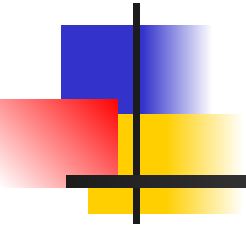


Диэлектрические материалы



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; **искусственные**, получаемые путем химической переработки природного сырья; **синтетические**, получаемые методом химического синтеза.
- **По технологическому признаку:** **электрокерамические**, **полимерные**, **лаки**, **компаунды**, материалы на основе **слюда** и др.

Относительная диэлектрическая проницаемость

- **Поляризация** - обратимое смещение электрически заряженных частиц, входящих в состав диэлектрика, при приложении к нему электрического поля.

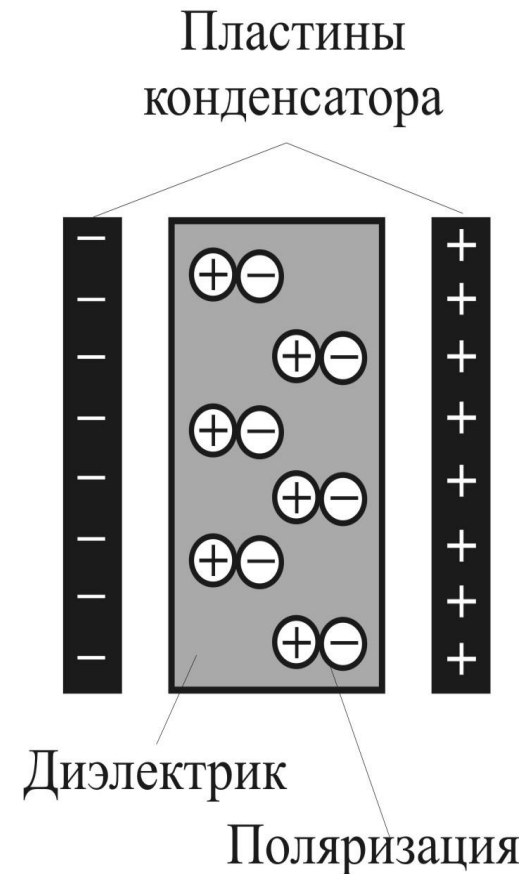
- Емкость конденсатора, имеющего на пластинах заряд Q и заполненного вакуумом,

$$C_0 = Q / U_0,$$

- где U_0 – разность потенциалов. После того, как в зазор будет вставлен диэлектрик,

- $C = Q / U = \epsilon C_0$.

- Величину $\epsilon = E_0 / E$ (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 \mathbf{p}_j .
- **Вектор поляризации** представляет собой объемную плотность электрического дипольного момента диэлектрика: $\mathbf{P} = (\sum \mathbf{p}_j) / V$.
- При поддержании постоянной разности потенциалов и введении в конденсатор изотропного диэлектрика возрастает **электрическая индукция (электрическое смещение) \mathbf{D}** :
 - $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{D}_0$.
- $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Кл / (В · м) – **электрическая постоянная**.
- Вектора \mathbf{E} и \mathbf{D} направлены от положительного заряда к отрицательному. Вектор \mathbf{P} направлен от отрицательного заряда к положительному. Векторы \mathbf{E} , \mathbf{D} и \mathbf{P} в изотропных диэлектриках имеют одно и то же направление.
 - $\mathbf{P} = \chi_e \varepsilon_0 \mathbf{E} = \alpha \mathbf{E}$,
- 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**:

$$P_{\text{СКВ}} = UI = U^2 / R = I^2 R;$$

- потерь при переменных токах, обусловленных процессами миграционной и релаксационной поляризации – 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** ρ – потери, отнесенные к единице массы, Вт/кг, или к единице объема материала (плотность мощности потерь), Вт/м³.

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 $i_{\text{СКВ}}$ и плотности тока смещения $i_{\text{СМ}}$:

