии с законом Джоуля–Ленца – **омические потери**:

$$P_{скв} = UI = U^2 / R = I^2 R;$$

  - потерь при переменных токах, обусловленных процессами миграционной и релаксационной поляризаций – собственно **диэлектрические потери**;
  - **ионизационных диэлектрических потерь**, связанных с ионизацией диэлектриков в газообразном состоянии, наличием газовых включений в твердых телах.
- В качестве характеристики материалов обычно используются **удельные диэлектрические потери** *p* – потери, отнесенные к единице массы, Вт/кг, или к единице объема материала (плотность мощности потерь), Вт/м^3.

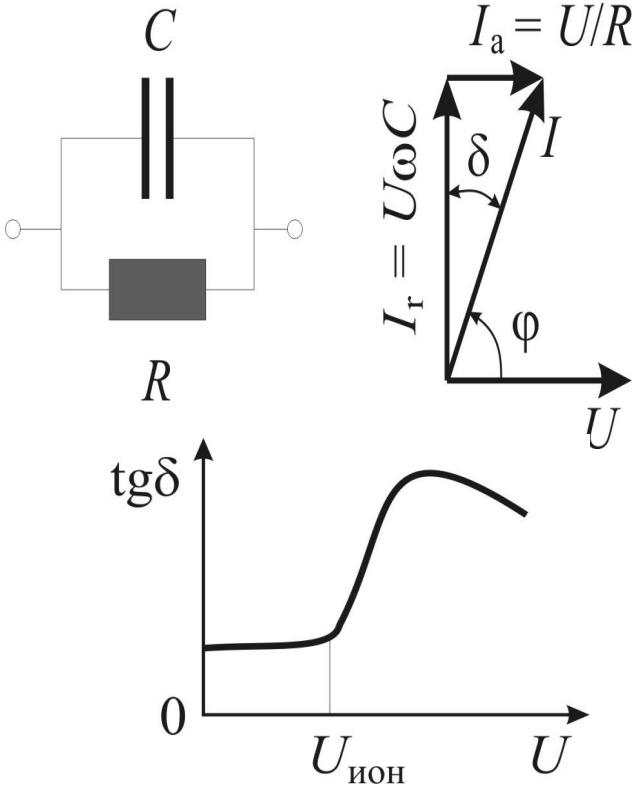
Угол диэлектрических потерь

- В переменном электрическом поле $E = E_0\exp(i\omega t)$ через диэлектрик течет ток, который представляет собой сумму плотности сквозного тока $i_{скв}$ и плотности тока смещения $i_{см}$:

Полный ток подразделяется на активную i_a и реактивную i_r составляющие: $i = i_a + i_r$;

$i_a = (\gamma + \varepsilon_0\varepsilon''\omega)E$; $i_r = \varepsilon_0\varepsilon'\omega E$.

- В чисто емкостной цепи полные потери составляют:
  - $P = Ui_a = Ui_r\mathrm{tg}\delta = U^2\omega C\,\mathrm{tg}\delta$;
  - $\mathbf{tg\delta = i_a / i_r}$,
- где δ – **угол диэлектрических потерь**.
- Значение tgδ для лучших электроизоляцион-ных материалов составляет ~$10^{-5}\div10^{-4}$.
- Диэлектрические потери увеличиваются с ростом температуры.
- **Добротность изоляции** $Q = 1 / \mathrm{tg}\delta$.



Резкое увеличение tgδ с некоторого значения $U_{ион}$ связано с ионизацией воздушных включений или других газов в изоляции.

Газообразные диэлектрики

- Наиважнейшим газообразным диэлектриком является **воздух**, который всегда входит в состав электрических устройств в дополнение к специально созданной твердой или жидкой изоляции.
- **Азот** используется для заполнения газовых конденсаторов и других целей там, где окисляющее действие кислорода разрушает материалы.
- **Гексафторид серы SF_6:** электрическая прочность примерно в 2,5 раза выше, чем у воздуха; тяжелее воздуха примерно в 5,1 раза, обладает низкой температурой кипения, нетоксичен; с успехом используется в конденсаторах и т.п. Его преимущества сказываются в основном при высоких давлениях.
- Многие **перфторированные углеводороды** (**перфторуглероды**, все атомы водорода заменены атомами фтора, C_xF_y) **являются либо газами** (например, CF_4, C_2F_6, C_3F_8, C_4F_8, C_4F_{10} и др.) или **жидкостями** (например, C_7F_8, C_7F_{14}, C_8F_{16}, $C_{14}F_{24}$ и др.). Электрическая прочность перфторированных углеводородов (газов и паров) **превышает прочность воздуха в 6÷10 раз**. У них низкая по сравнению с жидкими диэлектриками плотность, более высокая **нагревостойкость** и стойкость к старению. Применение этих материалов позволяет снижать массу электрических устройств и увеличивать термический диапазон их работы при улучшении электрических характеристик.

Пробой газов

- Под воздействием электрического поля заряженные частицы (электроны, отрицательные и положительные ионы газа) перемещаются в направлении поля или против него в зависимости от их знака и приобретают по длине свободного пробега дополнительную энергию $W = qE\lambda$, где E – напряженность электрического поля; q – заряд частицы; λ – длина свободного пробега.
- Если $W \geq W_и$ – энергии ионизации газовых молекул, то при столкновении с молекулой газа происходит ударная ионизация, т.е. расщепление молекулы на электроны и положительные ионы. Освобожденные при этом «вторичные» электроны под действием поля, в свою очередь, ионизируют молекулы газа, образуя электронную лавину.

Электрическая прочность некоторых газов

Газ	$E_{пр}$, МВ/м $U_{пр}/h$
Воздух	3
Водород	1,8
Азот	3
Гелий	0,72
Фреон	7,4

Жидкие диэлектрики

- **Трансформаторное масло** (нефтяное минеральное масло - смесь различных углеводородов,
  - $E_{пр}$ = 20÷50 МВ/м)
- используется для заливки силовых трансформаторов, масляных выключателей высокого напряжения. Трансформаторное масло выполняет следующие роли:
  - повышает электрическую прочность изоляции, заполняя поры (волокнистой изоляции) и промежутки между проводами, обмотками, трансформаторным баком;
  - улучшает теплоотвод;
  - способствует гашению электрической дуги, образующейся при разрыве контактов.
- Для пропитки бумажных конденсаторов, особенно силовых, служит **конденсаторное масло**, увеличивающее ε бумажного диэлектрика и его электрическую прочность, что позволяет уменьшать габариты, массу и стоимость конденсатора.
  - $E_{пр}$ = 20 МВ/м.

