



Омский государственный технический университет  
каф. Технология электронной аппаратуры

## Дисциплина **Радиоматериалы и радиокомпоненты**

### Лекция 8.2. **Диэлектрические материалы** Классификация

Ст. преп. Пономарёв Д.Б.



## Структура лекции:

1. Классификация диэлектрических материалов (ДМ).
2. Газообразные, жидкие и твердые ДМ.
3. Органические ДМ. Лаки, клеи, компаунды.
4. Неорганические стекла, ситаллы, керамика.
5. Свойства сегнетоэлектриков. Активные диэлектрики.
6. Пьезоэлектрики, пироэлектрики и электреты
7. Материалы с электрооптическим эффектом
8. Жидкие кристаллы

# Диэлектрические материалы

Это самая обширная группа радиоматериалов.  
Это материалы, используемые

## *Пассивные*

- для изоляции токоведущих частей друг от друга, изоляторов для других целей;
- для создания электрических емкостей (конденсаторов) – накопителей заряда.

## *Активные*

- для преобразования неэлектрических полей.

Обычно диэлектрики  
**классифицируются по:**

1) агрегатному состоянию – газы,  
жидкости, твердые вещества;

2) химическому составу –  
органические, неорганические и  
элементоорганические;

3) характерным группам каждого из  
химического состава:

## органические:

- а) воскообразные,
- б) смолы и пластмассы,
- в) битумы и компаунды,
- г) лаки и клеи,
- д) лакоткани,
- е) слоистые пластики,
- ж) эластомеры,
- з) фторорганические диэлектрики.

## **неорганические:**

- а) стекла, ситаллы и эмали,
- б) керамика,
- в) слюда и материалы на её основе,
- г) сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики,
- д) оксидная и фторидная изоляции,
- е) асбест.

# **Активные диэлектрики:**

1. Пьезоэлектрики
2. Пироэлектрики
3. Электреты
4. Материалы с электрооптическим эффектом
5. Жидкие кристаллы

**Газообразные диэлектрики** - воздух, азот, водород, аргон, элегаз ( $SF_6$ ).

**Жидкие диэлектрики** имеют электрическую прочность на порядок больше, чем газообразные. К ним относят нефтяные масла (трансформаторное, конденсаторное, кабельное), синтетические (совол, совтол, полиметилсилоксаны, фторорганические и др.), растительные (льняные и касторовое масло и др.), лаки и эмали, клеи.

# 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.

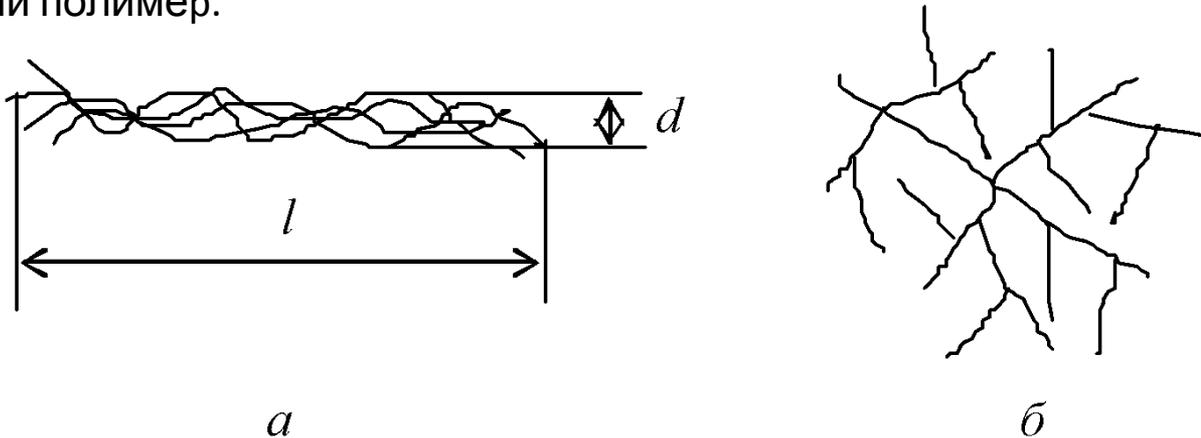


Рис. 4.16. Условное изображение структуры линейного - а и пространственного - б полимеров

# Термомеханическая кривая

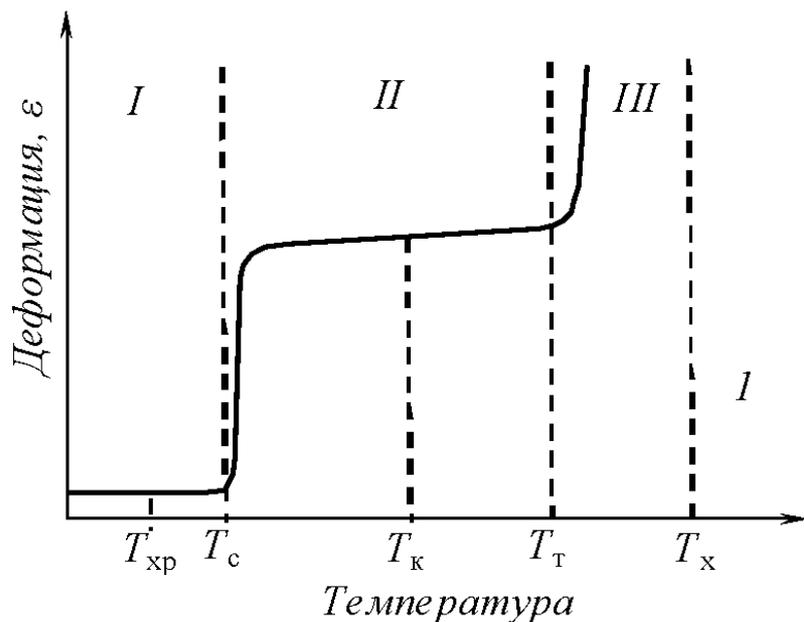


Рис. 4.17. Термомеханическая кривая некристаллического линейного полимера  $T$ :

$I$  – стеклообразное состояние;  
 $II$  – высокоэластичное состояние;  
 $III$  – вязкотекучее состояние

$T_{хр}$  – температура перехода к хрупкому состоянию, ниже этой температуры полимер становится хрупким;

$T_c$  – температура стеклования, это температура перехода из стеклообразного состояния в высокоэластичное.

$T_k$  – температура кристаллизации, при этой температуре кристаллическая часть полимера плавится. Из-за отсутствия в полимерах истинной кристаллической решётки процесса плавления как такового в аморфных полимерах не существует;

$T_T$  – температура начала вязкого течения полимера. При этой температуре происходит переход из высокоэластичного состояния в вязко-текучее. Около точки  $T_T$  кроме упругой и высокоэластичной деформации, возникает и пластическая;

$T_x$  – температура начала химического разложения полимера..

# 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:  $\text{tg}\delta \approx 3 \times 10^{-4}$ ,  $\epsilon = 2 \dots 3$ ,  $\rho = 10^{14} \dots 10^{16}$  Ом·м,  $E_{\text{пр}} = 40 \dots 250$  МВ/м.

2. **Термопласты с полярными молекулами**, для которых характерны повышенные диэлектрические потери на высоких частотах (полярные термопласты). Основные

электрические характеристики полярных термопластов:  $\text{tg}\delta \approx 3 \times 10^{-2}$ ,  $\epsilon = 3 \dots 6$ ,  $\rho = 10^{11} \dots 10^{14}$  Ом·м,  $E_{\text{пр}} = 15 \dots 50$  МВ/м.

# Неполярные термопласты

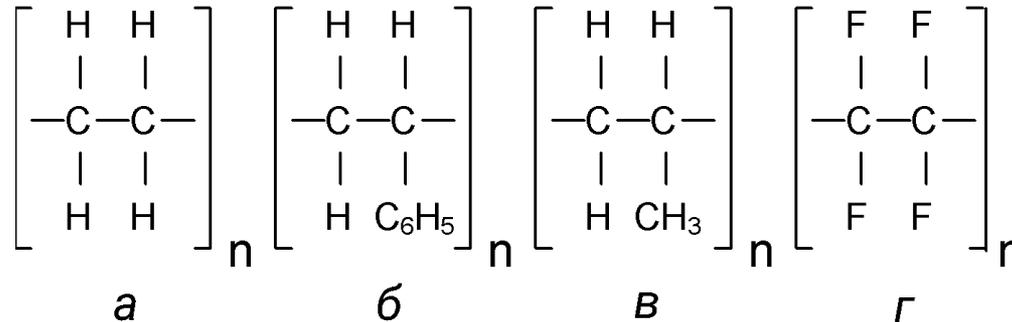


Рис. 4.16. Структурные формулы молекул неполярных термопластов: а - полиэтилен, б - полистирол, в - полипропилен, г - политетрафторэтилен

**Полиэтилен** является продуктом полимеризации газа этилена  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Химическая формула молекулы полиэтилена имеет вид  $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$ , где  $n=1500$ . Основной молекулы является *гомоцепная цепочка*, образованная атомами углерода, и называемая поэтому *карбоцепной* цепочкой. Температура размягчения полиэтилена равна **100... 130 °С**.