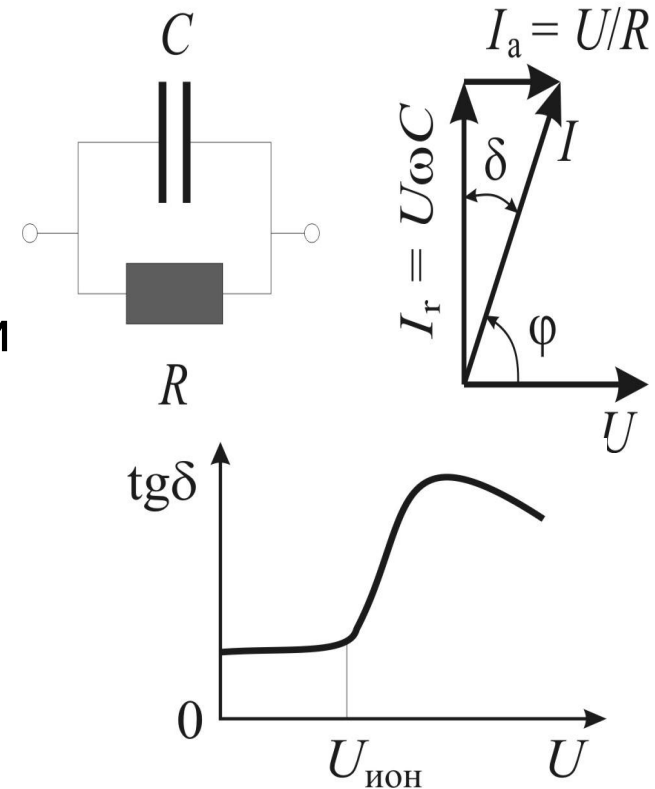
Полный ток подразделяется на активную i_a и реактивную i_r составляющие: $i = i_a + i_r$;
 $i_a = (\gamma + \varepsilon_0 \varepsilon'' \omega) E$; $i_r = \varepsilon_0 \varepsilon' \omega E$.

- В чисто емкостной цепи полные потери составляют:

- $P = U i_a = U i_r \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$;

- $\operatorname{tg} \delta = i_a / i_r$,

- где δ – угол диэлектрических потерь.
- Значение $\operatorname{tg} \delta$ для лучших электроизоляционных материалов составляет $\sim 10^{-5} \div 10^{-4}$.
- Диэлектрические потери увеличиваются с ростом температуры.
- Добротность изоляции** $Q = 1 / \operatorname{tg} \delta$.



Резкое увеличение $\operatorname{tg} \delta$ с некоторого значения $U_{\text{ион}}$ 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} , $\text{C}_{14}\text{F}_{24}$ 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	$E_{\text{пр}}, \text{МВ/м}$ $U_{\text{пр}}/h$
Воздух	3
Водород	1,8
Азот	3
Гелий	0,72
Фреон	7,4

Жидкие диэлектрики

- **Трансформаторное масло** (нефтяное минеральное масло - смесь различных углеводородов,
 - $E_{\text{пр}} = 20 \div 50$ 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.
 - $E_{\text{пр}} = 20$ 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, маслonaполненные 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 $\text{tg}\delta = (1\div 3) \cdot 10^{-4}$, низкой гигроскопичностью и повышенной нагревостойкостью. Различают полиметил- (ПМС), полиэтилен- (ПЭС), полифенилсилоксановые (ПФС) и другие кремнийорганические жидкости. Основным их **недостатком** является высокая стоимость.
- **Преимущества фторорганических жидкостей** (например, $(\text{C}_4\text{F}_9)_3\text{N}$, $(\text{C}_4\text{F}_9)_2\text{O}$) по сравнению с кремнийорганическими: полная негорючесть, высокие дугостойкость, нагревостойкость и более интенсивный теплоотвод, малые $\text{tg}\delta$ 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** $U_{\text{пр}}$, 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 пробую, – **электрическая прочность** $E_{\text{пр}}$. Для равномерного электрического поля:

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / h.$$

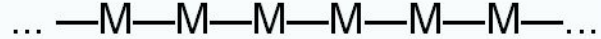
- В большинстве случаев пробивное напряжение возрастает с увеличением толщины изоляции медленнее, чем по линейному закону. В особо тонких слоях начинают сказываться неоднородности структуры и электрическая прочность уменьшается.
- Для надежной работы электротехнического устройства рабочее напряжение изоляции $U_{\text{раб}}$ должно быть существенно меньше $U_{\text{пр}}$. Отношение $U_{\text{пр}} / U_{\text{раб}}$ 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