Жидкие диэлектрики (продолжение)

- **Кабельные масла** (нефтяные) используются в производстве силовых электрических кабелей для пропитки бумажной изоляции с целью повышения ее электрической прочности и улучшения теплоотвода.
- **Недостатком** нефтяных масел является их **пожароопасность**. В тех случаях, когда требуется полная пожаро- и взрывобезопасность, маслонаполненные трансформаторы и конденсаторы применяться не могут. В этих случаях применяются **синтетические жидкие диэлектрики**, например, хлорированные углеводороды, кремний- и фторорганические жидкости и др.
- **Кремнийорганические жидкости** обладают малыми потерями $tg\delta = (1 \div 3) \cdot 10^{-4}$, низкой гигроскопичностью и повышенной нагревостойкостью. Различают полиметил- (ПМС), полиэтил- (ПЭС), полифенилсилоксановые (ПФС) и другие кремнийорганические жидкости. Основным их **недостатком** является высокая стоимость.
- **Преимущества фторорганических жидкостей** (например, $(C_4F_9)_3N$, $(C_4F_9)_2O$) по сравнению с кремнийорганическими: полная негорючесть, высокие дугостойкость, нагревостойкость и более интенсивный теплоотвод, малые $tg\delta$ и гигроскопичность. **Недостатки** – высокая летучесть, что требует герметизации аппаратов, а также высокая стоимость.

Пробой жидких диэлектриков

- **Пробой жидких диэлектриков** – явление сложное, что объясняется сложным составом жидких диэлектриков и сильным влиянием загрязнений на развитие пробоя.
- **Загрязнения** (волокна, смолистые вещества и др), вода понижают электрическую прочность диэлектрика.
- **Чистота поверхности электродов** оказывает существенное влияние на электрическую прочность жидких диэлектриков.
- **Конфигурация электрического поля и полярность электродов** вызывает изменение пробивных напряжений жидких диэлектриков.
- Большая продолжительность воздействия электрического поля на диэлектрик вызывает резкое снижение пробивного напряжения.
- Пробивное напряжение повышается с увеличением **давления**. Зависимость $U_{пр}$ от давления заметно уменьшается с повышением степени очистки электроизоляционных примесей, что указывает на большое влияние газообразных примесей.
- По мере приближения к **температуре кипения** электрическая прочность жидких диэлектриков резко снижается.

Электрическая прочность некоторых жидких диэлектриков

Жидкость		$E_{пр}$, МВ/м
Нефтяная	Трансформаторное масло	15–20
	Конденсаторное масло	20
Синтетическая	Совол, совтолы	14–22
	Полиэтилсилоксановые жидкости	18–45
	Полиметилсилоксановые жидкости	15–35

Электроизоляционные материалы

- **Электроизоляционные материалы –** диэлектрические материалы, которые предназначены для электрической изоляции.
- **Назначение электрической изоляции –**воспрепятствовать прохождению электрического тока путями, нежелательными для работы конкретной электрической цепи;
- **–** поляризуемость в электрическом поле **–** позволяет использовать электроизоляционные материалы в качестве конденсаторных, т.е. для создания конденсаторов с заданными емкостными характеристиками.
- Благодаря исключительно малой электропроводности, а следовательно, пренебрежимо малой электронной составляющей теплопроводности, диэлектрики выполняют роль не только электроизоляторов, но и **теплоизоляционных материалов**.

Пробой твердых диэлектриков

- При достижении критического значения, называемого **пробивным напряжением** $U_{пр}$, наступает **пробой**, представляющий собой разрушение диэлектрика с потерей им электроизоляционных свойств. При пробое ток утечки сильно возрастает, а сопротивление снижается, и получается короткое замыкание между проводниками в месте пробоя.
- Пробивное напряжение зависит от толщины изоляции h, т. е. расстояния между электродами. Чем толще слой электроизоляции, тем выше пробивное напряжение. **Способность** материала противостоять пробою, – **электрическая прочность** $E_{пр}$. Для равномерного электрического поля:
  - $E_{пр} = U_{пр} / h$.
- В большинстве случаев пробивное напряжение возрастает с увеличением толщины изоляции медленнее, чем по линейному закону. В особо тонких слоях начинают сказываться неоднородности структуры и электрическая прочность уменьшается.
- Для надежной работы электротехнического устройства рабочее напряжение изоляции $U_{раб}$ должно быть существенно меньше $U_{пр}$. Отношение $U_{пр} / U_{раб}$ называют **коэффициентом запаса электрической прочности изоляции**.

Электрическая прочность твердых диэлектриков

Наименование диэлектрика	$E_{пр}$, МВ/м
Асботекстолит	1,0-1,5
Гетинакс	12-35
Капрон	20
Лавсан	80-120
Микалекс	12-20
Полистирол	25-40
Полиуретан	20-25
Полиэтилен	45-55
Текстолит	2,2-25
Электрофарфор	20-30

Полимеры (по строению)

