

# Диэлектрические материалы

**Диэлектрические материалы (диэлектрики)** - это материалы, способные поляризоваться под воздействием электрического поля. Поляризацией называется процесс смещения и упорядочения связанных зарядов в диэлектрике при возбуждении внешним электрическим полем. Связанными зарядами являются электроны оболочек атомов, ионы, атомные ядра. Процесс поляризации сопровождается выделением тепла и приводит к нагреву диэлектрика.

С позиций зонной теории к диэлектрикам относятся материалы, у которых ширина запрещенной зоны  $\Delta W_g$  превышает 3 эВ. Одним из основных свойств диэлектриков является высокое значение удельного электросопротивления, достигающее  $10^6 \dots 10^{16}$  Ом $\times$ м. По физическим свойствам и функциям, выполняемым в РЭС, диэлектрические материалы подразделяют на пассивные и управляемые диэлектрики.

**Пассивные диэлектрики** выполняют, в основном, функции электроизоляционных материалов, в том числе используются для изготовления прокладок электрических конденсаторов. Пассивные диэлектрики нашли также широкое распространение для изготовления различных конструктивных элементов радиоаппаратуры, таких, как печатные платы, корпуса приборов, ручки и кнопки управления, индикаторные устройства. К пассивным диэлектрикам относятся различные электроизоляционные и конструкционные материалы, такие как пластмассы, лаки, компаунды, клеи, волокнистые материалы, электроизоляционные стекла, керамика.

**Управляемые диэлектрики** - это диэлектрические материалы, электрические параметры которых можно изменить воздействием электрического поля, механических деформаций, тепла и света. К управляемым диэлектрикам относятся сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, жидкие кристаллы и др.

# Полярные и неполярные диэлектрики

Молекула диэлектрика со смещенными в результате поляризации электрическими зарядами является элементарным электрическим диполем (рис. 4.3). Для характеристики величины смещения зарядов в молекуле диэлектрика пользуются понятием *поляризуемости* частицы, которая определяется из соотношения

$$\alpha = P_3 / E, \text{ Ф} \times \text{м}^2, \quad (4.6)$$

где  $P_3 = qx$  - электрический момент диполя, направленный от отрицательного элементарного заряда  $-q$  диполя к положительному  $+q$ , Кл $\times$ м;  $x$  - расстояние между элементарными зарядами, около  $10^{-10}$  м;  $E$  - напряженность возбуждающего электрического поля, В/м.

*Полярные диэлектрики* - это диэлектрики, молекулы которых даже в отсутствие внешнего электрического поля будут представлять собой электрические диполи с отличным от нуля постоянным электрическим моментом. Молекулы полярного диэлектрика способны к переориентации в электрическом поле. *Полярными диэлектриками являются диэлектрические материалы с несимметричным строением молекул. К ним относятся часть полимеров, керамика, сегнетоэлектрики.*

*Неполярные диэлектрики* - это диэлектрики, которые не содержат электрических диполей. Для данных материалов суммарный электрический момент молекулы  $p_3$  равен нулю. Молекулы неполярного диэлектрика имеют симметричное строение и обладают центром симметрии (рис. 4.4). *К таким диэлектрикам относятся двухатомные газы, углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), ряд полимеров (полиэтилен, полистирол), поваренная соль ( $\text{NaCl}$ ), керамика и др.*

При поляризации неполярного диэлектрика во внешнем электрическом поле  $E$  наблюдается поляризуемость молекул, величина которой определяется соотношением  $\alpha = p_3' / E$ , где  $p_3'$  - электрический дипольный момент молекулы диэлектрика, возникающий при поляризации.

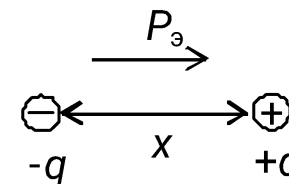


Рис. 4.3. Условное изображение элементарного электрического диполя

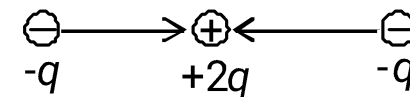


Рис. 4.4. Электрическая структура молекулы неполярного диэлектрика

# Классификация диэлектрических материалов



**Органические диэлектрические материалы.** К ним относятся пластмассы, лаки, электроизоляционные компаунды, клеи, волокнистые материалы.

**Неорганические диэлектрики** представлены двумя классами материалов: электроизоляционные стекла и керамические материалы.

**Активные диэлектрики** представляют собой материалы с нелинейной кривой поляризации. К ним относятся сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, жидкие кристаллы.

# Органические диэлектрики

# Пластмассы

К пластмассам относятся синтезируемые или природные материалы (смолы), молекулярная структура которых образована из полимеров. Полимерами являются высокомолекулярные соединения, молекулы которых представляют собой совокупность большого количества ( $10^3 \dots 10^4$ ) групп атомов - мономеров. Мономеры представляют исходные элементарные структуры, из которых формируются молекулы полимеров.

Реакция получения полимера из мономера называется *полимеризацией*. Число молекул мономера  $n$ , объединившихся в одну молекулу полимера называется *степенью полимеризации*. При значениях  $n=2 \dots 3$  полимеризующееся вещество находится в газообразном состоянии, а с ростом значения  $n$  до 20 вещество переходит в жидкое состояние. При дальнейшем увеличении степени полимеризации до значений  $n=1500 \dots 2000$  получается эластичный гибкий пластик, наконец, при  $n=5000 \dots 6000$  вещество представляет собой жесткий твердый полимер.