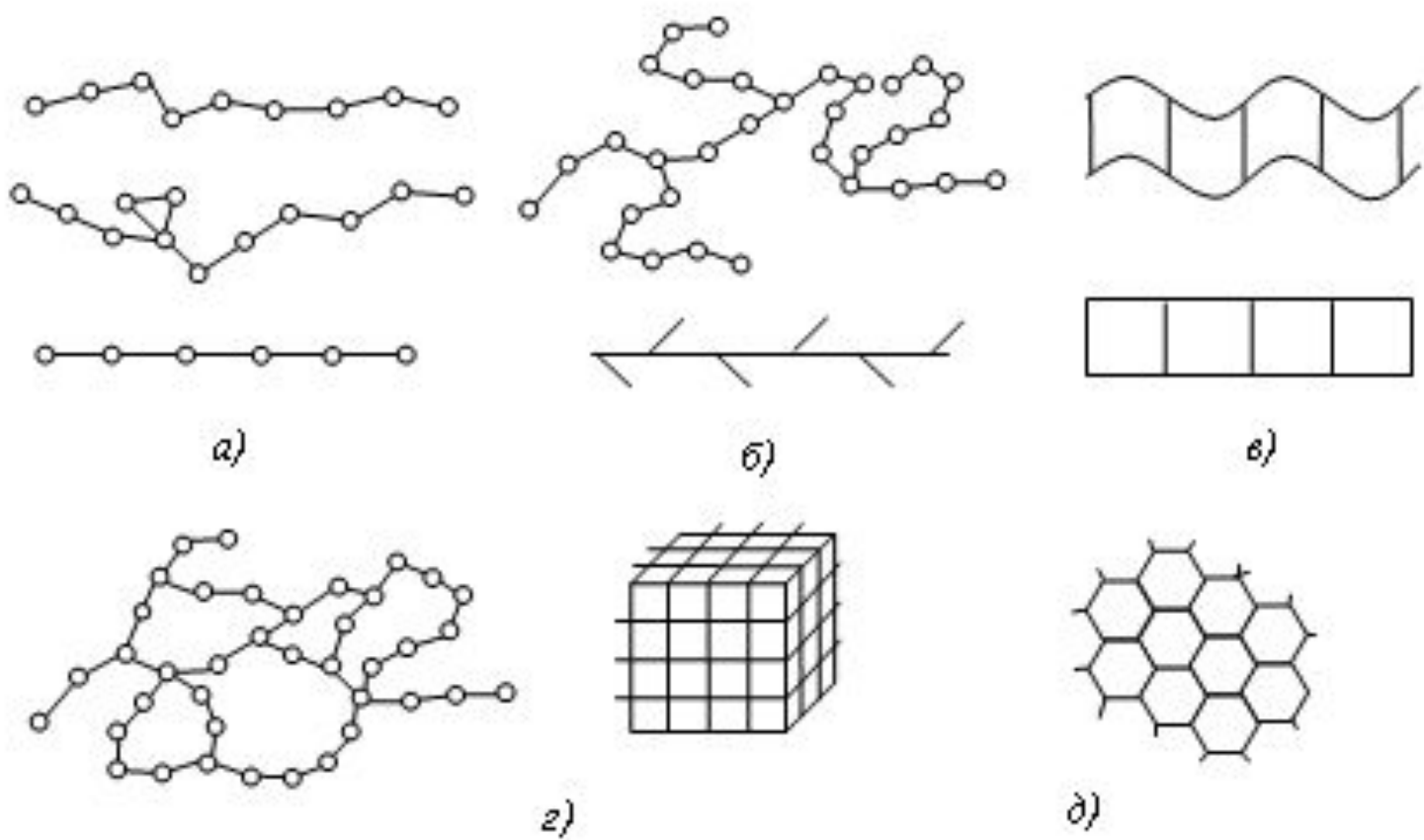


разветвленные

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

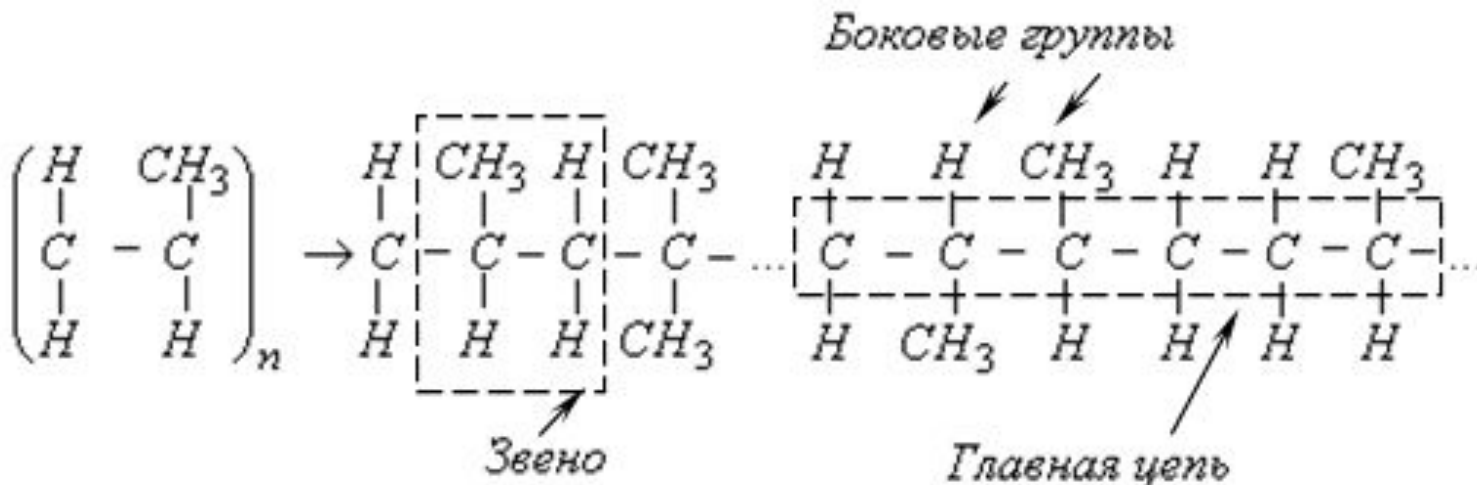