линейные

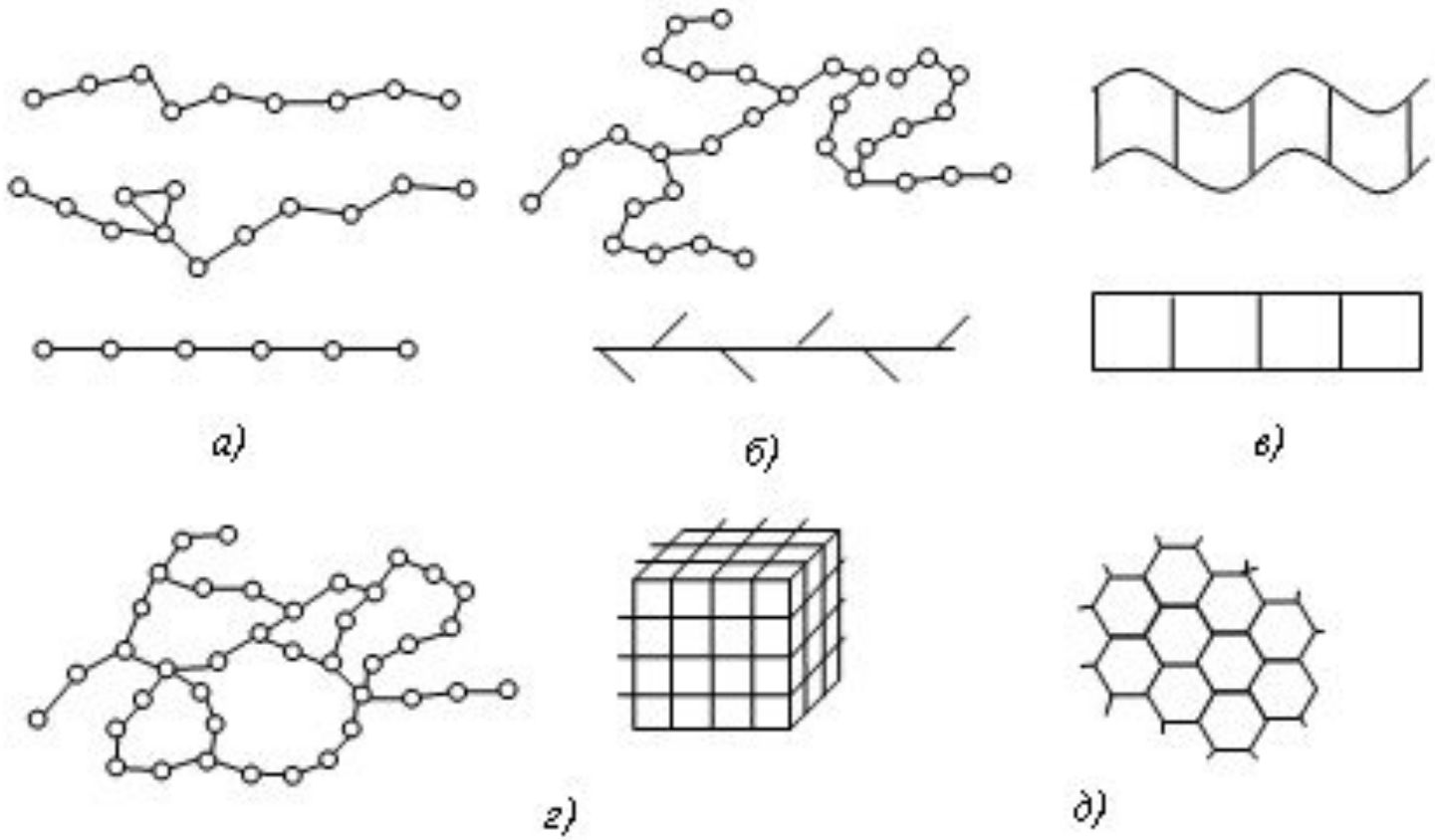
... —М—М—М—М—М—М—...

разветвленные

Основная цепь макромолекулы имеет короткие ответвления

сетчатые

линейные цепи связаны друг с другом в единую сетку более короткими поперечными цепями



Форма макромолекулы полимеров: а – линейная; б – разветвленная;
в – ленточная; г – пространственная, сетчатая, д – паркетная