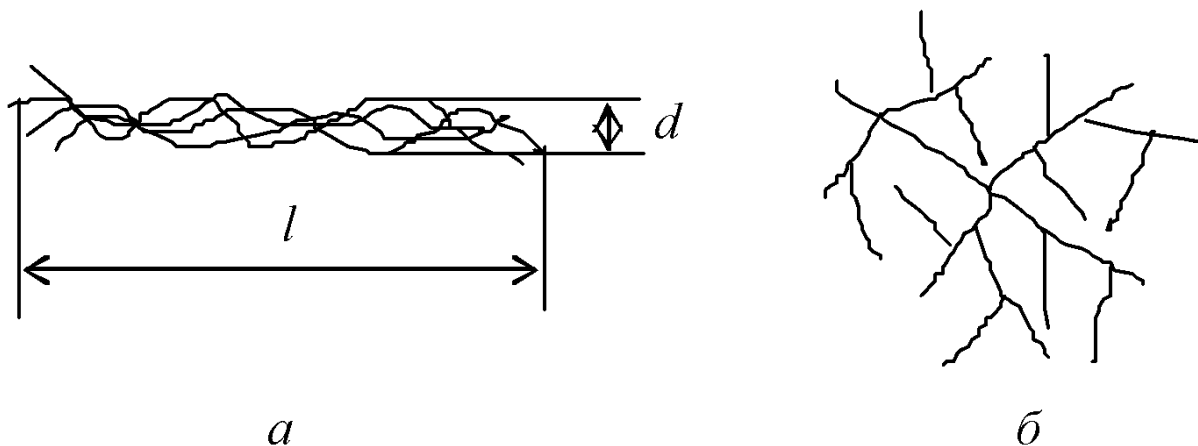


Рис. 4.16. Условное изображение структуры линейного - *а* и пространственного - *б* полимеров

# Термопластичные полимеры

Термопластичные полимеры (термопласты) по физическим свойствам подразделяют на две подгруппы.

1. **Термопласты с неполярными молекулами**, обладающие малыми диэлектрическими потерями на высоких частотах (неполярные термопласты). Основные электрические характеристики неполярных термопластов:  $\operatorname{tg}\delta \approx 3 \times 10^{-4}$ ,  $\varepsilon = 2 \dots 3$ ,  $\rho = 10^{14} \dots 10^{16} \text{ Ом}\times\text{м}$ ,  $E_{\text{пр}} = 40 \dots 250 \text{ МВ/м}$ .

2. **Термопласты с полярными молекулами**, для которых характерны повышенные диэлектрические потери на высоких частотах (полярные термопласты). Основные электрические характеристики полярных термопластов:  $\operatorname{tg}\delta \approx 3 \times 10^{-2}$ ,  $\varepsilon = 3 \dots 6$ ,  $\rho = 10^{11} \dots 10^{14} \text{ Ом}\times\text{м}$ ,  $E_{\text{пр}} = 15 \dots 50 \text{ МВ/м}$ .

# Неполярные термопласты

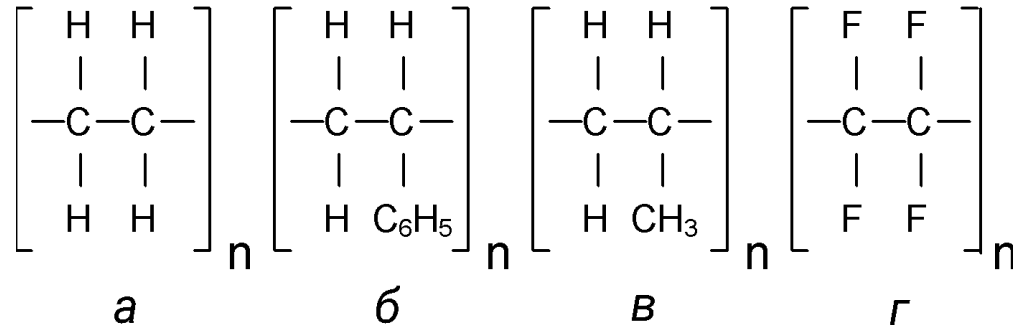


Рис. 4.16. Структурные формулы молекул неполярных термопластов: а - полиэтилен, б - полистирол, в - полипропилен, г - политетрафторэтилен

**Полиэтилен** является продуктом полимеризации газа этилена  $C_2H_4$ . Химическая формула молекулы полиэтилена имеет вид  $-[CH_2-CH_2-]_n$ , где  $n=1500$ . Основной молекулы является *гомоцепная цепочка*, образованная атомами углерода, и называемая поэтому *карбоцепной* цепочкой. Температура размягчения полиэтилена равна **100... 130 °C**.

**Полистирол** получают в результате полимеризации жидкого стирола  $C_8H_8$  (температура замерзания минус 33°C). Химическая формула молекулы полистирола  $-[CH_2-CH(C_6H_5)]_n$ , где  $n=6000$ . Полученный продукт имеет температуру размягчения 70...85 °C. **Полипропилен** является продуктом полимеризации мономера пропилена  $C_3H_6$ . Химическая формула молекулы полипропилена  $-[CH_2-CH(CH_3)]_n$ . Полипропилен является сравнительно теплостойким материалом, характеризующимся температурой размягчения **165...170 °C**.

**Политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт-4, тефлон)** получается в результате полимеризации тетрафторэтилена  $C_2F_4$ . Химическая формула молекулы ПТФЭ имеет вид  $-[CF_2-CF_2-]_n$ . Температура размягчения фторопласта-4 составляет **415 °C**.



# Полярные термопласты

**Поливинилхлорид (ПВХ)** является продуктом полимеризации газа винилхлорида  $C_2H_3Cl$ , переходящего в жидкое состояние при температуре 12...14 °С.

**Полиэтилентерефталат (лавсан, майлар)** является полиэфирной смолой сложного состава – продукт поликонденсации. Лавсан является термопластичным полимером со степенью полимеризации около 3000, полученным на основе этиленгликоля  $C_2H_4(OH)_2$  и терефталевой кислоты  $C_6H_4(COOH)_2$ . Температура размягчения около 260 °С.

**Поликарбонат** представляет полиэфир угольной кислоты. Он обладает хорошими механическими и электрическими свойствами. Это прозрачный материал сохраняющий свои свойства в широком диапазоне температур - от минус 100 до +150 °С.

**Поливиниловый спирт** является продуктом полимеризации жидкого винилацетата (винилового спирта  $C_2H_3OH$ ), который получают путем смешивания ацетилена и уксусной кислоты.

**Полиамиды** являются полиамидными смолами, к которым относятся капрон, нейлон, смола П68. Они образованы линейными комплексами типа  $-[(CH_2)_k-CO-NH-]_n-$ , где  $CH_2$  - метиленовая группа,  $k=4...8$ ,  $CO-NH$  - амидная группа. В частности, для капрона  $k=5$ , для нейлона  $k=6$ . Температура размягчения полиамидов составляет 215...230 °С.

**Полиуретаны** - это полимерные материалы, созданные на основе полиамидов и полиэфиров. структура молекулы полиуретана близка к структуре полиамида, но плавится полиуретан при более низкой температуре 175...180 °С.

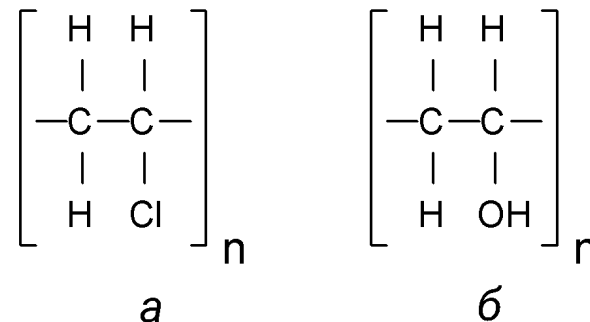


Рис. 4.17. Структурные формулы молекул полярных термопластов: а - поливинилхлорид, б - поливиниловый спирт

# Терморреактивные пластмассы

Терморреактивные пластмассы - реактопласты, изготавливаемые, как правило, методом полконденсации. Наиболее широкое применение получили следующие четыре вида смол.

**1. Фенолоформальдегидные смолы** изготавливают на основе фенола и формальдегида. Фенол ( $C_6H_5OH$ ) представляет собой бесцветные кристаллы с температурой плавления  $42\text{ }^\circ\text{C}$ . Формальдегид ( $CH_2O$ ) является бесцветным газом с температурой сжижения  $26\text{ }^\circ\text{C}$ , хорошо растворимым в воде.

**Новолак** - термопластичная смола, полученная в результате использования кислотного катализатора при избытке фенола над формальдегидом .

**Бакелит** получают при использовании щелочного катализатора (аммиака, едкого натра, едкого калия) и недостатке фенола по отношению к формальдегиду. .

Фенолоформальдегидная смола в виде порошка карболита или бакелита используется для приготовления пластмасс, называемых **фенопластами** .

**2. Анилиноформальдегидные смолы** получают при замене фенола на анилин ( $C_6H_5NH_2$ ) в реакции с формальдегидом. Анилиноформальдегидные смолы используют в виде порошков для приготовления пластмасс, называемых **аминопластами**.

**3. Кремнийорганические смолы** являются полимерами, в которых карбоцепные цепочки -C-C-C-C- заменены на силоксанные цепочки вида -Si-O-Si-O-.

**4. Эпоксидные смолы** - это вязкие низкомолекулярные жидкости, которые могут полимеризоваться в присутствии другой жидкости - отвердителя, добавляемой обычно в соотношении 1:(8...10). В качестве отвердителя применяют фенолоформальдегидные смолы новолачного типа или полиамидные смолы .

# Композиционные порошковые пластмассы

состоят из трех основных компонентов: *связующего* (реактопласт или термопласт), *наполнителя* (древесная мука, хлопчатник, каолин, кварцевый песок, асбестовое или стеклянное волокно), *пластификатора и красителя*, улучшающих технологические свойства и внешний вид изделия.

В качестве связующего вещества обычно используют фенопласты или аминопласты. В процессе изготовления изделия исходное сырье тщательно измельчается и перемешивается. Затем производится прессование или литье под давлением при температуре 160...180 °С.