**Полистирол** получают в результате полимеризации жидкого стирола  $\text{C}_8\text{H}_8$  (температура замерзания минус 33°С). Химическая формула молекулы полистирола  $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]_n$ , где  $n=6000$ . Полученный продукт имеет температуру размягчения 70...85 °С. **Полипропилен** является продуктом полимеризации мономера пропилена  $\text{C}_3\text{H}_6$ . Химическая формула молекулы полипропилена  $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-]_n$ . Полипропилен является сравнительно теплостойким материалом, характеризующимся температурой размягчения **165...170 °С**.

**Политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт-4, тефлон)** получается в результате полимеризации тетрафторэтилена  $\text{C}_2\text{F}_4$ . Химическая формула молекулы ПТФЭ имеет вид  $[-\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$ . Температура размягчения фторопласта-4 составляет **415 °С**.

# Слабополярные низкочастотные полимеры

К ним в первую очередь относятся каучуковые материалы (эластомеры). Их делают на основе каучука НК и СК, который является высокомолекулярным полимером некоторых углеводородов: Бутадиена, хлоропрена, бутила и т.д.

Они обладают прочностью, низкой нагревостойкостью. Каучуки легко растворяются в растворителях (Н., бензине). Диэл. свойства невысоки.

При нагреве до 200- 300 град в присутствии катализатора (металл. Na) из бутадиена получают эскапон- тв. материал примерно эбонит, но более стоек к нагреву, к кислотам и органич.

Свойства	Каучук	Резина	Эбонит	Эскапон
$\rho$ v	10(14)	10(13)	10(13)	10(15)
$\epsilon$	2,4	3- 7	2,8	2,7- 3
$Tg\delta$	0,002	0,02- 0,10	0,015	0,0005
Епр, мВ/м	-	20- 30	15	25

# Полярные термопласты

**Поливинилхлорид (ПВХ)** является продуктом полимеризации газа винилхлорида  $C_2H_3Cl$ , переходящего в жидкое состояние при температуре  $12...14\text{ }^\circ\text{C}$ .

**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  $260\text{ }^\circ\text{C}$ .

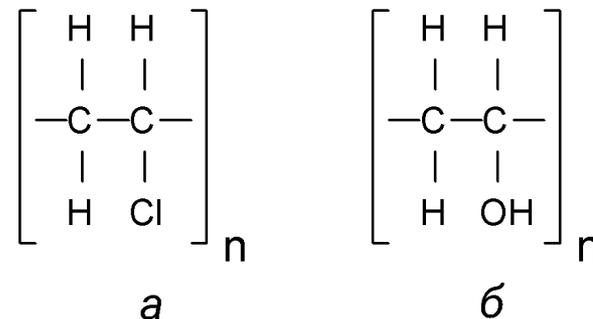


Рис. 4.17. Структурные формулы молекул полярных термопластов: а - поливинилхлорид, б - поливиниловый спирт

# Полярные термопласты

*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 ацетилен 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.

# 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** .

# Терморреактивные пластмассы

**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 - термореактивных 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, СпЗ-342-02 (бывш. К-214-22);

**фенопласты жаростойкие** с наполнителем из коротковолокнистого асбеста с нагневостойкостью 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 терморезактивной 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 терморезактивной смолой фенолоформальдегидного типа, в котором в качестве наполнителя используется хлопчатобумажная или шелковая ткань.

# Слоистые пластики

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:

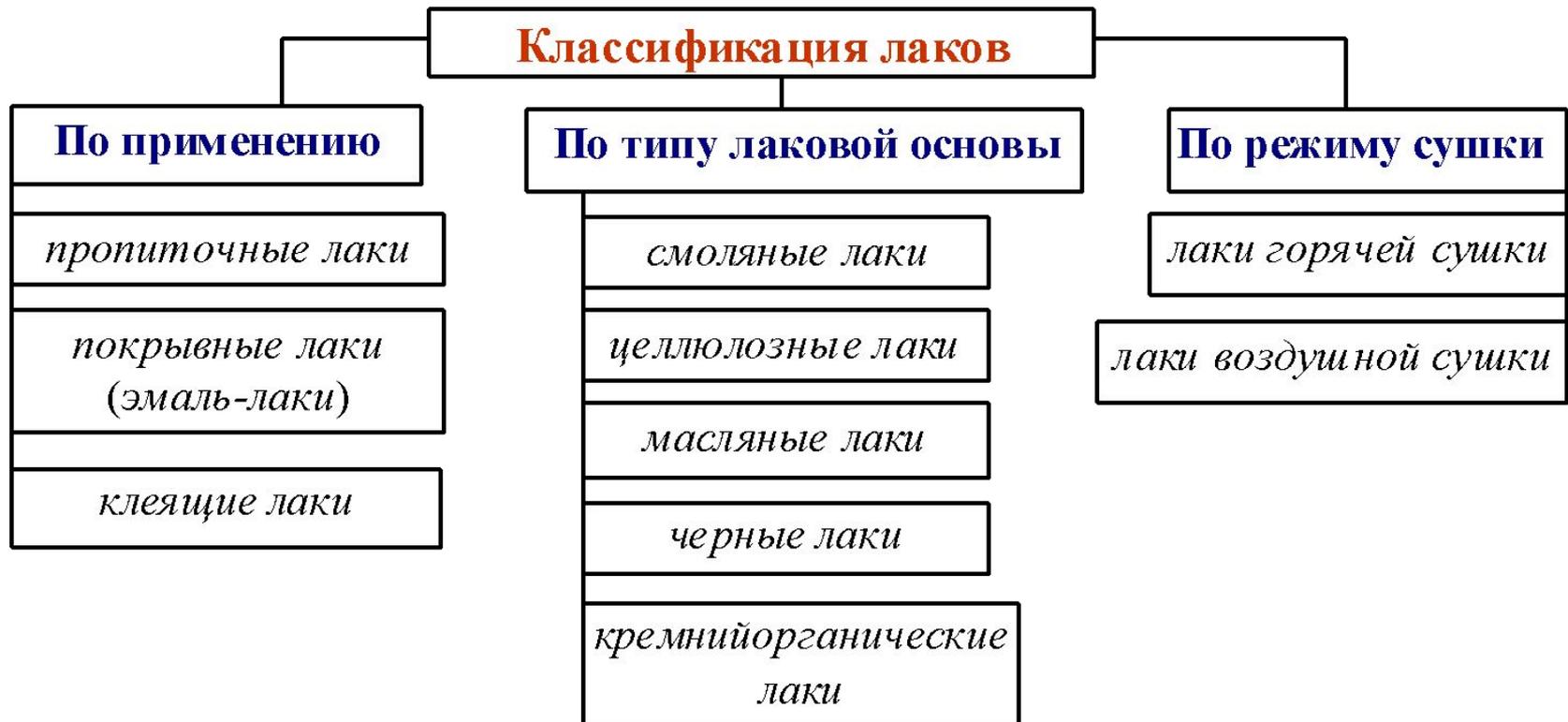
**СФ-1-35** - односторонний фольгированный стеклотекстолит с толщиной фольги 35 мкм;

**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.

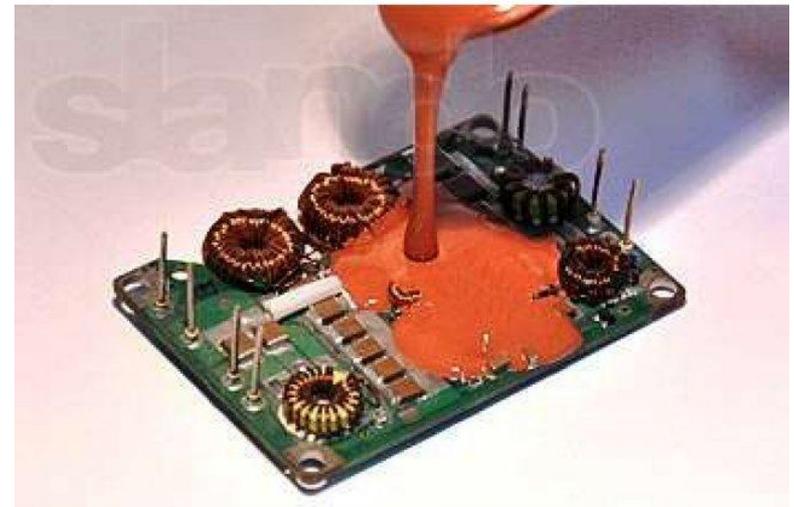
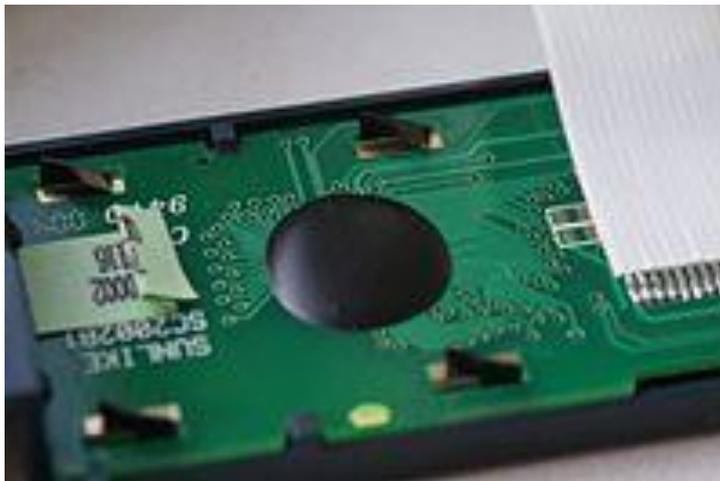
# Лаки

**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.



# Электроизоляционные компаунды

**Компаунд** —

термоактивная, термопластическая полимерная смола (отверждаемая в естественных условиях) и эластомерные материалы с наполнителями и (или) добавками или без них после затвердевания. Используется в качестве электроизоляционного материала и как средство взрывозащиты. Компаундом так же называют материал для заполнения кабелей и вант в висячих и вантовых мостах для защиты материала кабелей (вант) от агрессивного воздействия среды.