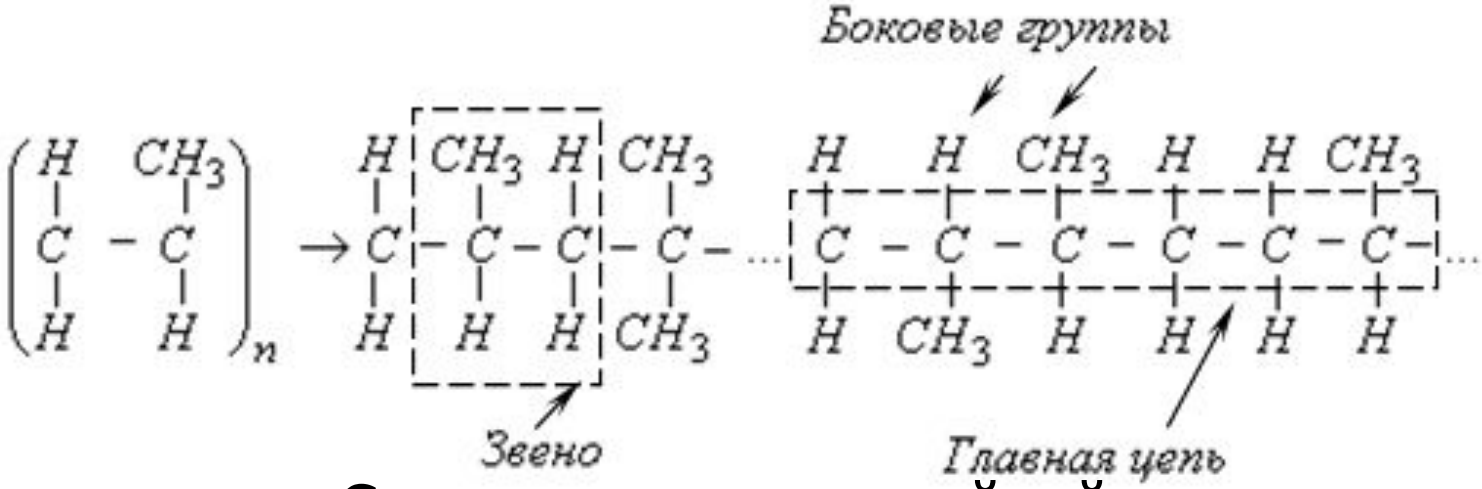
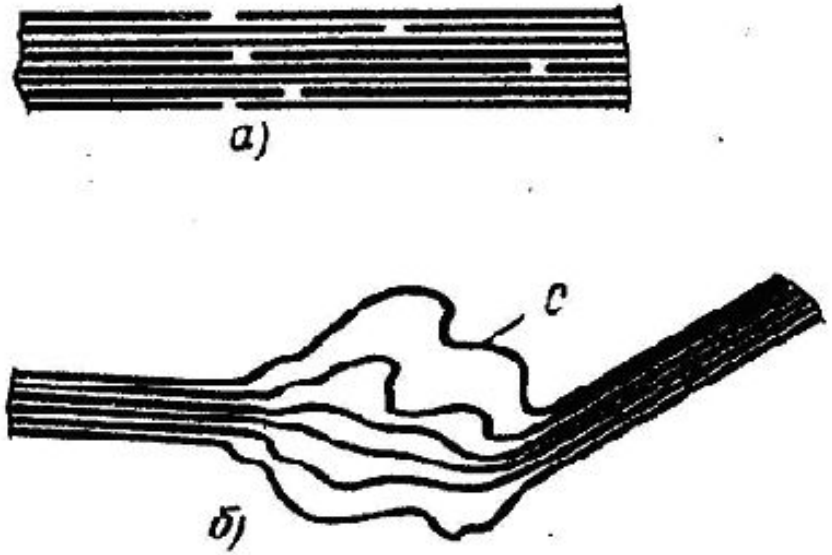
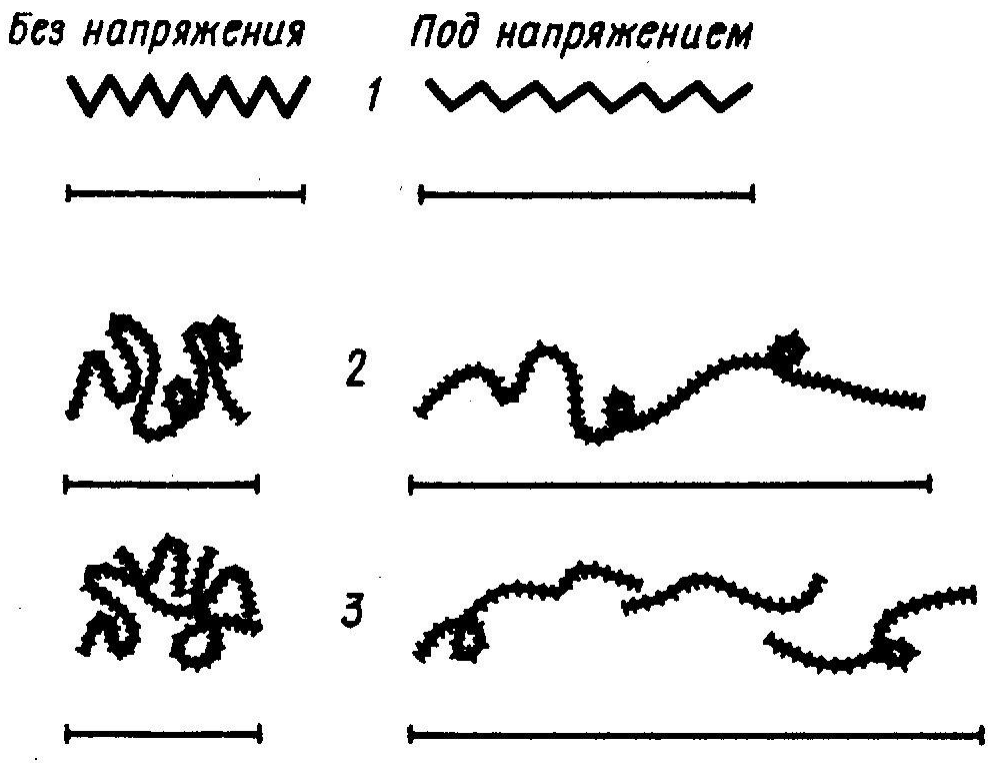