В настоящее время выпускается до **150** марок композиционных пластмасс - терморезистивных прессматериалов, среди которых наибольшее применение получили следующие материалы:

**фенопласты общего назначения** с наполнителями из древесной муки, измельченной х/б ткани, например, марки 03-010-02 (бывшая К-18-2);

**фенопласты электроизоляционные** с наполнителем из молотой слюды и кварцевой муки, например, ЭЗ-340-65 (бывш. К-211-3);

**фенопласты влагохлостойкие** с наполнителем из каолина и древесной муки, пропитанной фенолоспиртами, например, Вх2-090-69 (бывш. К-18-23);

**фенопласты специальные безаммиачные** на основе фенолоанилиноформальдегидной смолы, применяемые для деталей РЭС, соприкасающихся с серебряными контактами (корпуса приборных разъемов), например, Сп3-342-02 (бывш. К-214-22);

**фенопласты жаростойкие** с наполнителем из коротковолокнистого асбеста с нагревостойкостью до 180 оС, например, Ж2-010-60 (бывш. К-18-56); применяются для изготовления патронов электроламп и выключателей;

**фенопласты ударопрочные** с наполнителем из стекловолокна марок АГ-4В, АГ-4В-10, АГ-4С, АГ-4НС; применяются для изготовления каркасов высокочастотных катушек индуктивности.

# Слоистые пластики

**Гетинакс электротехнический листовой** (ГОСТ 2718) получают посредством горячего прессования электроизоляционной бумаги (ЭИП), пропитанной термореактивной искусственной смолой. Пропитанная бумага собирается пачками и укладывается между стальными плитами гидравлического пресса. Полученные листы имеют толщину 0,2...50 мм.

**Текстолит электротехнический листовой** (ГОСТ 12652) представляет листовой прессованный материал, пропитанный термореактивной смолой фенолоформальдегидного типа, в котором в качестве наполнителя используется хлопчатобумажная или шелковая ткань.

При использовании стеклотканей полученный листовой материал называют **стеклотекстолит**. Например, стеклотекстолит марки СТК-41 изготавливается на основе бесщелочной стеклоткани, пропитанной кремнийорганическим лаком, совмещенным с эпоксидной смолой. Обладает теплостойкостью до 180 °С.

Фольгированный стеклотекстолит широко применяется при изготовлении печатных плат, предназначенных для монтажа радиокомпонентов. Фольгирование осуществляется путем наклеивания на одну или обе стороны электроизоляционного листа фольги толщиной 0,035...0,05 мм. Проводниковый слой формируется затем методом избирательного травления.

Марки фольгированных стеклотекстолитов:

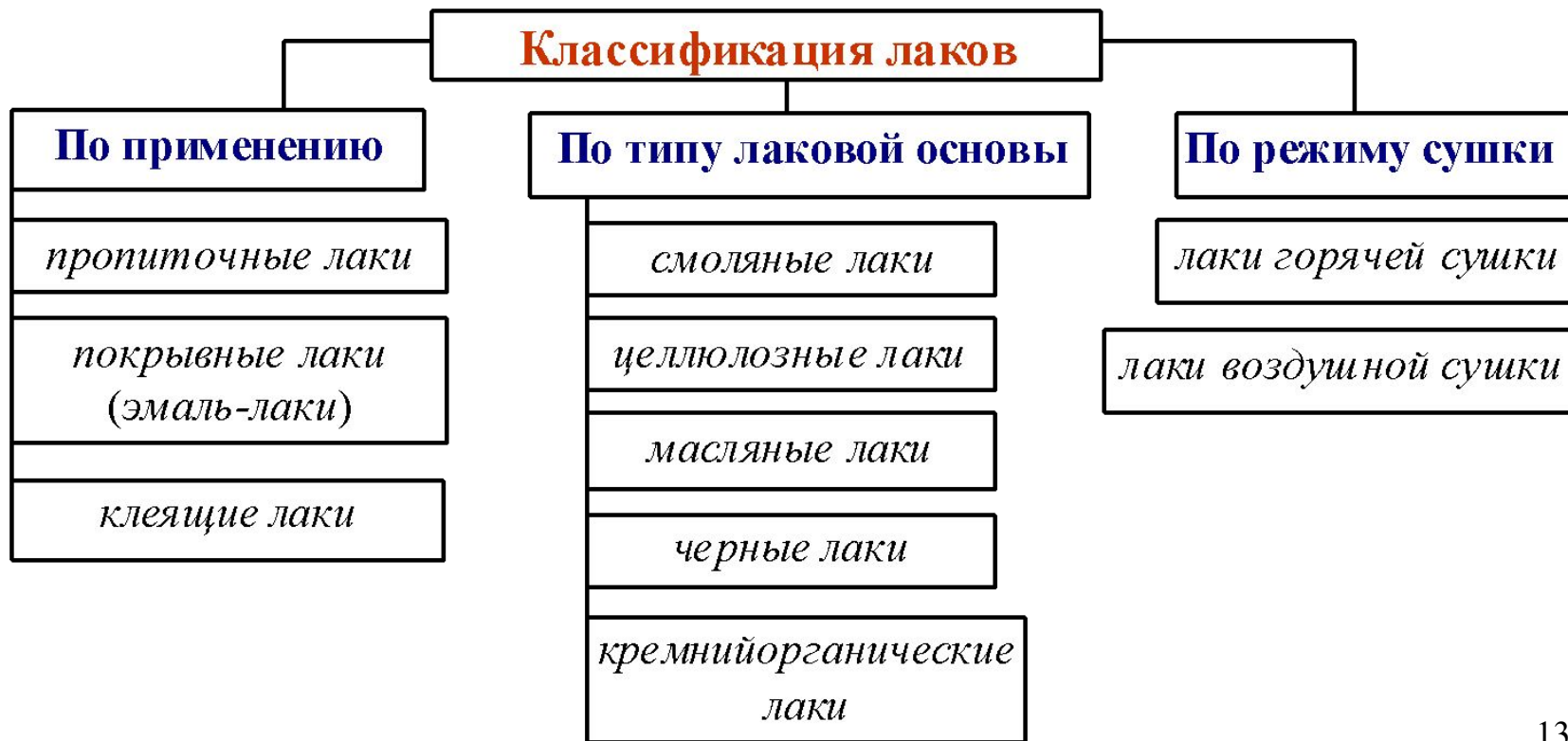
СФ-1-35 - односторонний фольгированный стеклотекстолит с толщиной фольги 35 мкм;

СФ-2-50 - двухсторонний фольгированный стеклотекстолит с толщиной фольги 50 мкм.