# Электроизоляционные компаунды

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 окисдно-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°С, температура плавления достигает 1450...1500°С, а удельное электросопротивление составляет  $10^6 \dots 10^{10}$  Ом·м.

# Неорганические диэлектрики

# Электроизоляционные стекла

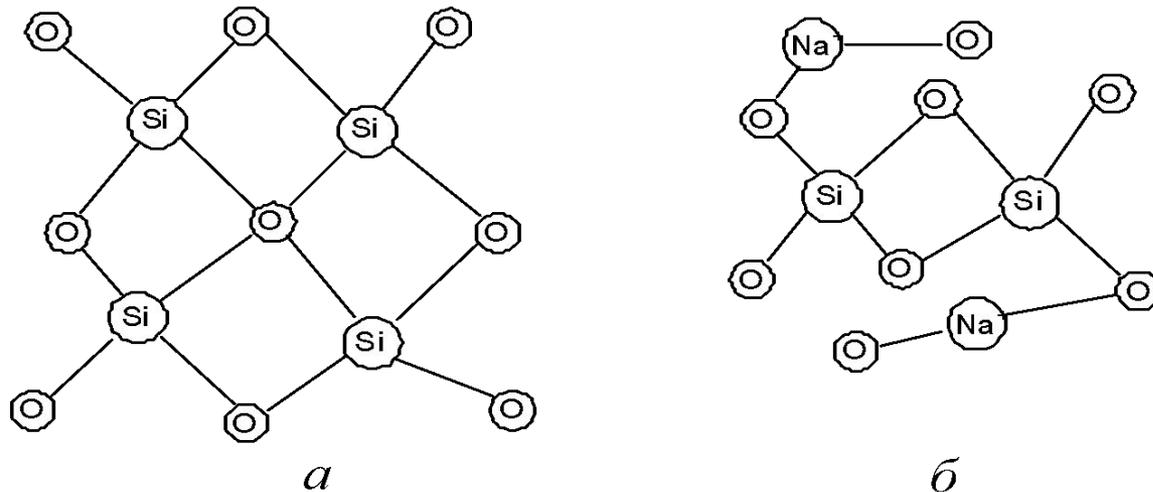


Рис. 4.18. Структура силикатных стекол:  
а - кварцевое; б – щелочно-силикатное

○ - 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  $0,6 \times 10^{-6}$  1/К;
- имеет очень высокое удельное электросопротивление  $\rho \approx 10^{16}$  Ом×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 разрыхле-нию 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  $\varepsilon=3...4$ ,  $\text{tg}\delta=10^{-3}...10^{-4}$ .

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  $89 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ; 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 ( $\varepsilon=3...4$ ), высокой электрической прочностью, малыми значениями  $\text{tg}\delta$ , нормируются по величине температурного коэффициента диэлектрической проницаемости,  $\text{TK}\varepsilon = (\Delta\varepsilon/\varepsilon)(1/\Delta T)$ .

# Ситаллы

*К ситаллам относятся стеклокристаллические вещества, полученные способом кристаллизации стекол специально подобранного состава.*

Используются стекла состава  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  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**.

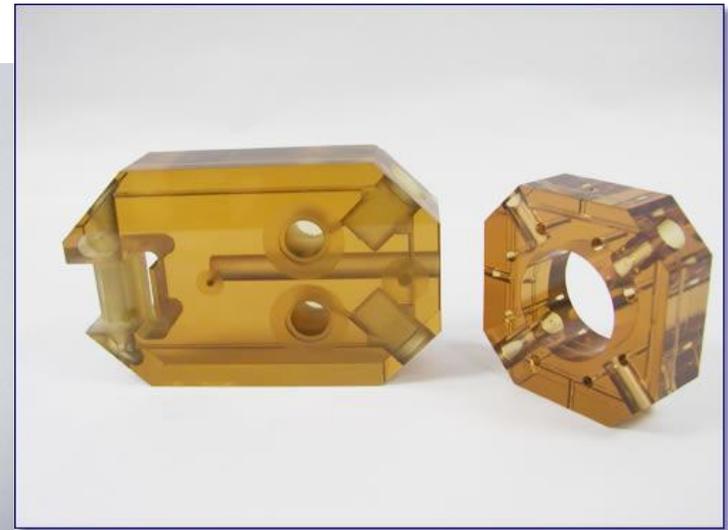
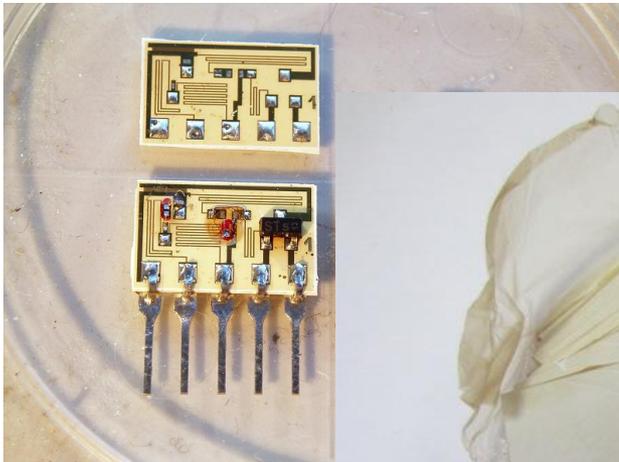
# Ситаллы

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  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeS}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ , 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  $(2...45) \times 10^{-4}$ .

# Ситаллы

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



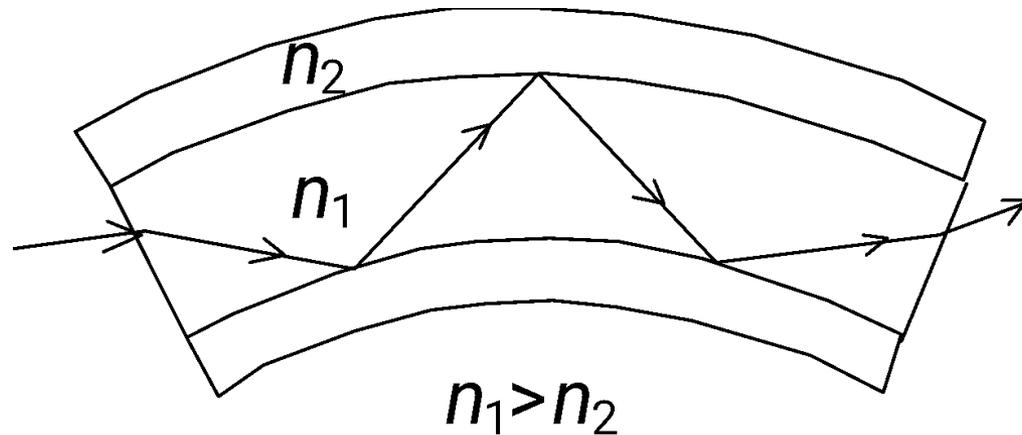
# Материалы для изготовления оптических световодов

**Стекловолокнистые материалы** представляют из себя гибкие искусственные волокна с диаметром 4...7 мкм, получаемые из расплавленного стекла. Выпускаются волокна двух видов: *шелковое*, с длиной нити до 20 км, и *штапельное*, с длиной нити 5...50 см.

Волокно получают фильерным или штабиковым способом. Из приготовленной пряжи изготавливают **стеклоткани**. **Стекловолокнистая изоляция** отличается высокой нагревостойкостью (до 250 °C). *Для производства стекловолокна применяются бесщелочные алюмоборосиликатные, стронциевые и кварцевые стекла.*

Разновидностью стекловолокнистых материалов являются *световоды*.

# Материалы для изготовления оптических световодов



Принцип действия световода

**Световоды** представляют тонкие стеклянные волокна диаметром 5...15 мкм, которые используют для передачи света между источником и приемником излучения. Волокно имеет сердцевину и оболочку из стекол разного состава с различными показателями преломления; показатель преломления сердцевины  $n_1$  больше показателя преломления оболочки  $n_2$ .

# Требования к материалам для световодов

Самым низким поглощением в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (длина волны 0,63...1,55 мкм) среди большинства стекол обладает **плавленный кварц** (при условии высокой степени очистки и гомогенности (однородности)). Показатель преломления плавленного кварца  $n$  составляет 1,4585 на длине волны  $\lambda=0,589$  мкм. В оптических волокнах (ОВ) из плавленного кварца самое низкое значение поглощения составляет 1,9 дБ/км на длине волны **0,85 мкм**, 0,291 дБ/км – на длине волны **1,3 мкм** и 0,154 дБ/мкм – на длине волны **1,55 мкм**.