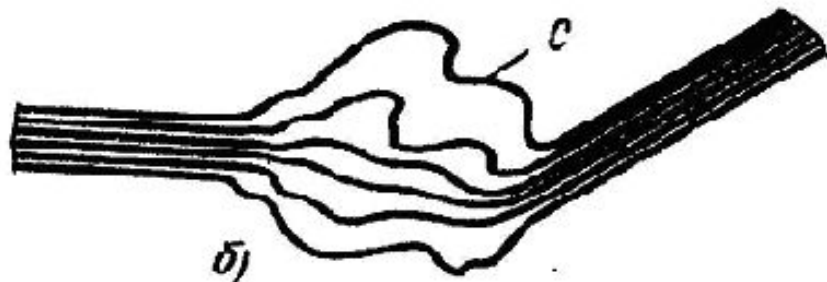
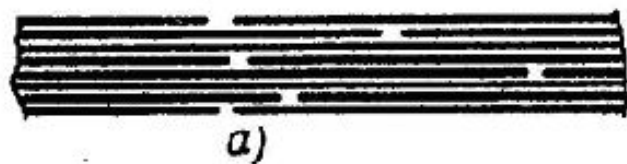
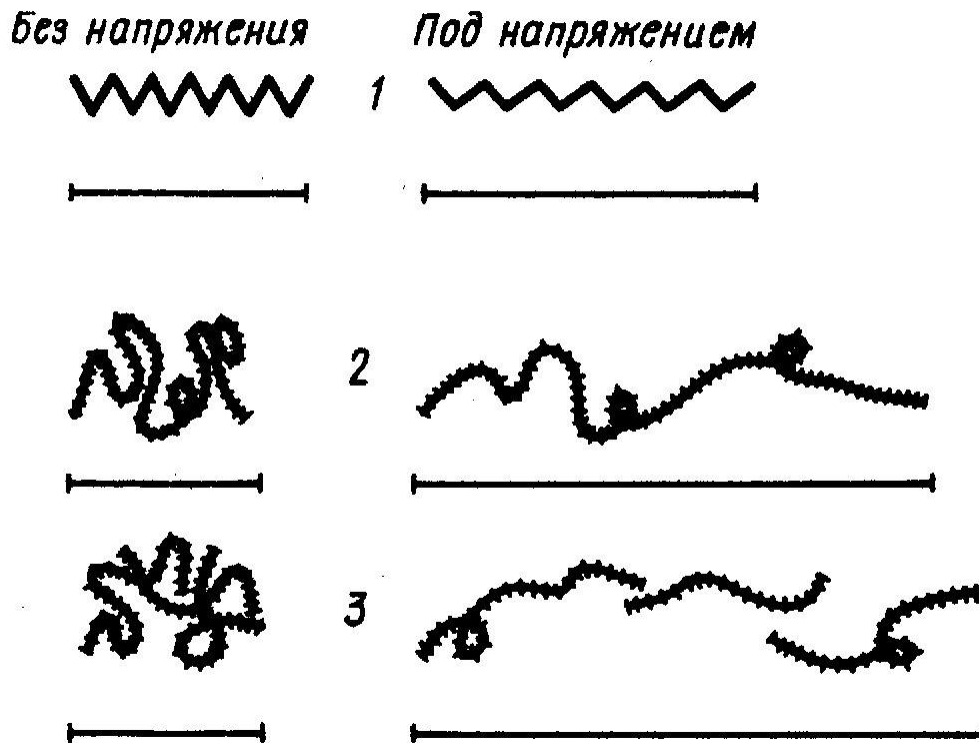