Для изготовления нагревостойких печатных плат используются стеклотекстолиты марок СФ-1Н-50, СФ-2Н-50 с толщиной листа 1...2 мм. Многослойные печатные платы изготавливаются из тонких листов стеклотекстолита марок ФДМ-1, ФДМ-2 с толщиной листа 0,2...0,25 мм. Выпускаются также фольгированные гетинаксы марок ГФ-1-35, ГФ-2-50 и ряд других.

# Лаки

*Лаками* являются коллоидные растворы смол, битумов, высыхающих масел в растворителях. При сушке лака растворитель улетучивается, а лаковая основа переходит в лаковую пленку. Классификация лаков проводится по нескольким признакам.



# Электроизоляционные компаунды

К этому виду диэлектриков относятся пропиточные и заливочные материалы, которые используют в жидкотекучем состоянии, а затем переводят в твердое состояние путем охлаждения до комнатной температуры или введения в их состав специального отвердителя. Компаунды отличаются от лаков отсутствием в их составе летучего растворителя и, по сравнению с лаками, обеспечивают лучшую влагонепроницаемость изоляции.

Компаунды, затвердевающие в результате охлаждения после предварительного нагрева, называют *термокомпаундами*. К термокомпаундам относятся битумы, являющиеся термопластичными компаундами, а также полиэфирные и кремнийорганические компаунды, относящиеся к терморезактивным компаундам. Термокомпаунды необратимо отверждаются в результате происходящих в жидком состоянии химических реакций

*Эпоксидные компаунды* не требуют предварительного нагрева Их переводят в твердое состояние путем введения в них отвердителя перед употреблением. Для заливки компаундом изделие помещают в соответствующую форму, в которую и заливается компаунд. После затвердевания форма удаляется.

# Клеи

Клеями называют вязкие органические или неорганические пленкообразующие жидкости, обладающие высокой адгезией и прилипающие к поверхностям соединяемых материалов, взаимно их связывая. Материалом для клеев служат органические высокомолекулярные вещества, а также силикаты. Применение клеев существенно улучшает технологичность изделия, упрощает сборочные операции. По составу клеи бывают одно или двухкомпонентные. По физическому состоянию - жидкими, пастообразными и пленочными. Время полимеризации 24...72 часа. Жизнеспособность (сохранение свойств после приготовления) 0,5...1 час. В производстве РЭС широко применяют следующие виды клеев:

- эпоксидные и полиуретановые (двухкомпонентные);
- акриловые (двухкомпонентные) с температурой отвердевания  $T_{\text{отв}}=10$  мин;
- анаэробные (однокомпонентные),  $T_{\text{отв}}=2...24$  часа;
- силиконовые (однокомпонентные);
- цианакрилаты (однокомпонентные),  $T_{\text{отв}}=24$  часа.

# Волокнистые материалы

К этому виду диэлектриков относятся: бумага, картон, текстильные материалы, асбест.

**Бумага** - листовой или рулонный материал коротковолокнистого строения, состоящий, в основном, из целлюлозы. Различают кабельную, пропиточную и конденсаторную бумагу.

Конденсаторная бумага имеет толщину от 4 мкм до 40 мкм. Применяется при изготовлении конденсаторов К40, К41, К42. В бумажно-пленочных конденсаторах типа К75 бумага играет роль фитиля, по которому внутрь конденсатора в процессе пропитки проникает пропиточное масло. В фольговых оксидно-электролитических конденсаторах типа К50 и К51 бумага пропитывается электролитом и является второй обкладкой конденсатора, выполняя роль проводящего токосъема со стороны окисла.

**Картон** отличается от бумаги большей толщиной листа и часто применяются для изготовления каркасов трансформаторов.

**Текстильные материалы** получают на ткацких станках из длиноволокнистого сырья. Применяются хлопчатобумажные нити, шелковые нити, синтетические волокна и стеклянные нити. В последнем случае материал называется *стеклоткань*. Пропитанная ткань носит название *лакоткань*.

**Асбест** - неорганический волокнистый материал, состоящий, в основном, из материала хризолита (химическая формула  $3\text{MgO} \times 2\text{SiO}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ), обладающего очень низкой теплопроводностью. Нагревостойкость асбеста равна 400... 500°C, температура плавления достигает 1450...1500°C, а удельное электросопротивление составляет  $10^6 \dots 10^{10} \text{ Ом} \times \text{м}$ .