Стекла, применяемые для изготовления световодов (**сердцевины и оптической оболочки**), отличаются друг от друга показателями преломления. Для регулирования показателя преломления кварцевого стекла в него добавляют присадки в виде окислов  $P_2O_5$ ,  $B_2O_3$ ,  $GeO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Sb_2O_3$ . Молярные доли этих окислов в кварце могут меняться в пределах 1...15 %. Присадка  $B_2O_3$  понижает показатель преломления кварца до величины  $n=1,4582$  при  $\lambda=0,589$  мкм. Длительный отжиг боросиликатного стекла приводит к увеличению  $n$ . Окислы  $P_2O_5$ ,  $GeO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , и  $Sb_2O_3$  используют для повышения показателя преломления кварцевого стекла до значения  $n=1,47...1,48$  без ухудшения его оптических свойств.

# Материалы для лазеров

Материал	Матрица	Активатор	Концентрация, %	Длина волны $\lambda$ , мкм
Рубин	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}^{3+}$	0,04	0,694
Иттрий-алюминиевый гранат с неодимом	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	$\text{Nd}^{3+}$	1...3	1,06
Алюминат иттрия с неодимом	$\text{YAlO}_3$	$\text{Nd}^{3+}$	3	1,06
Стекло с неодимом	Стекло	$\text{Nd}^{3+}$	4	1,06
Флюрит с диспрозием	$\text{CaF}_2$	$\text{Dy}^{3+}$	0,02	2,36

КПД твердотельных лазеров составляет 1...7 %.

# 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

# Керамические материалы

**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 ( $\text{Ca}_2\text{O} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{SiO}_2$ ).

# Технология керамических материалов

Технологическая схема керамического производства состоит из следующих основных операций:

- тонкое измельчение и тщательное смешивание исходных компонентов сухим или мокрым способом;
- пластификация керамической массы парафином или поливиниловым спиртом и образование формовочного полу-фабриката;
- формование заготовок из пластифицированной массы методом прессования или выдавливания;
- спекание изделий при температуре 1300 °С и выше.

При спекании происходит выжигание пластификатора, завершаются химические реакции между компонентами. При этом происходит усадка до 20% от исходных размеров.

Полученные изделия обладают высокими диэлектрическими качествами и отличаются высокой твердостью и хрупкостью.

# Классификация радиочастотной керамики

Классификация, свойства и основные области применения радиочастотной керамики регламентированы **ГОСТ 5458 "Материалы керамические радиотехнические"**. Стандартом определены три группы радиотехнических керамических материалов:

**группа А** - материалы высокочастотные для конденсаторов (подразделяются на классы в зависимости от величины температурного коэффициента диэлектрической проницаемости -  $TK_{\epsilon}$ );

**группа Б** - материалы низкочастотные для конденсаторов (подразделяются на классы в зависимости от величины  $TK_{\epsilon}$ );

**группа В** - материалы высокочастотные для установочных изделий (подразделяются на классы по значениям  $TK_{LP}$  и прочности).

Кроме того, конденсаторные керамические материалы в группах А и Б нормируются по значениям  $TK_{\epsilon}$ . Эти значения, в свою очередь, разделены (разбиты) на так называемые *группы по  $TK_{\epsilon}$* . Каждая группа характеризуется конкретным значением  $TK_{\epsilon}$ . Керамика группы А разбита на 12 групп по  $TK_{\epsilon}$ , группы Б - на 7 групп по  $TK_{\epsilon}$ .

# Высокочастотная конденсаторная керамика (группа А)

Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	$TK\epsilon$ , $\alpha_{\epsilon,T} \cdot 10^6$ , $K^{-1}$	Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta \cdot 10^4$	Удельное электросопротивление $\rho$ , Ом·м	Электрическое напряжение пробоя $E_{пр}$ , МВ/м
12...230	+33... -3300	6	$10^9$	16...25

Конденсаторная керамика отличается сравнительно небольшим содержанием пластичной аморфной фазы. Кристаллическую фазу образуют перовскиты типа  $SrTiO_3$ ,  $CaTiO_3$ ,  $LaAl_2O_3$ ,  $CaZrO_3$  и их смеси.

По величине  $TK\epsilon$  керамика группы А подразделяется на три класса:

**Класс I** ( $\alpha_{\epsilon,T} = -3300 \times 10^{-6}$  и  $-1500 \times 10^{-6} K^{-1}$ ). Керамика класса I предназначена для изготовления высокочастотных высоковольтных и низковольтных конденсаторов, к которым не предъявляются требования к высокой стабильности емкости (горшковые, трубчатые, дисковые конденсаторы).

**Класс II** ( $\alpha_{\epsilon,T} = -750 \times 10^{-6} \dots -150 \times 10^{-6} K^{-1}$ , пять групп по  $TK\epsilon$ ). Керамика класса II предназначена для изготовления термокомпенсирующих конденсаторов, емкость которых уменьшается при повышении температуры. Конденсаторы такого типа необходимы для применения, например, в частотно-избирательных цепях, содержащих индуктивности и емкости).

**Класс III** ( $\alpha_{\epsilon,T} = -75 \times 10^{-6} \dots +33 \times 10^{-6} K^{-1}$ , пять групп по  $TK\epsilon$ ). Керамика этого класса используется при изготовлении высокочастотных термостабильных конденсаторов.

# Низкочастотная конденсаторная керамика (группа Б)

Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$	$TK\epsilon$ , ( $\Delta\epsilon/\epsilon$ ) $\cdot 100\%$ $\pm$	Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta \cdot 10^4$	Удельное электросопротивление, $\rho$ , Ом·м	Электрическое напряжение пробы, $E_{\text{пр}}$ , МВ/м
900...8000	30... 70	20...300	$10^8$	3...5

**В керамических материалах группы Б** кристаллической фазой являются смеси состава  $\text{SrTiO}_3 + 2\text{Bi}_2\text{O}_3 + 3\text{TiO}_2$  (стронций-висмут-титановая керамика марки СВТ) или  $\text{BaTiO}_3 + 2\text{Bi}_2\text{O}_3 + 3\text{TiO}_2$  (барий-висмут-титановая керамика марки СМ-1). Перечисленные керамические материалы обладают сегнетоэлектрическими свойствами. Кроме того, керамика группы Б характеризуется заметной температурной зависимостью  $TK\epsilon$ , которая приведена в справочниках в виде отношения  $(\Delta\epsilon/\epsilon) \times 100\%$ . Значения  $\epsilon$  измеряются в диапазоне температур около 60 °С в температурных интервалах минус 40...+20 °С и +20...+85 °С.

Низкочастотная конденсаторная керамика группы Б в зависимости от величины  $\Delta\epsilon/\epsilon$  подразделяется на два класса.

**Класс IV** ( $\Delta\epsilon/\epsilon=30\%$ , одна группа по  $TK\epsilon$ ). Керамика класса IV марки СВТ применяется в производстве низкочастотных конденсаторов, предназначенных для работы на частотах, не превышающих  $10^4$  Гц, а также для однополярных конденсаторов, применяемых в цепях передачи видеоимпульсов.

**Класс V** ( $\Delta\epsilon/\epsilon=(10...70)\%$ , шесть групп по  $TK\epsilon$ ). Керамика этого класса марки СМ используется для изготовления низкочастотных разделительных и блокировочных конденсаторов.

# Установочная высокочастотная керамика (группа В)

$TKLP \cdot 10^6, K^{-1}$	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	$TK\epsilon, \alpha_{\epsilon, \square} \cdot 10^6, K^{-1}$	$tg\delta \cdot 10^4$	Удельное электросопротивление, $\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Электрич. напряжение пробоя, $E_{пр}, \text{ МВ/м}$
2...7	7,5...9	+100	4...10	$10^{10} \dots 10^{11}$	20...25

В зависимости от значения  $TKLP$  установочная керамика подразделяется на три класса.

**Класс VI.** Называется **радиофарфор** и используется для изготовления каркасов катушек индуктивности, металлокерамических соединений в радиолампах. Выпускается две разновидности радиофарфоров, различающихся составом кристаллической фазы. К первому виду относятся радиофарфоры, в которых кристаллическая фаза представляет собой смесь шпинели и форстерита ( $MgO \times Al_2O_3 + 2MgO \times SiO_2$ ). В радиофарфорах второго вида кристаллическая фаза состоит из цельзиана с химической формулой ( $BaO \times Al_2O_3 \times 2SiO_2$ ).

**Класс VII.** Называют **стеатит** и используют для тех же целей, что и керамику класса VI. Основной кристаллической фазой стеатита является клиноэнстатит ( $MgO \times SiO_2$ ). Эта фаза получается в результате обжига природного минерала талька ( $3MgO \times 4SiO_2 \times H_2O$ ). Преимуществом стеатитовой керамики перед радиофарфором является возможность получения более гладких поверхностей и незначительная усадка при обжиге. Стеатитовая керамика подразделяется на 2 группы по  $TKLP$ .