Схема строения линейной макромолекулы

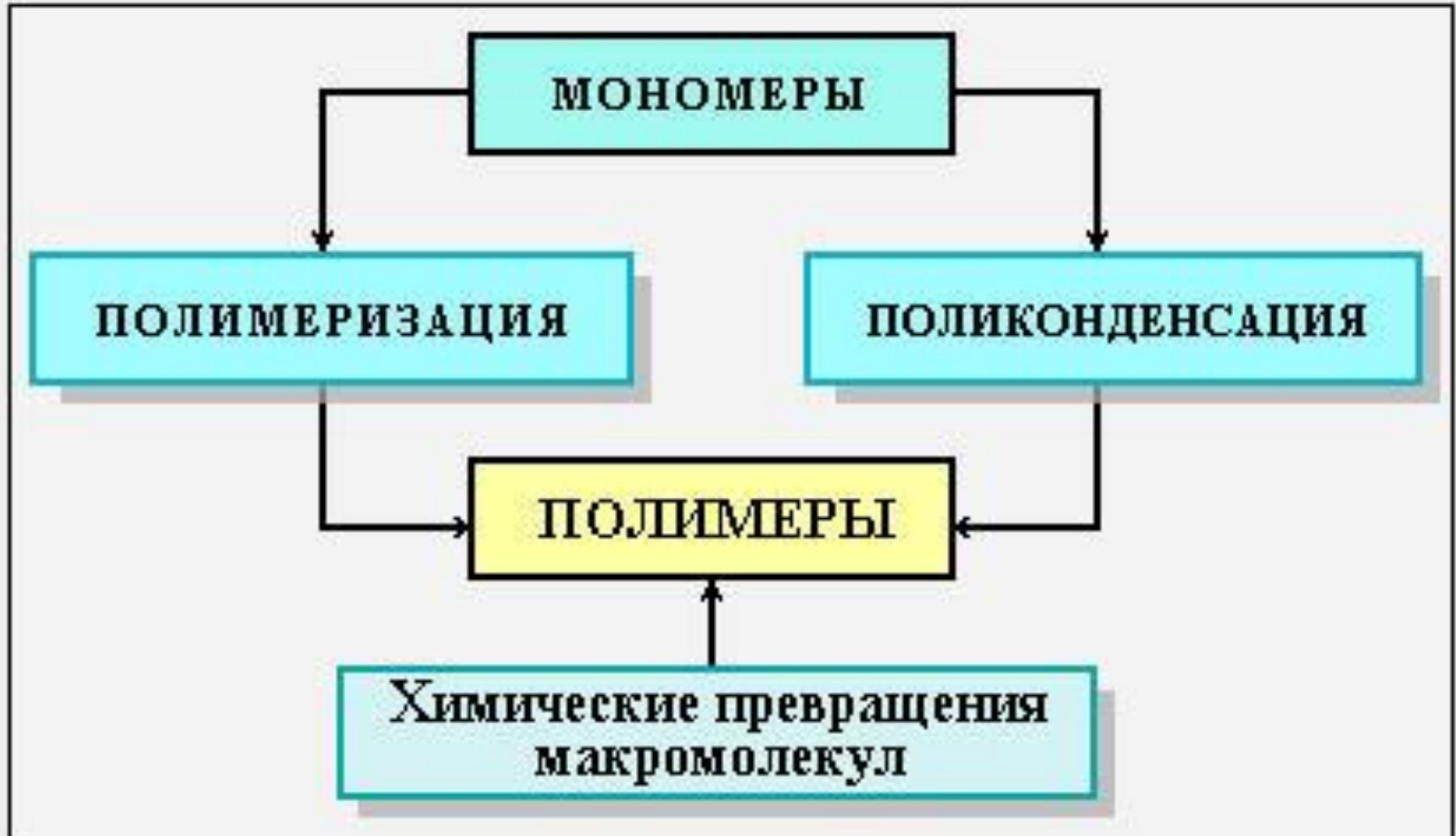


Схематичное строение пачки:
 а – объединение макромолекул в пачки;
 б – пачка с аморфным участком



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

Полимеры получают двумя способами:

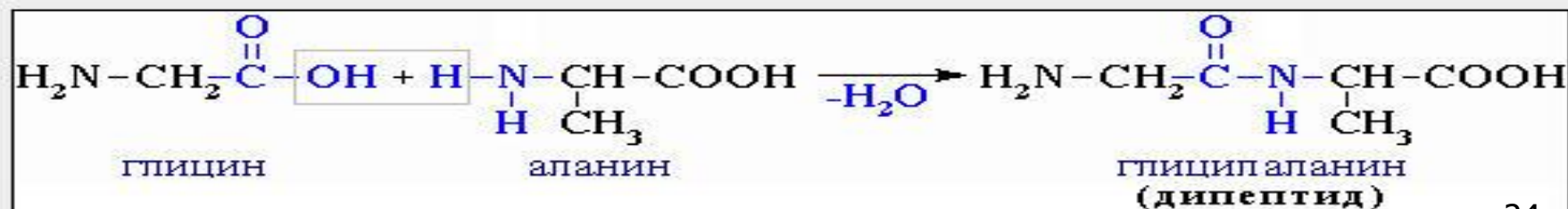


Важнейшие полимеры, получаемые реакцией полимеризации

ПОЛИМЕР		Формула мономера	ПОЛИМЕР		Формула мономера
Название	Формула		Название	Формула	
Полиэтилен	$(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	Полибутадиен	$(-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$
Полипропилен	$(-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-)_n$	$\text{CH}_2=\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}$		Полиизопрен	$(-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{C}}=\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$
Полистирол (поли- винилбензол)	$(-\text{CH}_2-\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}-)_n$	$\text{CH}_2=\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}$	Полихлоропрен		$(-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{C}}=\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$
Поливинил- хлорид	$(-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-)_n$	$\text{CH}_2=\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}$		Бутадиен- стирольный каучук (СКС) сополимер бутадиена и стирола	$(-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}_2-\text{CH}}-)_n$
Тефлон	$(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$	$\text{CF}_2=\text{CF}_2$			
Полиметил- метакрилат	$(-\text{CH}_2-\underset{\text{C}(\text{O})\text{OCH}_3}{\text{C}}(\text{CH}_3)-)_n$	$\text{CH}_2=\underset{\text{C}(\text{O})\text{OCH}_3}{\text{C}}(\text{CH}_3)$			

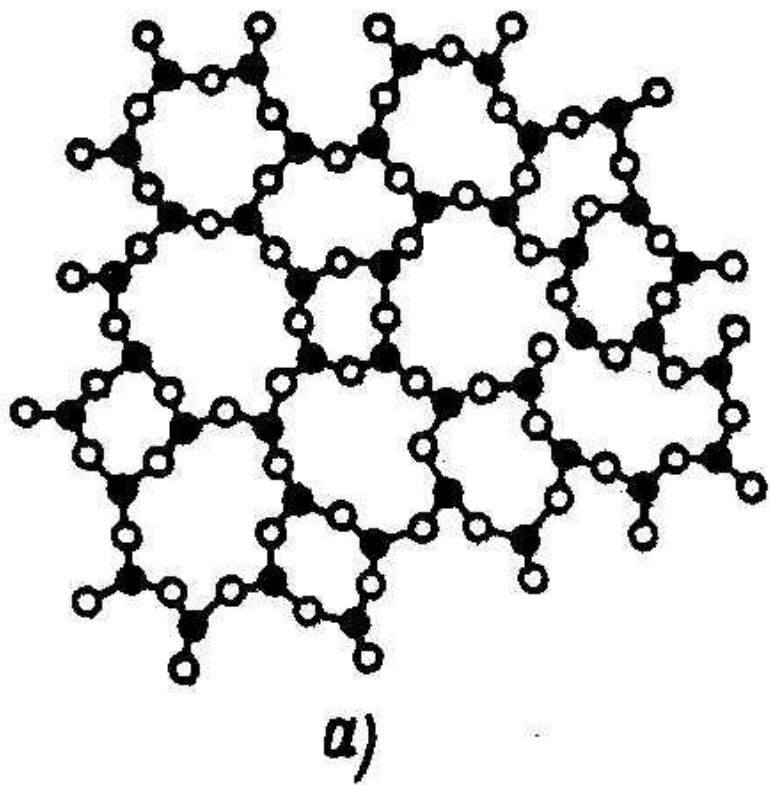
Важнейшие полимеры, получаемые реакцией поликонденсации

П О Л И М Е Р		Формулы мономеров	
Название	Формула		
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)	$[-NH-(CH_2)_5-C(=O)-]_n$	$CH_2-CH_2-CH_2-C(=O)-$ $ $ CH_2-CH_2-NH- (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- формаль- дегидные смолы	$\left[\begin{array}{c} OH \\ \\ \text{C}_6H_3 \\ \\ CH_2 \end{array} \right]_n$ новолак, резол	$\text{C}_6H_5OH + H_2C=O$	
	$\left[\begin{array}{c} OH \quad \quad OH \\ \quad \quad \\ \text{C}_6H_3 \quad \quad \text{C}_6H_3 \\ \quad \quad \\ CH_2 \quad \quad CH_2 \\ \\ CH_2 \end{array} \right]_n$ резит		