# Неорганические диэлектрики

# Электроизоляционные стекла

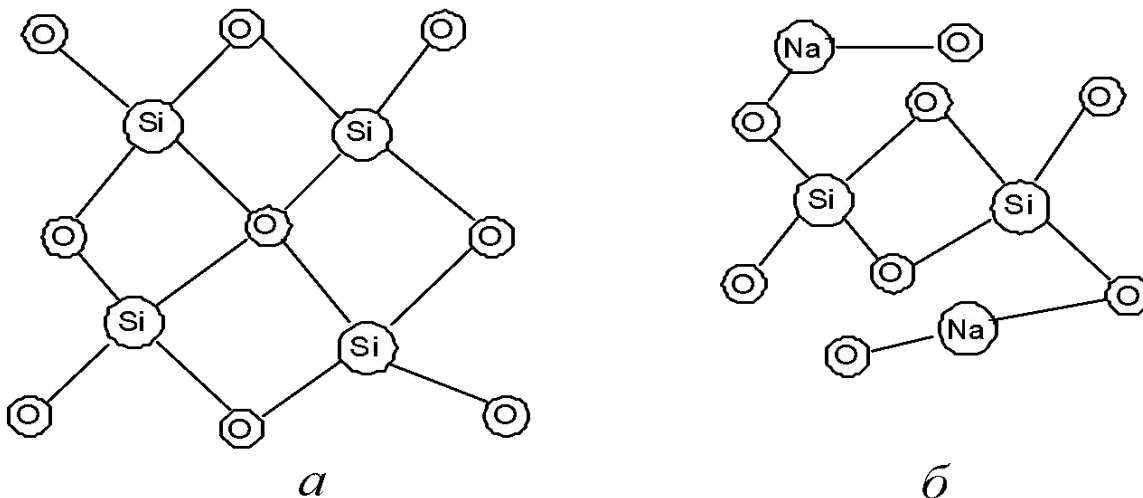


Рис. 4.18. Структура силикатных стекол:  
а - кварцевое; б – щелочно-силикатное

⊙ - кислород, ⊙Si - кремний, ⊙Na<sup>+</sup> - натрий

Стекла представляют собой неорганические аморфные вещества, получаемые сплавлением стеклообразующих окислов, таких, как двуокись кремния ( $\text{SiO}_2$ ), оксид бора ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), пятиокись фосфора ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), двуокись германия ( $\text{GeO}_2$ ) и др. Соответственно стекла называют силикатными, боратными, фосфатными, германатными. Наиболее широкое распространение получили силикатные стекла. Для получения стекол с различными свойствами в их состав вводят добавки (до 40%) других окислов. Чаще всего используются оксиды щелочных ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) и щелочноземельных ( $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ) металлов, а также окислы свинца ( $\text{PbO}$ ) и алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

# Кварцевое стекло

Чистое *кварцевое стекло*, содержит 96...99,9%  $\text{SiO}_2$ .

Кварцевое стекло размягчается при температуре 1200 °С и обладает замечательными физическими свойствами:

- прозрачно в оптическом диапазоне электромагнитных волн от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК);

- обладает очень малым значением температурного коэффициента линейного расширения (*ТКЛР*), составляющим  $0,6 \times 10^{-6} \text{ 1/К}$ ;

- имеет очень высокое удельное электросопротивление  $\rho \approx 10^{16} \text{ Ом} \times \text{м}$  и малую величину  $\text{tg}\delta$ , достигающую значения  $2 \times 10^{-4}$ .

Введение в кварцевое стекло щелочных окислов  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  приводит к разрыву кремний-кислородной сетки и образованию незавершенных химических связей, что приводит к разрыхлению структуры и снижению температуры размягчения стекла до 600...700 °С.

# Установочные стекломатериалы

К установочным стекломатериалам относятся *электровакуумные* и *изоляционные* стекла. Эти диэлектрики используются при изготовлении баллонов, ножек и изоляционных бус для электровакуумных, полупроводниковых и прочих приборов. Установочные стекломатериалы характеризуются значениями диэлектрической проницаемости  $\epsilon=3...4$ ,  $\text{tg}\delta=10^{-3}...10^{-4}$ .

По химическому составу электровакуумные стекла относятся к слабощелочным боросиликатным ( $\text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$ ) и алюмосиликатным ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) стеклам.

Одним из основных параметров электровакуумных стекол является *ТКЛР*, значение которого указывается в обозначении стекла, например С89-5, где буква С означает стекло; числом 89 кодируется значение *ТКЛР*, равное  $89 \times 10^{-7}$  К-1; а число 5, указанное через дефис, обозначает номер разработки.

В зависимости от материала электрода, который впаивается в стекло, различают стекла трех основных типов: вольфрамовые (С35...С42), молибденовые (С46... С52), платиновые или платинитовые (С85...С92). В данном случае название стекла происходит от названия металла, *ТКЛР* которого согласовано с *ТКЛР* стекла и перечисленные стекла не содержат в своем составе W, Mo или Pt.

***Изоляционные конденсаторные стекла*** используются в качестве прокладок стеклянных и стеклоэмалевых конденсаторов типа К21, К22, К23 и К26. Конденсаторные стекла отличаются повышенной диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon=3...4$ ), высокой электрической прочностью, малыми значениями  $\text{tg}\delta$ , нормируются по величине температурного коэффициента диэлектрической проницаемости,  $\text{TK}\epsilon = (\Delta\epsilon/\epsilon)(1/\Delta T)$ .