**Класс VIII.** Используется для изготовления подложек тонкопленочных и толстопленочных гибридных ИС. Кристаллическую фазу керамики класса VIII образует корунд ( $\alpha-Al_2O_3$ ) или глинозем, имеющий тот же химический состав. Корундовая (глиноземистая) керамика с содержанием 95...99%  $Al_2O_3$  называется **алюминоксид**. Наиболее распространены алюминоксиды марки 22ХС (ВК92). Разновидностью алюминоксида является **поликор**, содержащий 99,7...99,9%  $Al_2O_3$ . Изделия из поликора обладают плотной структурой, имеют очень гладкую поверхность, прозрачны для видимого света. Поликор широко используется для изготовления подложек тонкопленочных ГИС. 45

# Активные диэлектрики.

Активными называются диэлектрики, свойствами которых можно управлять с помощью внешних электрических воздействий и использовать эти воздействия для создания функциональных элементов электроники. А.Д. позволяют осуществлять генерацию, усиление, модуляцию электрических и оптических сигналов, запоминание или преобразование информации. Значение А.Д. возрастает. К их числу относят:

- сегнето, пьезо- и пироэлектрики;
- электреты;
- материалы квантовой электроники;
- жидкие кристаллы;
- электро-, магнито- и акустооптические материалы;
- диэлектрические кристаллы с нелинейными оптическими свойствами.

# Свойства сегнетоэлектриков.

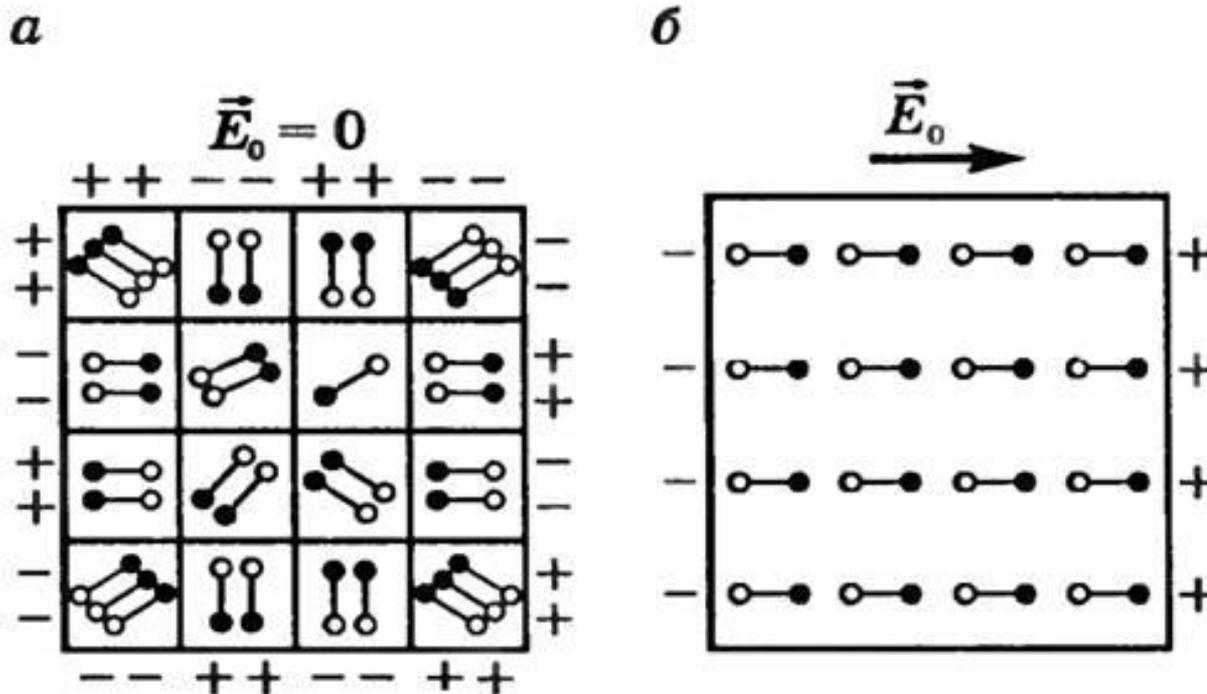
Термин «сегнетоэлектрики» происходит от названия «сегнетова соль», которая является первым материалом, в котором были обнаружены сегнетоэлектрические свойства, и представляет собой двойную соль калия и натрия винной кислоты  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Основными свойствами сегнетоэлектриков являются их способность к **спонтанной поляризации**, возникающей самопроизвольно, без наложения внешнего электрического поля. При наложении поля поляризация становится направленной.

В отсутствие внешнего поля сегнетоэлектрик, как правило, имеет доменную структуру. Направления электрических моментов у разных доменов различно. Поэтому суммарная поляризованность образца м.б. равна нулю. Если кристалл имеет малые размеры, то он может состоять всего одного домена.

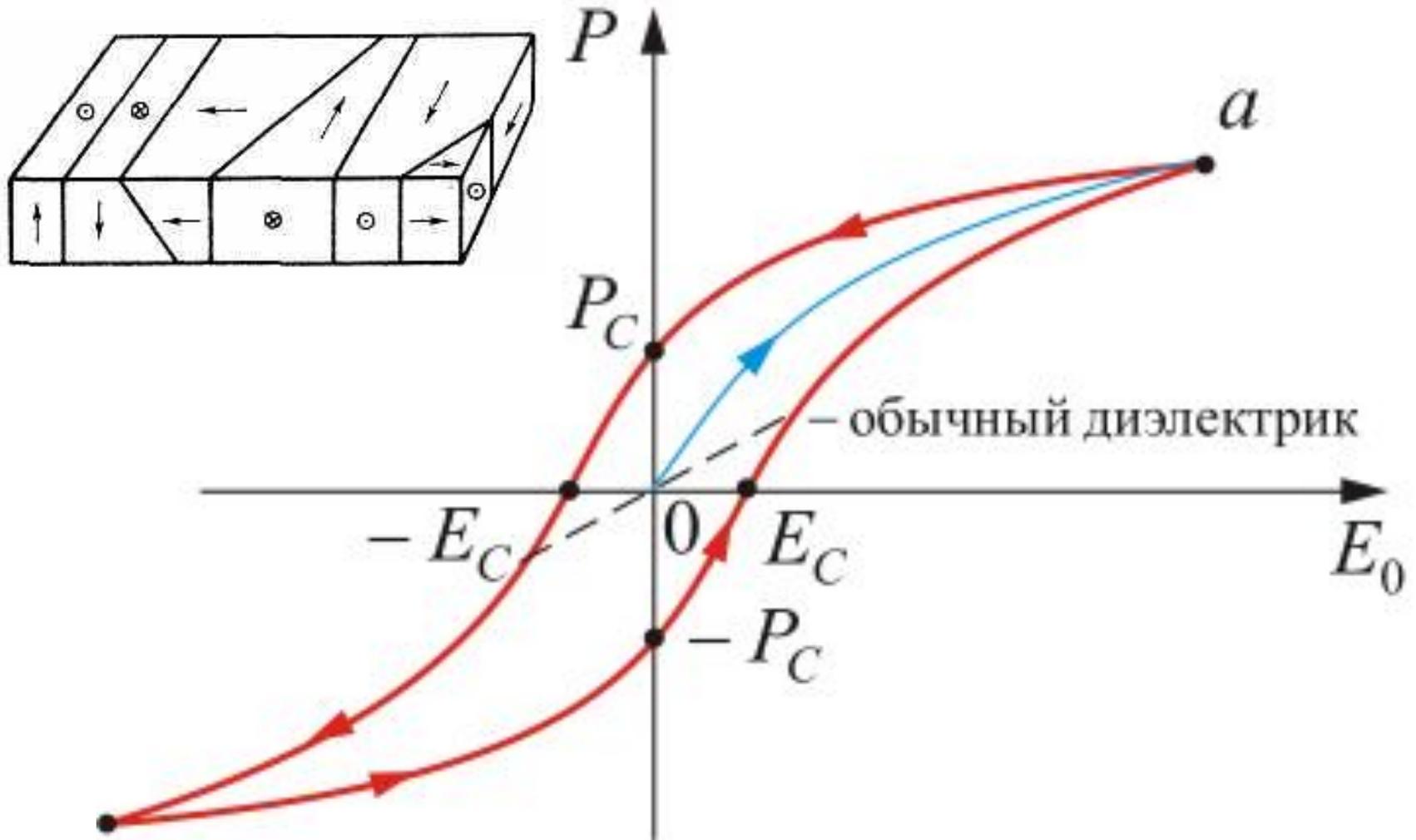
# Свойства сегнетоэлектриков.

Внешнее эл. поле изменяет направление электрических моментов доменов, что создает эффект сильной поляризации. Этим объясняют свойственные сегнетоэлектрикам **сверхвысокие диэлектрические проницаемости  $\epsilon$**  (до сотен тысяч). Доменная поляризация связана с процессами зарождения и роста новых доменов за счет смещения доменных границ, которые в итоге вызывают переориентацию вектора спонтанной поляризованности в направлении внешнего поля.



# Свойства сегнетоэлектриков.

Следствием доменного строения сегнетоэлектриков является нелинейная зависимость их электрической индукции от напряженности электрического поля



# Применение сегнетоэлектриков.

- 1) Изготовление малогабаритных конденсаторов с большой уд. ёмкостью;
- 2) Использование материалов с большой нелинейностью поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и др. управ. устройств;
- 3) Использование сегнетоэлектриков в ЭВМ в качестве ячеек памяти;
- 4) Использование для модуляции и преобразования лазерного излучения;
- 5) Изготовление пьезоэлектрических и пироэлектрических преобразователей.