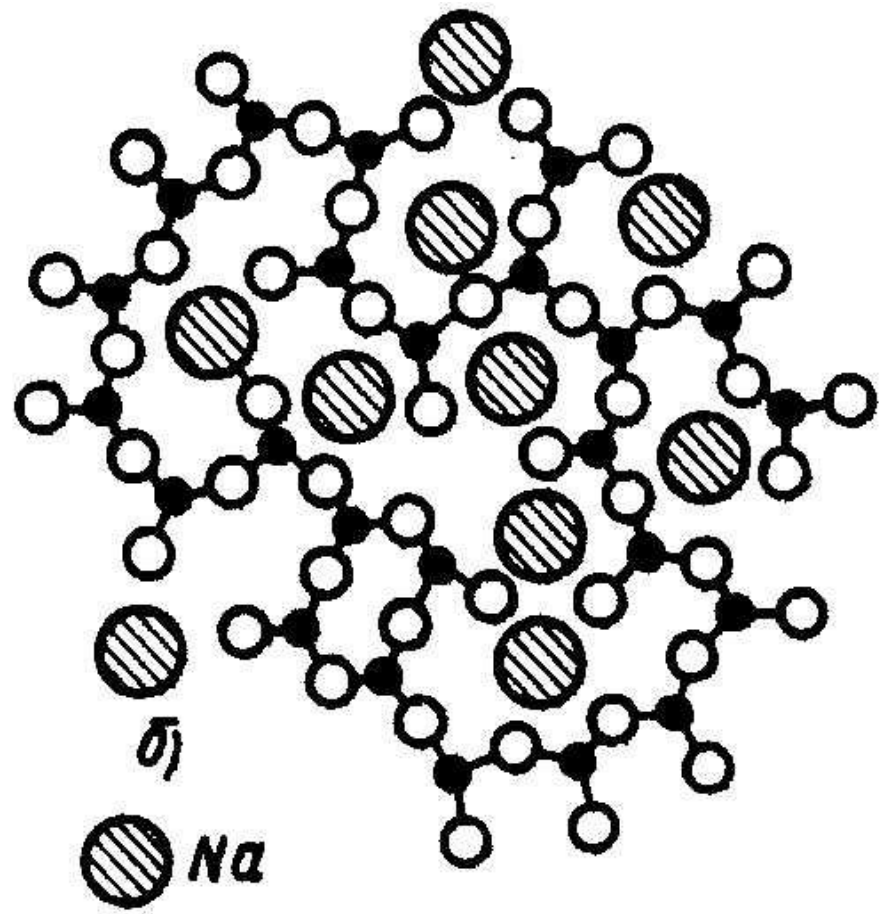
Электроизоляционное стекло

- 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 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, боросиликатные $\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, алюмоборосиликатные $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ 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).



● Si

○ O



● Na

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 $\text{TK-100} = 150 \div 600^\circ\text{C}$. 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 $\text{PbO-Vi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 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 $\text{tg}\delta = (2\div 3) \cdot 10^{-4}$.
- **Электрическая прочность** стекол $E_{\text{пр}}$ 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 пробоею стекла.

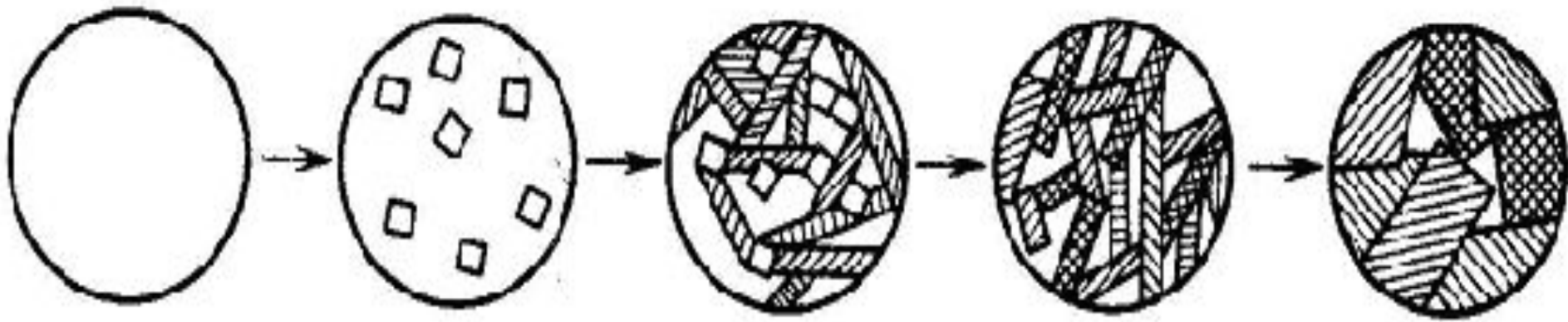
Применение стекол

Тип	Область применения	Требуемые свойства
Конденсаторные	Диэлектрик конденсаторов, применяемых в фильтрах, импульсных генераторах, колебательных контурах высокочастотных устройств	Высокие ϵ , $E_{пр}$, малый $tg\delta$
Установочные	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
Порошковые	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