# Ситаллы

*К ситаллам относятся стеклокристаллические вещества, полученные способом кристаллизации стекол специально подобранного состава. Используются стекла состава  $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  и др. Содержание кристаллической фазы в этих стеклах составляет 30...95 %. Размер кристаллитов достигает 1...2 мкм. Технология производства ситалла отличается от технологии производства стекла дополнительной операцией кристаллизации изделия. По способу проведения кристаллизации различают два вида ситаллов: фотоситаллы и термоситаллы.*

При производстве **фотоситаллов** для инициирования фотохимической реакции кристаллизации применяется ультрафиолетовое облучение. Широкое применение получили фотоситаллы марки **ФС148-1** со следующими характеристиками:  $TKLP=148 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ,  $\varepsilon=7$ ,  $\text{tg}\delta=7 \times 10^{-3}$ .

Для получения **термоситаллов** в качестве катализаторов кристаллизации используются химические соединения **TiO<sub>2</sub>, FeS, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**, фториды и фосфаты некоторых металлов, легко кристаллизующиеся из расплава. Термоситаллы марок **СТ38-1, СТ50-1** отличаются от фотоситаллов меньшими значениями  $\text{tg}\delta$ , достигающими величин  $(2...45) \times 10^{-4}$ .

**Внешний вид:** фото- и термоситаллы представляют собой плотные материалы белого или коричневого цвета с полированной поверхностью. Характеризуются высокой механической прочностью и теплопроводностью (коэффициент теплопроводности  $l=0,8...2,5 \text{ Вт/м}\times\text{К}$ ). Ситаллы используются в качестве установочных изделий, в том числе подложек тонкопленочных ГИС, дискретных резисторов, деталей СВЧ-приборов и некоторых типов ламп.

# Керамические материалы

*Керамические материалы (керамика) - это неорганические материалы, изделия из которых получают путем обжига при высокой температуре.* Керамическое изделие состоит из поликристаллической и аморфной фаз.

**Поликристаллическая фаза** определяет электрофизические свойства керамики. К кристаллообразующим компонентам относятся окислы, такие, как кварц ( $\text{SiO}_2$ ), глинозем ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), рутил ( $\text{TiO}_2$ ),  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BeO}$ , тальк ( $3\text{MgO} \times 4\text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$ ), шпинели ( $\text{Mg}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{MgO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ ), перовскиты ( $\text{CaTiO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{CaZrO}_3$ ,  $\text{BaZrO}_3$ ,  $\text{LaAl}_2\text{O}_3$ ). Соединения  $\text{BaTiO}_3$  и  $\text{SrTiO}_3$  проявляют выраженные сегнетоэлектрические свойства

**Аморфная фаза** керамического изделия представлена пластичными компонентами, относящимся к глинистым и стеклообразующим материалам. Пластичные компоненты имеют слоистую структуру и их введение в состав керамической массы облегчает последующее оформление заготовок методами пластической деформации (протяжка, штамповка, литье в гипсовые формы). В качестве огнеупорного глинистого материала при производстве керамики применяют обычно каолинит ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ).

**Стеклообразующими материалами** служат полевые шпаты, представляющие из себя безводные алюмосиликаты, содержащие окислы щелочных и щелочно-земельных металлов: калиевый полевой шпат ( $\text{K}_2\text{O} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{SiO}_2$ ), натриевый полевой шпат ( $\text{Na}_2\text{O} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{SiO}_2$ ), кальциевый полевой шпат ( $\text{Ca}_2\text{O} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{SiO}_2$ ).

# Активные диэлектрики

# Ионные сегнетоэлектрики

**Ионные сегнетоэлектрики.** Это кристаллические материалы с химической формулой типа  $A^{2+}B^{4+}O_2^{-3}$ , обладающие преимущественно ионной связью. Практически важными ионными сегнетоэлектриками являются титанат бария  $BaTiO_3$  ( $T_K=120$  °C), титанат свинца  $PbTiO_3$  ( $T_K=490$  °C), ниобат калия  $KNbO_3$  ( $T_K=435$  °C), ниобат лития  $LiNbO_3$  ( $T_K=200$  °C), танталат лития  $LiTaO_3$  ( $T_K=610$  °C). Элементарная ячейка этих соединений имеет вид ГЦК куба с ионом  $B^{4+}$  ( $Ti^{4+}$ ,  $Nb^{4+}$ ,  $Ta^{4+}$ ) в центре (рис. 4.28, а).

По вершинам ячейки расположены ионы элемента  $A^{2+}$  ( $Ba^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $K^{2+}$ ,  $Li^{2+}$ ), а в центрах граней помещаются ионы кислорода  $O^{2-}$ , имеющие относительно большие размеры.

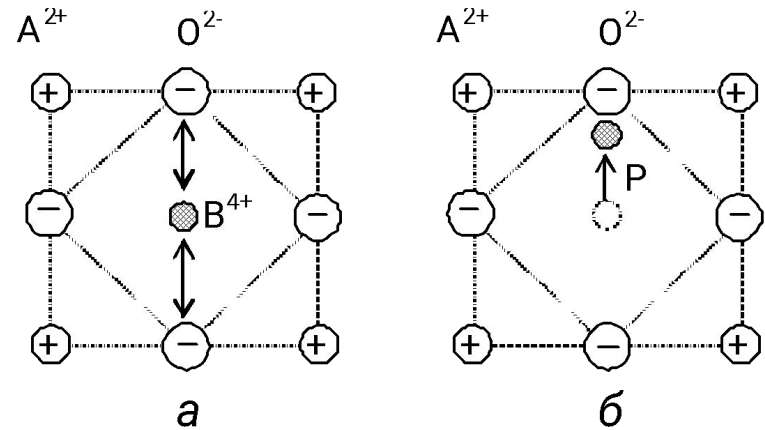


Рис. 4.28. Сечение элементарной ячейки ионного сегнетоэлектрика: а -  $T > T_K$ ; б -  $T < T_K$