Схема строения линейной макромолекулы

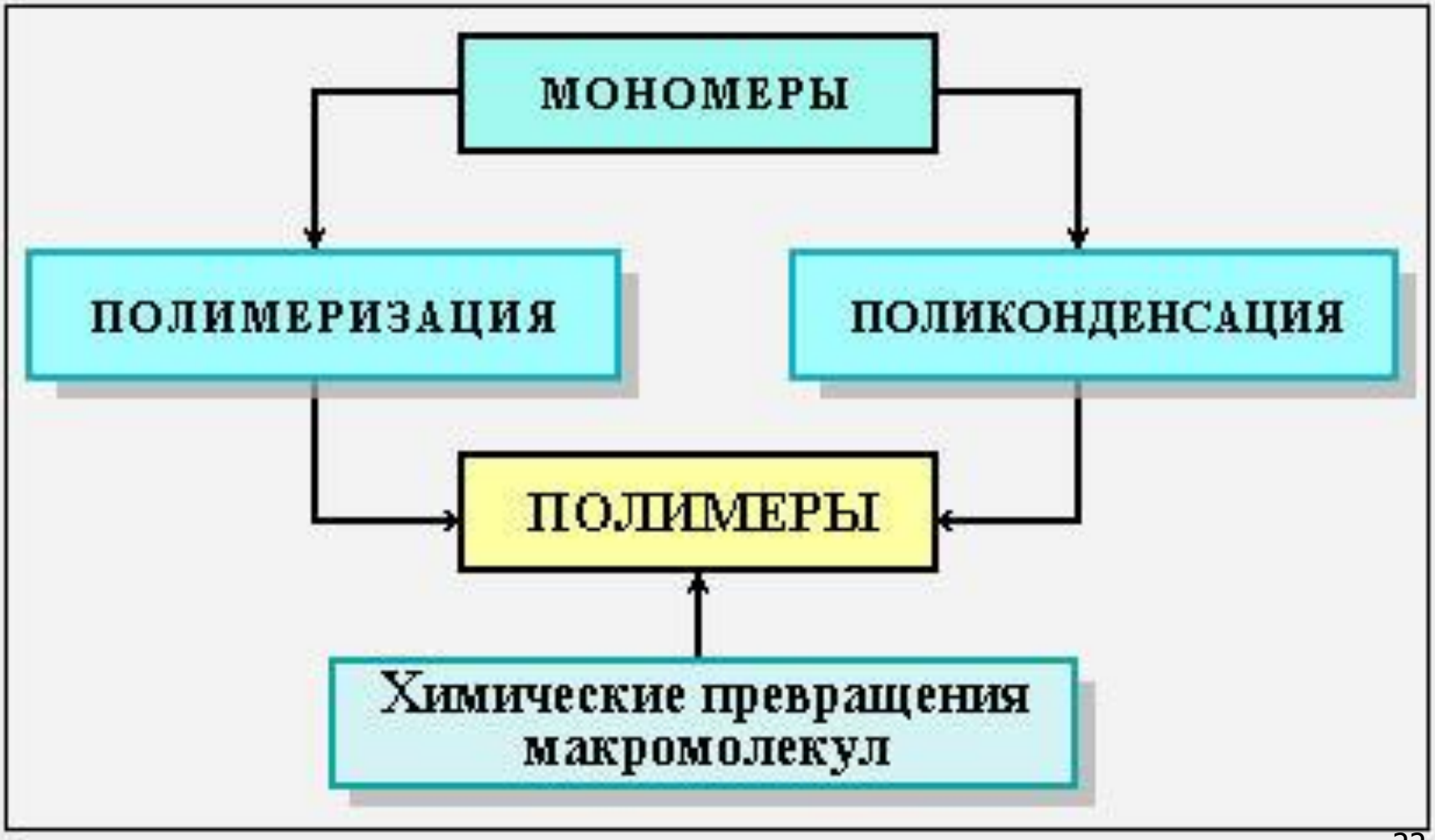


Схематичное строение пачки:
а – объединение макромолекул в пачки;
б – пачка с аморфным участком



Схематичное изображение молекулярных процессов при деформации:
1 – упругое, 2 – высокоэластичное, 3 – вязкое

Полимеры получают двумя способами:



Важнейшие полимеры, получаемые реакцией полимеризации

Полимер		Формула мономера
Название	Формула	
Полиэтилен	$(-CH_2-CH_2-)n$	$CH_2=CH_2$
Полипропилен	$(-CH_2-CH(CH_3)-)n$	$CH_2=CH(CH_3)$
Полистирол (поли-винилбензол)	$(-CH_2-CH(C_6H_5)-)n$	$CH_2=CH(C_6H_5)$
Поливинил-хлорид	$(-CH_2-CH(Cl)-)n$	$CH_2=CH(Cl)$
Тефлон	$(-CF_2-CF_2-)n$	$CF_2=CF_2$
Полиметил-метакрилат	$(-CH_2-C(CH_3)(C{=}O)(O-CH_3)-)n$	$CH_2=C(CH_3)(C{=}O)(O-CH_3)$

Полимер		Формула мономера
Название	Формула	
Полибутадиен	$(-CH_2-CH=CH-CH_2-)n$	$CH_2=CH-CH=CH_2$
Полиизопрен	$(-CH_2-C(CH_3)=CH-CH_2-)n$	$CH_2=C(CH_3)-CH=CH_2$
Полихлоропрен	$(-CH_2-C(Cl)=CH-CH_2-)n$	$CH_2=C(Cl)-CH=CH_2$
Бутадиен-стирольный каучук (СКС)	$(-CH_2-CH=CH-CH_2-CH(C_6H_5)-)n$ сополимер бутадиена и стирола	

Важнейшие полимеры, получаемые реакцией поликонденсации

Полимер: Название	Полимер: Формула	Формулы мономеров	
Лавсан	$[-O-CH_2CH_2-O-C(=O)-C_6H_4-C(=O)-]_n$	$HO-CH_2CH_2-OH$ + $HO-C(=O)-C_6H_4-C(=O)-OH$	
Капрон (полиамид-6)	$[-NH-(CH_2)_5-C(=O)-]_n$	$CH_2-CH_2-CH_2$ / CH_2-CH_2-NH > $C=O$ (полимеризация)	$NH_2-(CH_2)_5-C(=O)-OH$ (поликонденсация)
Найлон (полиамид-6,6)	$[-NH-(CH_2)_6-NH-C(=O)-(CH_2)_4-C(=O)-]_n$	$NH_2-(CH_2)_6-NH_2$ + $HO-C(=O)-(CH_2)_4-C(=O)-OH$	
Фенол-формальдегидные смолы	$[C_6H_4(OH)-CH_2]_n$ новолак, резол	C_6H_5OH + $H_2C=O$	
	$[C_6H_3(OH)-CH_2-C_6H_3(OH)-CH_2]_n$ с CH_2 у второго кольца резит		

$$H_2N-CH_2-C(=O)-OH + H-N(H)-CH(CH_3)-COOH \xrightarrow{-H_2O} H_2N-CH_2-C(=O)-N(H)-CH(CH_3)-COOH$$

глицин аланин глицилаланин (дипептид)

Электроизоляционное стекло

- Основная масса стекол принадлежит к числу **оксидных** и в зависимости **от химического состава** подразделяется:
  - по виду оксида-стеклообразователя (силикатные SiO_2, боратные B_2O_3, фосфатные P_2O_5, германатные GeO_2, алюминатные Al_2O_3, алюмосиликатные $Al_2O_3 \cdot SiO_2$, боросиликатные $B_2O_3 \cdot SiO_2$, алюмоборосиликатные $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot B_2O_3$ и др.);
  - по содержанию оксидов щелочных металлов (бесщелочные, не содержат оксидов щелочных металлов, но могут содержать оксиды щелочноземельных металлов MgO, CaO, BaO и др.; малощелочные; многощелочные).
- Производятся также:
  - галогенидные стекла, главным образом на основе BeF_2 (фторбериллатные стекла);
  - халькогенидные − на основе S, Se, Te (элементов VI b подгруппы).