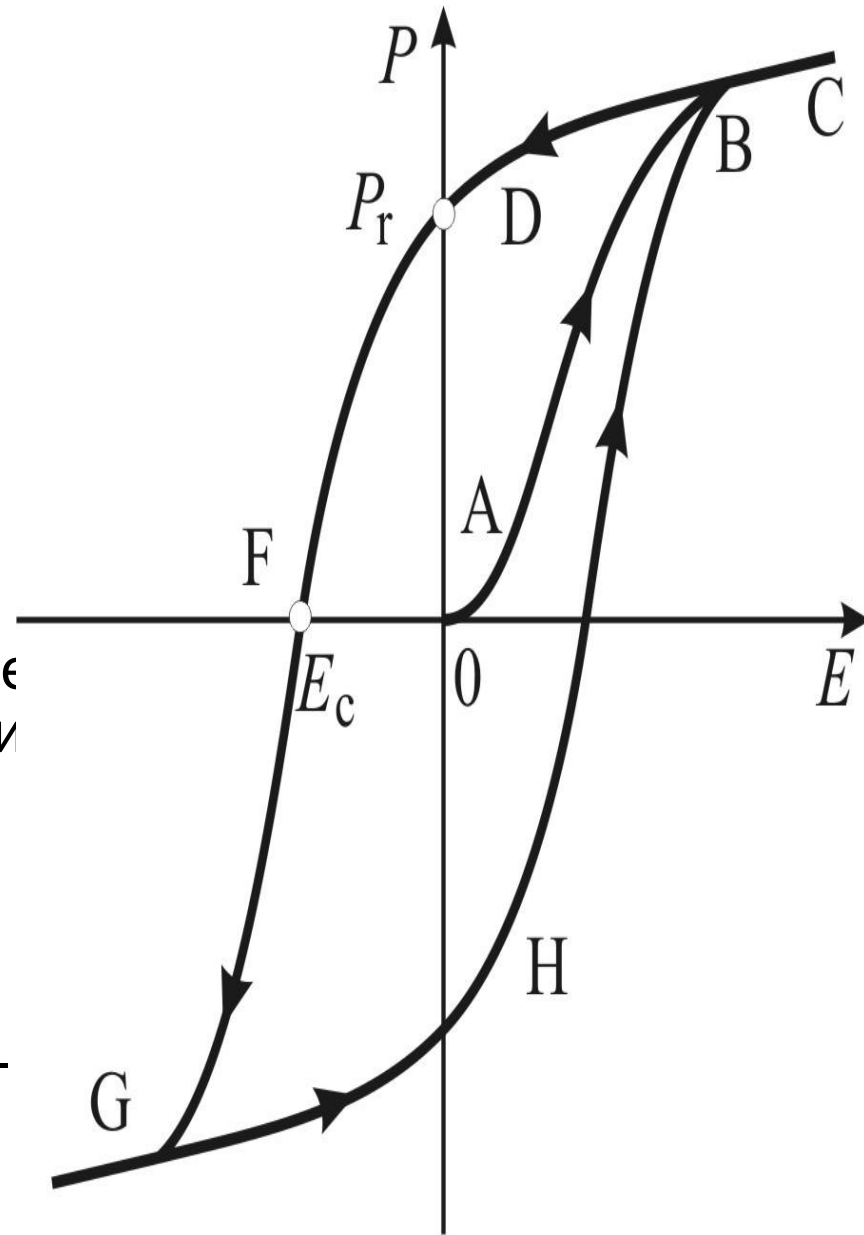
- **Ситаллы** – стеклокристаллические материалы, получаемые путем направленной кристаллизации стекла.
- Содержание кристаллической фазы в ситаллах, в зависимости от условий их получения, – от 30 до 95 %. Размер кристаллов обычно $\leq 1\div 2$ мм. Если свойства стекла в основном определяются его химическим 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 $\text{tg}\delta$.
- **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 ($300\div 350$ °С) 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 $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 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 $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; LiTaO_3 , LiNbO_3 , $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$; керамические: BaTiO_3 , титанат-цирконат свинца; полимеры: поливинилфторид $[-\text{CH}_2-\text{CHF}-]_n$, полиакрилонитрил $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{CN})-]_n$. На основе пироэлектриков изготавливают высокочувствительные датчики, 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 $[-CH_2-CH_3(COOCCH_3)-]_n$ 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 $\sim 10^2 \div 10^4$ 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 электроизоляц.	130-180
Фарфор (стеатит)	400
Электрокартон (пропитанный)	400-500
Гетинакс	40-50
Стекло (кварц)	300-400
Кремнийорганическая резина	300
Фторопласт	200-350