Ион  $B^{4+}$  имеет небольшие размеры и при температуре, меньшей температуры Кюри, локализуется вблизи одного из окружающих его ионов кислорода, смещаясь, таким образом, из положения равновесия. Это смещение приводит к возникновению у ячейки дипольного момента  $P$ , направленного в сторону смещения иона  $B^{4+}$ , как показано на рис. 4.28, б. При  $T > T_K$  в результате интенсивного теплового движения ион  $B^{4+}$  непрерывно перебрасывается от одного кислородного иона к другому. Поэтому, благодаря центральной симметрии, такая ячейка не обладает электрическим моментом.



# Дипольные сегнетоэлектрики

К ним относятся поликристаллические материалы, характеризующиеся ковалентно-ионной связью, такие, как **сегнетова соль** ( $T_K=24\text{ }^\circ\text{C}$ ), **триглицинсульфат** (ТГС)  $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \times \text{H}_2\text{SO}_4$  ( $T_K=49\text{ }^\circ\text{C}$ ), **нитрит натрия**  $\text{NaNO}_2$  ( $T_K=160\text{ }^\circ\text{C}$ ), **дигидрофосфат калия** (КДП)  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ( $T_K=-151\text{ }^\circ\text{C}$ ). Указанные сегнетоэлектрики кристаллизуются в элементарные ячейки с низкой симметрией - тетрагональной, тригональной, ромбической. Вследствие низкой симметрии элементарные ячейки дипольных сегнетоэлектриков обладают постоянными электрическими моментами, то есть являются электрическими диполями, в расположении которых при температурах ниже температуры Кюри существует дальний порядок. При температуре Кюри происходит фазовый переход типа порядок - беспорядок, дальний порядок в расположении диполей нарушается и материал переходит в параэлектрическое состояние.

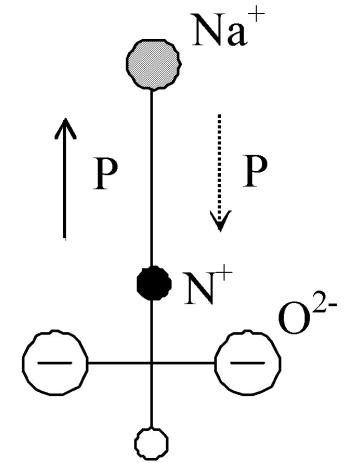


Рис. 4.29. Строение элементарной ячейки кристалла  $\text{NaNO}_2$

# Жидкие кристаллы

*Жидкими кристаллам* (ЖК) называются органические вещества с анизотропными молекулами, характеризующимися одно- или двумерным дальним порядком во взаимном расположении. Диэлектриками с такой структурой являются, например, материалы МБА ( $C_{18}H_{21}NO$ ) и ЭБА ( $C_{19}H_{23}NO$ ). Физические свойства жидких кристаллов анизотропны в различных направлениях. Это вязкие пастообразные вещества, которые находятся в промежуточном состоянии между твердым кристаллом и жидкостью. Жидкокристаллическое состояние вещества называют *мезоморфным состоянием*.

Преимущественным видом связи между молекулами жидкого кристалла является ван-дер-ваальсова связь, относящаяся, как известно, к слабым видам связи. Оптические и электрические свойства жидких кристаллов сильно зависят от напряженности приложенного электрического поля, температуры, давления. Эта зависимость открывает возможности для разработки индикаторных устройств различного назначения.

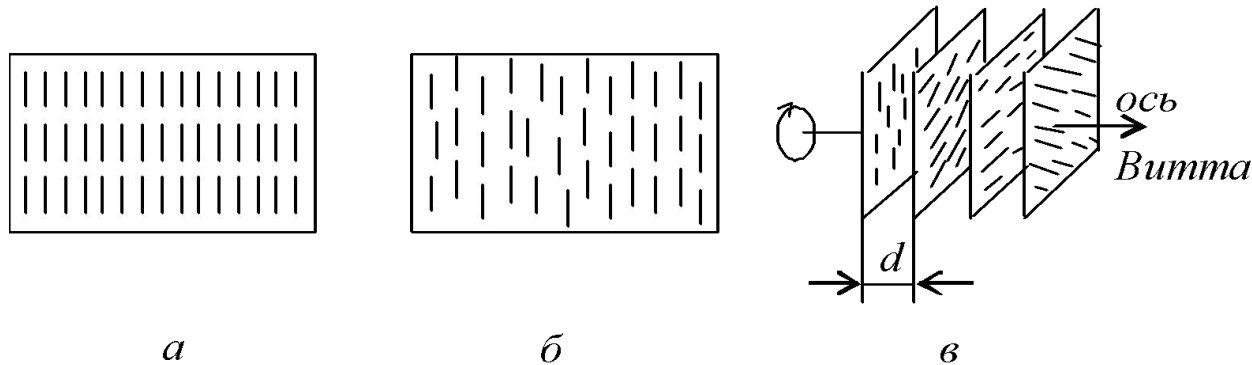


Рис. 4.38. Виды жидкокристаллических материалов: а - смектическая фаза; б - нематическая фаза; в - холестерическая фаза