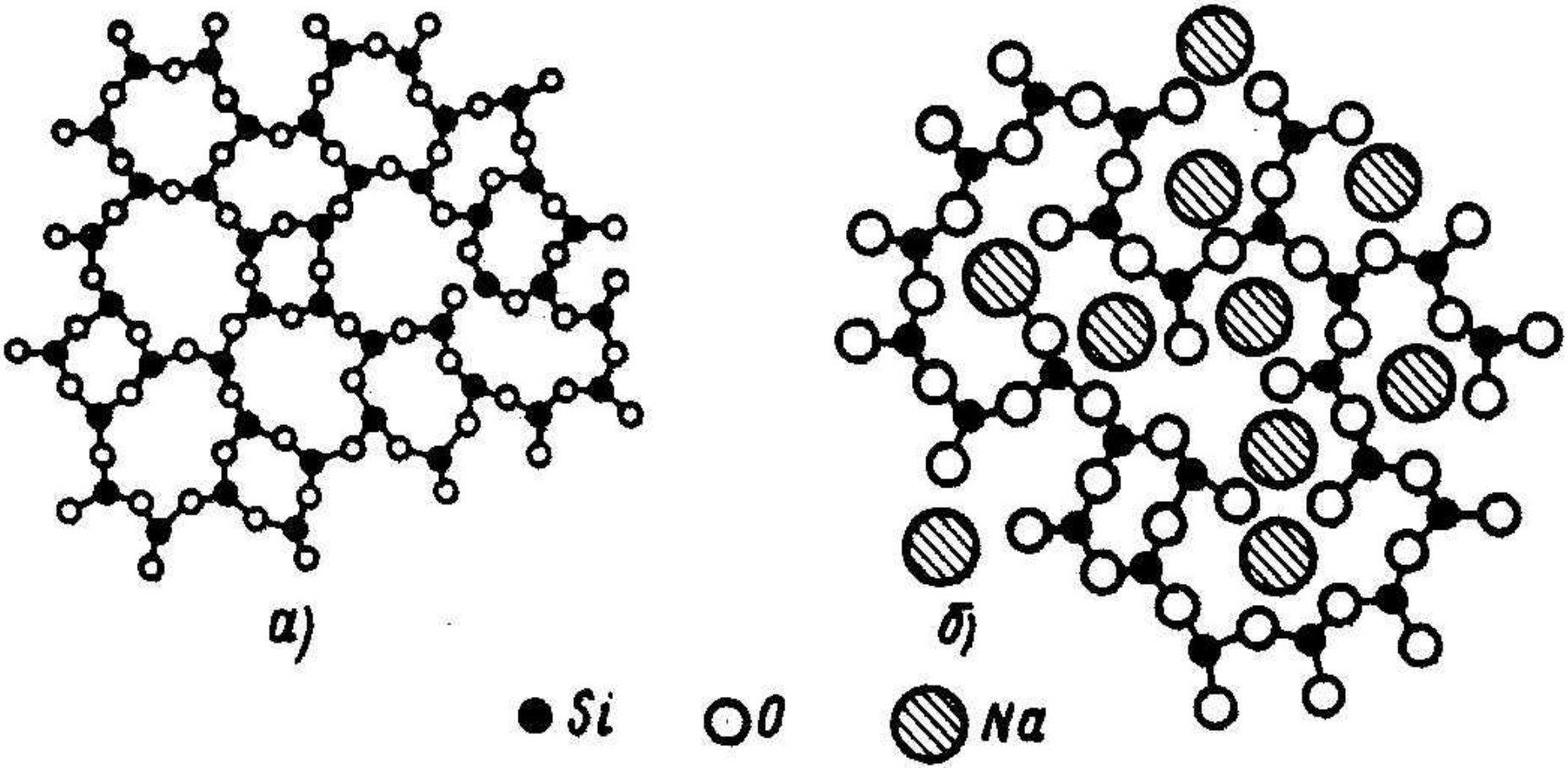


Схема непрерывной структурной сетки стекла:
а – кварцевого, б – натриево-силикатного

Свойства стекол (продолжение)

- Для электротехнических стекол наибольшее значение имеют ***температура размягчения, термический коэффициент линейного расширения α и стойкость стекла к термоударам, или термостойкость*** стекла, т. е. разность температур, которую стекло выдерживает без разрушения при резкой смене температуры поверхности

$$\Delta T = k\frac{\sigma_{\text{в}}}{\alpha E \delta}\sqrt{a\Delta\tau}$$

- где k – константа; $\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление; α – коэффициент термического расширения; E – модуль упругости; δ – толщина; a – коэффициент температуропроводности; $\Delta\tau$ – время изменения температуры. Чем толще образец, тем ниже его стойкость к термоударам.
- **Химическая стойкость** характеризует сопротивляемость стекол разрушающему воздействию различных реагентов: воды, кислот, щелочей.

Электросопротивление стекол

- **Электросопротивление** ρ технических стекол при невысоких температурах находится в пределах $10^9 \div 10^{17}$ Ом·м. Электропроводность γ стекол осуществляется главным образом ионами щелочных (Li^+, Na^+, K^+), в некоторых случаях щелочноземельных (Mg^{2+}) металлов, а также анионами (F^-, OH^-). При наличии в стекле ионов переменной валентности (V, Pb, Fe) может иметь место и электронная проводимость, тогда стекла становятся **полупроводниками**. Полупроводниковыми являются халькогенидные стекла.
- Для оценки **изолирующих свойств** стекол при повышенной температуре используют показатель ТК-100 – значение температуры, при которой ρ составляет 10^6 Ом·м. Выше её **стекло перестает быть диэлектриком**.
- В зависимости от состава стекол ТК-100 = 150÷600ºС. У закаленных стекол γ в 2÷3 раза выше, чем у отожженных.
- **Поверхностная** γ стекла обусловлена конденсацией водяной пленкой, в которой растворены продукты разрушения стекла (прежде всего катионы щелочных металлов) и которая, особенно во влажной атмосфере, способна резко ухудшать электроизоляционные свойства стекла.

Диэлектрические свойства стекол

- **Диэлектрическая проницаемость** стекол ε - от 3,75 (для кварцевого стекла) до 15 и выше. Слабосвязанные щелочные катионы или легко поляризуемые ионы (Pb, Ba и др.) вызывают рост показателя ε (у стекол системы PbO-Bi_2O_3-B_2O_3 ε достигает 40). Диэлектрическая проницаемость стекол повышается с ростом температуры и уменьшается с ростом частоты электрического поля.
- **Тангенс угла диэлектрических потерь** стекол находится в пределах $tg\delta = (2 \div 3) \cdot 10^{-4}$.
- **Электрическая прочность** стекол $E_{пр}$ зависит от химического состава и от толщины стекла, состояния поверхности, характера окружающей среды.
- При высокой удельной электропроводности (в частности, при высокой температуре) может происходить **электролиз** стекла: в объеме между впаянными электродами наблюдается разложение стекла. Электролиз может привести к электрическому пробою стекла.