# Классификация сегнетоэлектриков.

Сейчас известно несколько сотен соединений, обладающих свойствами сегнетоэлектриков.

Обычно их классифицируют по типу химической связи, две группы:

- 1) ионные кристаллы;
- 2) дипольные кристаллы;

Ионные и дипольные С. существенно отличаются по свойствам. Ионные- нерастворимы в воде, мехпрочны, легко получают в виде поликристаллов по керамической технологии.

Дипольные- хорошо растворяются в воде и малая мехпрочность.

Подавляющее большинство ионных сегнетоэлектриков имеют более высокую  $T$  юри и большие значения спонтанной поляризованности. Значительная часть дипольных сегнетоэлектриков имеет  $T$  юри немного ниже комнатной температуры.

# 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  $BaTiO_3$  ( $T_K=120\text{ }^\circ\text{C}$ ), титанат свинца  $PbTiO_3$  ( $T_K=490\text{ }^\circ\text{C}$ ), ниобат калия  $KNbO_3$  ( $T_K=435\text{ }^\circ\text{C}$ ), ниобат лития  $LiNbO_3$  ( $T_K=200\text{ }^\circ\text{C}$ ), танталат лития  $LiTaO_3$  ( $T_K=610\text{ }^\circ\text{C}$ ). Элементарная ячейка этих соединений имеет вид ГЦК куба с ионом  $B^{4+}$  ( $Ti^{4+}$ ,  $Nb^{4+}$ ,  $Ta^{4+}$ ) в центре (рис. 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.

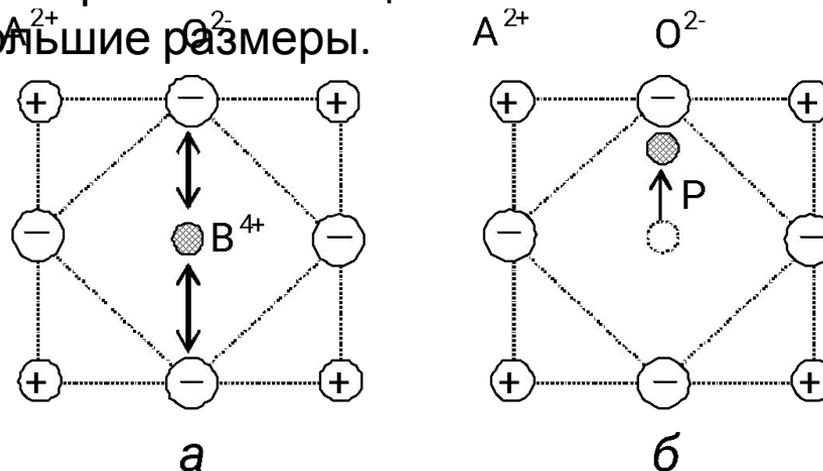


Рис. Сечение элементарной ячейки ионного сегнетоэлектрика: а -  $T > T_K$ ; б -  $T < T_K$

# Ионные сегнетоэлектрики

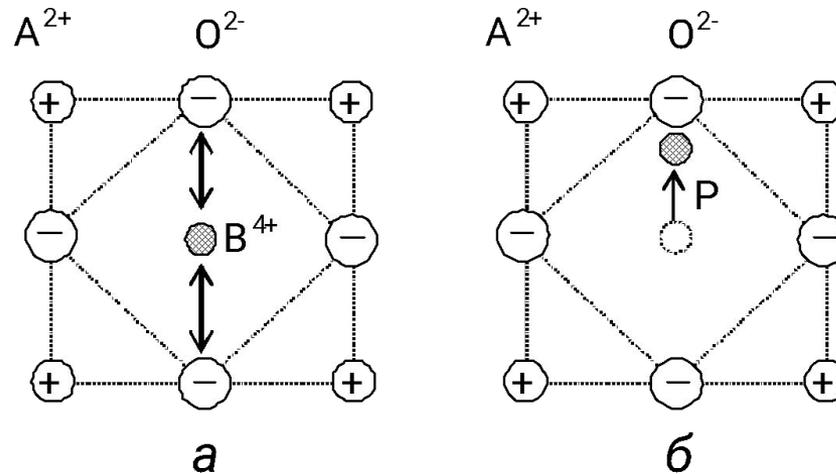


Рис. Сечение элементарной ячейки ионного сегнетоэлектрика: а -  $T > T_K$ ; б -  $T < T_K$

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** ( $T_K=24^\circ\text{C}$ ), **триглицинсульфат** (ТГС) ( $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \times \text{H}_2\text{SO}_4$  ( $T_K=49^\circ\text{C}$ ), **нитрит натрия**  $\text{NaNO}_2$  ( $T_K=160^\circ\text{C}$ ), дигидрофосфат калия (КДП)  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ( $T_K=-151^\circ\text{C}$ ). 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.

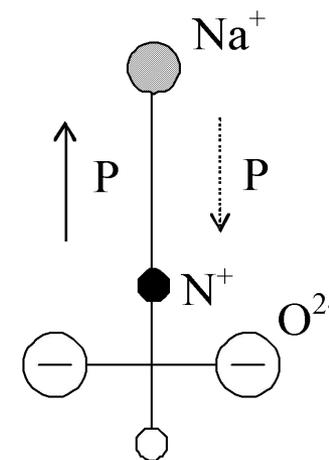


Рис. Строение элементарной ячейки кристалла  $\text{NaNO}_2$

# Применение сегнетоэлектриков 1

**Изготовление малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью.** Для этой цели используется низкочастотная конденсаторная керамика типа Б классов IV и V. Эта керамика изготавливается на основе ионных сегнетоэлектриков, главным образом  $\text{BaTiO}_3$  с добавками, снижающими резкую зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  этого материала от температуры (а, следовательно, и емкости конденсатора, изготовленного на его основе).

Например, керамика марки СМ1 представляет композицию  $\text{BaTiO}_3 + 2\text{Bi}_2\text{O}_3 \times 3\text{TiO}_2$  с добавкой  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  ( $T_{\text{к}} = 40^\circ\text{C}$ ). Добавка  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  позволяет получить достаточно пологую зависимость  $\epsilon = f(T)$  для этого материала в области температуры Кюри (см. рис. 4.25, а). Керамика марки СВТ на основе сегнетоэлектрика  $\text{SrTiO}_3$  имеет состав  $\text{SrTiO}_3 + 2\text{Bi}_2\text{O}_3 \times 3\text{TiO}_2$  с добавкой 15%  $\text{PbO}$  ( $T_{\text{к}} = -140^\circ\text{C}$ ). Добавка окиси свинца увеличивает диэлектрическую проницаемость материала до значения  $\epsilon = 1300$ .

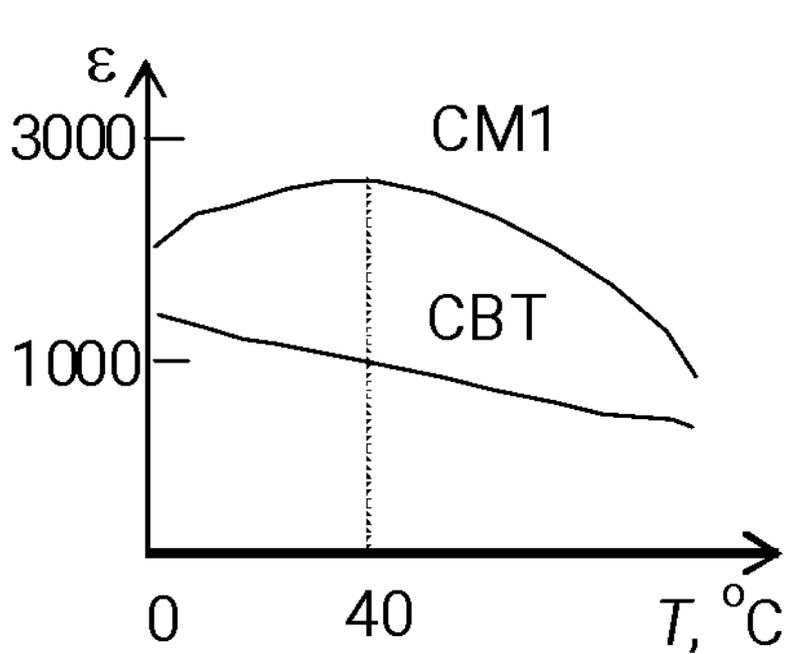
Величина  $\text{tg}\delta$  керамики СМ1 и СВТ довольно велика и достигает значений  $(40 \dots 100) \times 10^{-3}$ .

## Применение сегнетоэлектриков 2

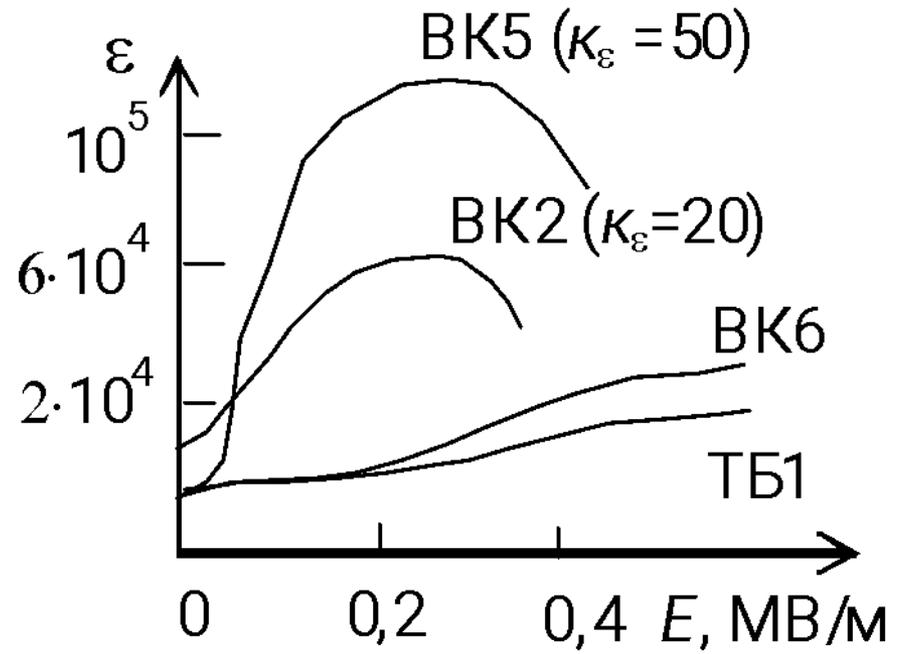
### **Изготовление электрически управляемых нелинейных конденсаторов (варикондов).**

Вариконды представляют собой конденсаторы с сильной зависимостью емкости от величины электрического напряжения на обкладках. Конденсаторы подобного типа используют в преобразователях частоты, диэлектрических усилителях, стабилизаторах, системах частотной модуляции (кроме входных колебательных контуров и фильтров). Принцип действия вариконда основан на зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля. Типичная зависимость  $\varepsilon=f(E)$  для различных ионных сегнетоэлектриков представляет кривую с максимумом (рис. 4.30).

## Применение сегнетоэлектриков 2



а



б

Рис. Характеристики сегнетокерамики:

а - зависимость  $\varepsilon = f(T)$ ; б - зависимость  $\varepsilon = f(E)$

## Применение сегнетоэлектриков 2

В качестве материалов для изготовления диэлектрических прокладок варикондов используется сегнетоэлектрическая керамика марок ВК2 и ВК5. По химическому составу эти материалы являются твердыми растворами типа  $\text{BaTiO}_3\text{-SnTiO}_3$ , содержащие до 94%  $\text{BaTiO}_3$ . Изготавливается также сегнетокерамика марки ВК6, являющаяся тройным твердым раствором типа  $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Sn})\text{O}_3$ . Сегнетокерамика марки ТБ-1 представляет чистый титанат бария  $\text{BaTiO}_3$ . Зависимости  $\varepsilon=f(E)$  для перечисленных видов сегнетоэлектрических материалов приведены на рис. 4.30, б. Одним из основных параметров нелинейных сегнетоэлектриков является коэффициент нелинейности  $k_\varepsilon = \varepsilon_{\text{макс}} / \varepsilon_{\text{мин}}$ . Значение  $k_\varepsilon$  для различных марок сегнетокерамики равно 4...50.

# Применение сегнетоэлектриков 3

**Использование сегнетоэлектриков в качестве ячеек памяти и бесконтактных переключателей.** На основе сегнетоэлектрических материалов возможно изготовление элементов с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), представляющей зависимость  $D=f(E)$ , изображенную на рис. а. Показателем прямоугольности петли гистерезиса является коэффициент прямоугольности  $k_{пр} = D_r/D_s$ , где  $D_r$  - значение остаточной индукции электрического поля в сегнетоэлектрике,  $D_s$  - индукция насыщения. Значение  $k_{пр}$  достигает величины 0,95.

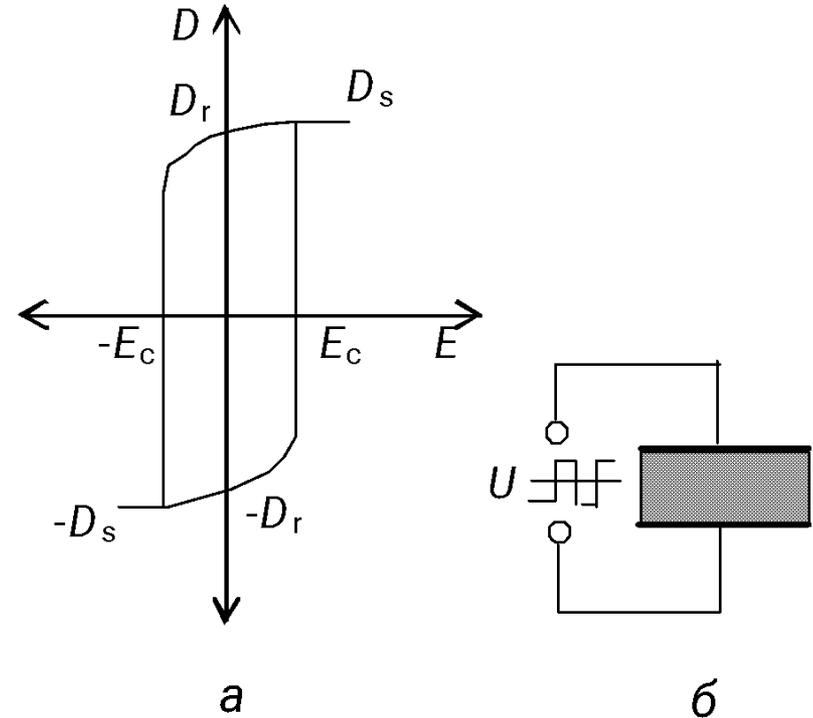


Рис. Принцип действия ячейки памяти на основе сегнетоэлектрика с ППГ: а - петля гистерезиса  $D=f(E)$ ; б - ячейка памяти конденсаторного типа

# Применение сегнетоэлектриков 3

## *Использование сегнетоэлектриков в качестве ячеек памяти и бесконтактных переключателей.*

На основе ППГ обладают как ионные, так и дипольные сегнетоэлектрики, к которым относятся сегнетокерамика ВК6 и монокристаллический триглицинсульфат (ТГС).

Ячейка памяти представляет из себя конденсатор с диэлектрической прокладкой из сегнетоэлектрика. Подавая на ячейку двухполярные импульсы напряжения  $U$ , создающие в сегнетоэлектрике напряженность электрического поля  $|E| > E_c$ , где  $E_c$  - коэрцитивная сила, ячейку памяти можно переводить из состояния  $+D_r$ , соответствующего хранению логической единицы, в состояние минус  $D_r$ , соответствующее хранению логического нуля.

Считывание информации из ячейки осуществляется оптическим методом, или с помощью МОП транзистора, имеющего высокое входное сопротивление.

# Применение сегнетоэлектриков 4

**Применение сегнетоэлектриков в качестве электрооптических материалов.** В некоторых сегнетоэлектриках наблюдается сильно выраженный электрооптический эффект. Этот эффект известен под названием **эффекта Керра** и заключается в изменении показателя преломления  $\Delta n$  прозрачного сегнетоэлектрического кристалла при воздействии на кристалл внешнего электрического поля  $E$ :

$$\Delta n = \frac{n^3 r E}{2},$$

где  $r$  – электрооптический коэффициент;  $n$  – показатель преломления при полуволновом напряжении  $U_{\lambda/2} = 10 \dots 11$  кВ;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м.

# Применение сегнетоэлектриков 4

Одновременно поворачивается плоскость колебаний электрического вектора световой волны. В качестве электрооптических материалов применяются ионные сегнетоэлектрики типа  $\text{LiNbO}_3$ , материал марки ЦТСЛ, представляющий твердые растворы типа  $\text{La}(\text{Pb}, \text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ . Широко применяются также дипольные сегнетоэлектрики, в частности, дигидрофосфат калия (КДП).

**Электрооптические свойства сегнетоэлектриков используются для модуляции лазерного излучения.**

# Применение сегнетоэлектриков 4

В ячейке Керра кристалл сегнетоэлектрического материала находится между двумя скрещенными поляроидами – поляризатором и анализатором. Действие модулятора основано на зависимости поворота плоскости поляризации светового луча, проходящего через сегнетоэлектрик, от напряженности электрического поля, создаваемого источником сигнала.