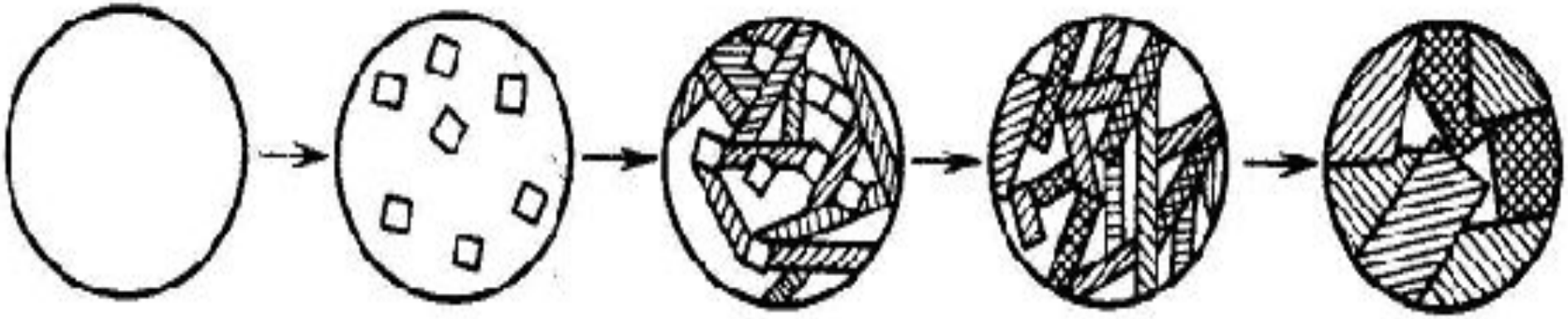
Применение стекол

Тип	Область применения	Требуемые свойства
Конден-саторные	Диэлектрик конденсаторов, применяемых в фильтрах, импульсных генераторах, колебательных контурах высокочастотных устройств	Высокие ε, $E_{пр}$, малый tgδ
Устано-вочные	Установочные детали, изоляторы (телеграфные, антенные, опорные и т.д.), бусы, платы	Высокие электроизоляционные свойства при высокой термо- и химической стойкости
Лампо-вые	Колбы (баллоны) и ножки осветительных ламп, различных электровакуумных приборов	Спаиваемость с металлами (W, Mo и др.), необходимые значения α и температуры размягчения
Порош-ковые	Стеклянные припои, эмали, прессованные фасонные детали	Низкая температура размягчения, необходимые значения α
Стекло-волокно	Текстильные материалы, световоды	Низкие вязкость и поверхностное натяжение
Ситаллы	Платы, установочные детали, изоляторы и др.	Высокие электроизоляционные свойства, прочность,

Ситаллы и микалексы

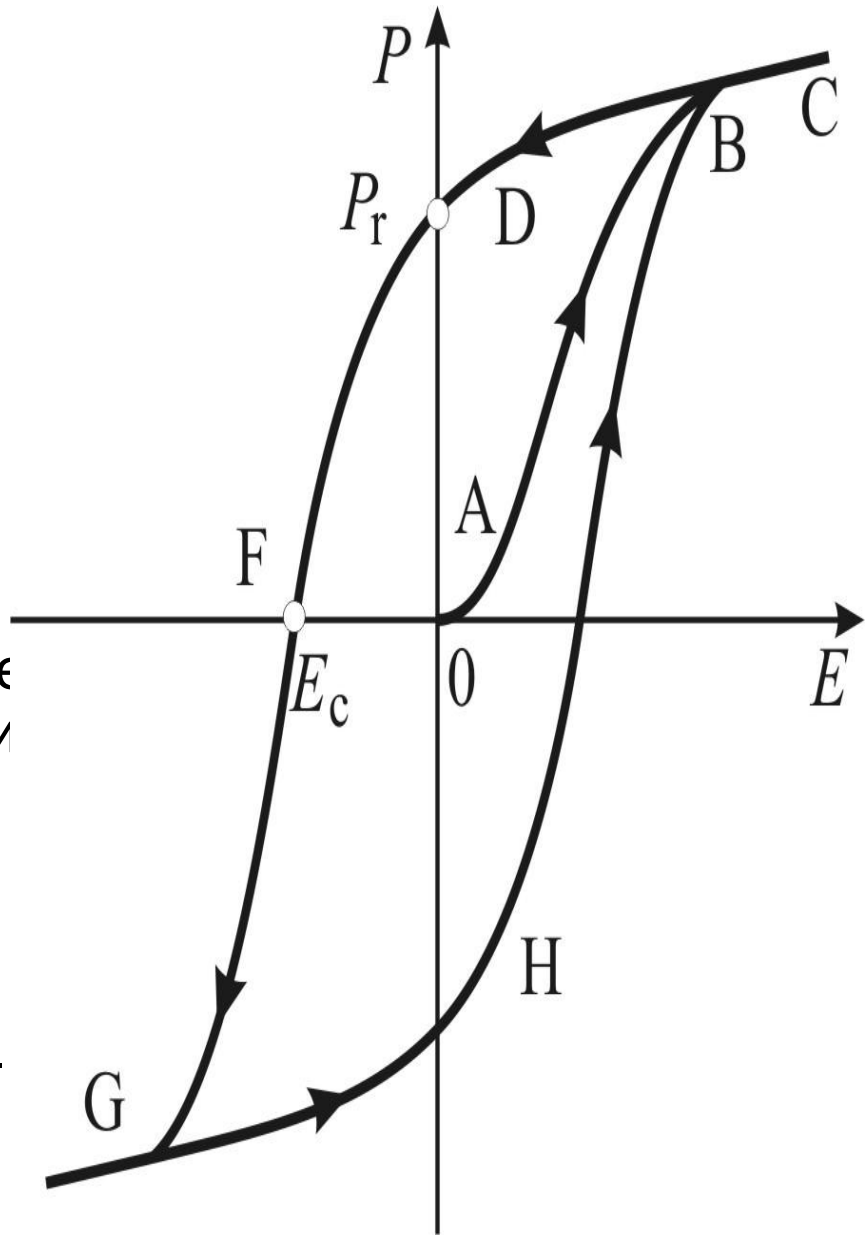
- **Ситаллы** – стеклокристаллические материалы, получаемые путем направленной кристаллизации стекла.
- Содержание кристаллической фазы в ситаллах, в зависимости от условий их получения, – от 30 до 95 %. Размер кристаллов обычно $\leq 1 \div 2$ мм. Если свойства стекла в основном определяются его химическим составом, то для ситаллов решающее значение приобретают структура и фазовый состав. Электроизоляционные показатели ситаллов превосходят показатели стекол того же химического состава: ситаллы имеют более высокие значения ρ, $E_{пр}$ и более низкий $tg\delta$.
- **Фотоситаллы** – ситаллы, получаемые в результате кристаллизации специальных светочувствительных стекол, до термообработки подвергнутых ультрафиолетовому облучению.
- **Микалекс** – композиционный материал, состоящий из стекла, наполненного слюдяным порошком. **Применение** – изоляционные детали мощных приборов, где важна стойкость к воздействию высокой температуры ($300 \div 350$ °C) и дуговых разрядов.

Схема кристаллизации стекла при образовании ситаллов с помощью катализаторов



Сегнетоэлектрики

- Сегнетоэлектрики обладают нелинейной зависимостью поляризации от напряженности электрического поля и способностью к переполяризации.
- Получили название от сегнетоэлектрической соли $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ – минерала, для которого впервые наблюдалась нелинейность зависимости $P(T)$.
- Характерная особенность - наличие **петли гистерезиса** на зависимости $P(T)$.
- Существование **сегнетоэлектрического гистерезиса** связано с наличием **сегнетоэлектрических доменов** – объемных областей, в каждой из которых дипольные моменты ориентированы одинаково.



Пьезоэлектрики

- **Пьезоэлектрики** – вещества (диэлектрики и полупроводники), в которых при определенных упругих деформациях (напряжениях) возникает вынужденная электрическая поляризация даже в отсутствие электрического поля – **прямой пьезоэффект.**
- Следствие прямого пьезоэффекта – **обратный пьезоэффект** – появление механических деформаций под действием электрического поля.
- При упругой деформации происходит смещение положительных и отрицательных ионов друг относительно друга, что приводит к возникновению электрического момента. Пьезоэффекты наблюдаются только в кристаллах, не имеющих центра симметрии. Смещение частиц в кристаллах, обладающих центром симметрии, не приводит к появлению поляризованного состояния, а происходит электрическая компенсация моментов.
- К пьезоэлектрикам относятся, например, кварц, кристаллы дигидрофосфата калия KH_2PO_4, различные виды пьезокерамики и др. Пьезоэлектрики находят применение в качестве мощных излучателей, приемников и источников ультразвука, стабилизаторов частоты, электрических фильтров высоких и низких частот, трансформаторов напряжения и тока.

Пироэлектрики

- **Пироэлектрики –** кристаллические диэлектрики, у которых при нагревании или охлаждении происходит изменение поляризации. Пироэлектрики обладают спонтанной поляризацией вдоль полярной оси. При наличии полярной оси отсутствует центр симметрии. Поэтому любой пироэлектрик является пьезоэлектриком, но не наоборот.
- Повышение температуры приводит к разупорядочению диполей за счет теплового движения, а следовательно, к изменению спонтанной поляризации – **первичный пироэффект**. С увеличением температуры изменяются линейные размеры кристалла (тепловое расширение), что также приводит к изменению спонтанной поляризации – **вторичный (ложный) пироэффект**.
- Примеры пироэлектриков: турмалин $Li_2SO_4 \cdot H_2O$; $LiTaO_3$, $LiNbO_3$, $Pb_5Ge_3O_{11}$; керамические: $BaTiO_3$, титанат-цирконат свинца; полимеры: поливинилфторид $[–CH_2–CHF–]_n$, полиакрилонитрил $[–CH_2CH(CN)–]_n$. На основе пироэлектриков изготавливают высокочувствительные теплодатчики, термоэлектрические преобразователи, детекторы инфракрасного излучения малой мощности.

Электреты

- ***Электреты*** – диэлектрики, длительное время сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, вызвавшего поляризацию. Они являются источниками электрического поля (аналоги постоянных магнитов).
- Электреты могут быть получены практически из любых полярных диэлектриков: органических полимерных (политетрафторэтилен, он же фторопласт-4, фторлон-4, тефлон $[–CF_2–CF_2–]_n$, полипропилен $[–CH_2CH(CH_3)–]_n$, поликарбонаты $[–ORO–C(O)–]_n$, где R – ароматический или алифатический остаток; полиметилметакрилат, он же плексиглас $[–CH_2–CH_3(COOCH_3)–]_n$ и др.); неорганических монокристаллических (кварц, корунд и др.), поликристаллических (керамики, ситаллы и др.), стекол. Наиболее стабильны электреты из пленочных фторсодержащих полимеров.

Получение и применение электретов

- Стабильные электреты получают:
  - нагревая, а затем охлаждая диэлектрик в сильном электрическом поле (**термоэлектреты**); освещая в сильном электрическом поле (**фотоэлектреты**); подвергая радиоактивному облучению (**радиоэлектреты**); поляризацией в сильном электрополе без нагревания (**электроэлектреты**); поляризацией в магнитном поле (**магнитэлектреты**); при застывании органических растворов в электрическом поле (**криоэлектреты**); механической деформацией полимеров (**механоэлектреты**); трением (**трибоэлектреты**); действием поля коронного разряда (**короноэлектреты**).
- Со временем у электретов наблюдается уменьшение заряда. Например, у электрета из политетрафторэтилена время жизни ~$10^2 \div 10^4$ лет.
- Применение: источники электрического поля (электретные телефоны и микрофоны, вибродатчики, генераторы слабых переменных сигналов, электрометры, электростатические вольтметры и др.); чувствительные датчики в дозиметрах, устройствах электрической памяти; для изготовления барометров, гигрометров, газовых фильтров, пьезодатчиков.

Название диэлектрика	Электрическая прочность, кВ/см (50 Гц)
Воздух	30
Элегаз (SF_6)	89
гелий	6
$C_{14}F_{24}$	300
трансформаторное масло	280
конденсаторное масло	300
кабельное масло	200
Полиметилметакрилат	150-250
Полиэтилен	450-550
слюда	100-250 (70-160)
поливинилхлорид	150-350
Фенопласт элекроизоляц.	130-180
Фарфор (стеатит)	400
Электрокартон (пропитанный)	400-500
Гетинакс	40-50
Стекло (кварц)	300-400
Кремнийорганическая резина	300
Фторопласт	200-350