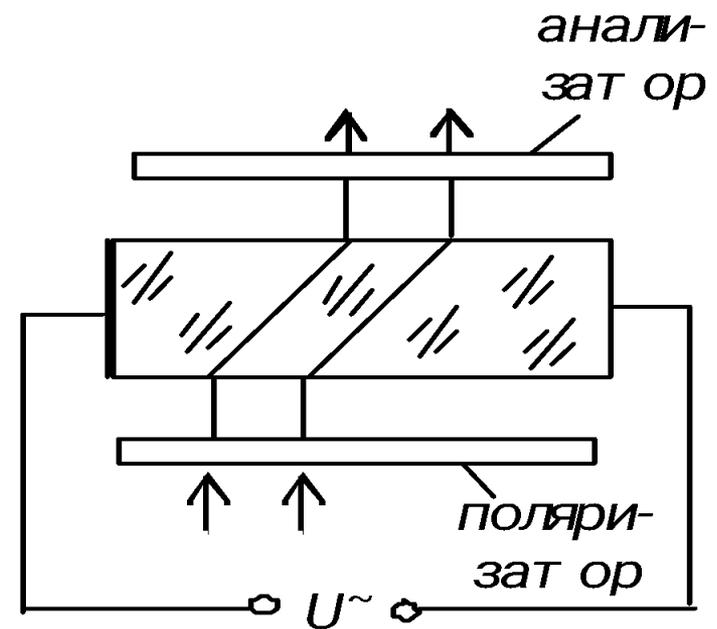


Рис. 4.32. Электрооптический модулятор (ячейка Керра)

# Применение сегнетоэлектриков 5

**Преобразование частоты оптического сигнала.** При прохождении через некоторые прозрачные сегнетоэлектрики мощного светового пучка, создаваемого с помощью лазера, в материале проявляется *эффект нелинейной поляризации материала*. Этот эффект заключается в зависимости показателя преломления среды от напряженности электрического поля светового пучка лазера, проходящего через сегнетоэлектрик. При этом в месте прохождения светового пучка, характеризуемого частотой излучения  $f$ , меняется показатель преломления среды, а в спектре проходящего через сегнетоэлектрик излучения появляются гармоники с частотами  $2f$ ,  $3f$  и т. д. Таким образом нелинейность оптических свойств сегнетоэлектриков позволяет осуществлять генерацию гармоник лазерного излучения, а также проводить смешение и преобразование частот оптических сигналов. Значительный практический интерес представляет, в частности, преобразование невидимого ИК-излучения ( $\lambda=1,06$  мкм) в видимый свет с длиной волны  $\lambda/2=0,503$  мкм, соответствующей красной области спектра. Высокую эффективность такого преобразования (практически со стопроцентной перекачкой энергии) обеспечивают кристаллы ионных сегнетоэлектриков -  $\text{LiNbO}_3$ , йодат лития  $\text{LiIO}_3$ , барий-натриевый ниобат  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  (БАНАН). Из дипольных сегнетоэлектриков для преобразования частот оптических

# Пьезоэлектрики

*Прямой пьезоэлектрический эффект* заключается в появлении поляризации диэлектрика под действием механических напряжений  $\sigma$ , Н/м<sup>2</sup>. При этом на поверхности диэлектрика возникает электростатический заряд  $q$ . Величина электростатического заряда численно равна поляризованности  $P$  пьезоэлектрика и определяется из выражения

$$q = d_{\text{пр}} \sigma, \quad \text{Кл/м}^2$$

где  $d_{\text{пр}}$  - пьезомодуль прямого пьезоэффекта, значение которого для большинства пьезоэлектриков составляет  $10^{-12} \dots 10^{-11}$  Кл/Н.

*Обратный пьезоэлектрический эффект* заключается в изменении размеров пьезоэлектрика, помещенного в электрическое поле. Если обозначить относительную деформацию  $\Delta/l$  через  $\xi$ , то величина относительной деформации пьезоэлектрика  $\xi$  в электрическом поле с напряженностью  $E$  рассчитывается из выражения

$$\xi = d_{\text{обр}} E,$$

где  $d_{\text{обр}}$  - пьезомодуль обратного пьезоэффекта, м/В.

# Пьезоэлектрики

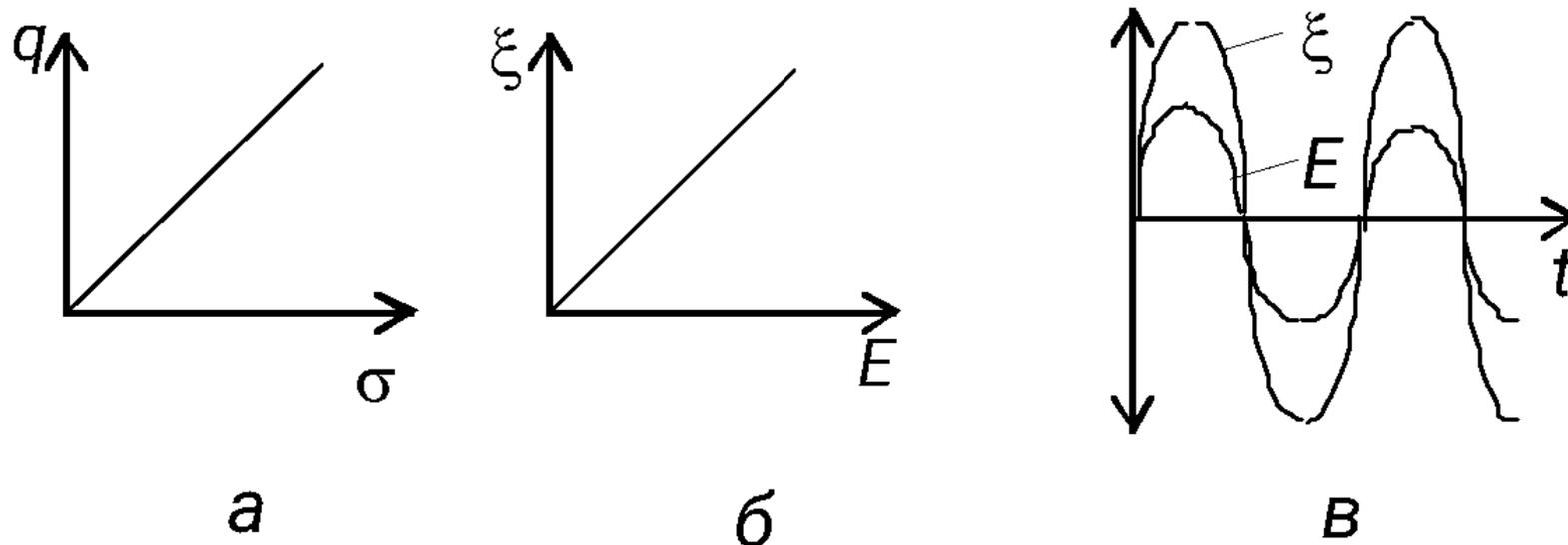
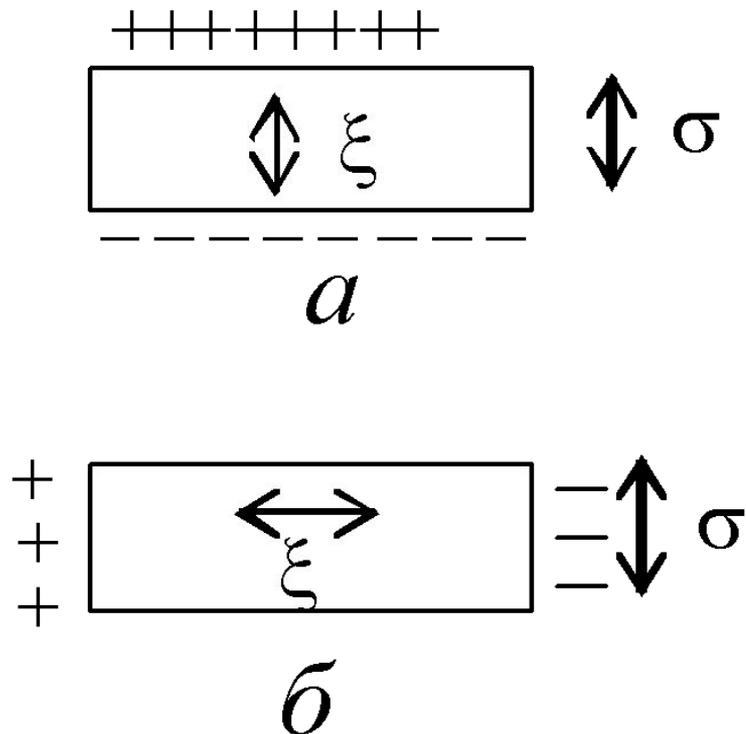


Рис. 4.33. Характеристики пьезоэлектрических материалов:  
а - зависимость  $q=f(\sigma)$  для прямого пьезоэффекта;  
б - зависимость  $\xi=f(E)$  для обратного пьезоэффекта;  
в - синхронное изменение напряженности электрического поля  $E$  и относительной деформации  $\xi$  пьезоэлектрика

# Пьезоэлектрики

Схемы  
возникновения  
продольного - *a*  
и поперечного - *б*  
пьезоэффектов



Коэффициент электромеханической связи:

$$k_m^2 = P_a / P_r,$$

где  $P_a$  - мощность акустических колебаний, развиваемая пьезоэлектриком в результате возникновения пьезоэффекта;  $P_r$  - электрическая мощность, потребляемая пьезоэлектриком от источника возбуждающего напряжения (генератора).

# Характеристики пьезоэлектрических материалов 1

**Монокристаллические пьезоэлектрики.** К этому классу пьезоэлектриков относится, прежде всего,  $\beta$ -кварц, а также ионные сегнетоэлектрики.

Ось  $Z$ , проходящая через вершины кристалла, называется **оптической осью**. Характерно, что в пластинках кварца, вырезанных перпендикулярно оптической оси  $Z$ , пьезоэффект не наблюдается. Три оси  $X$ , проходящие через вершины шестигранника, полученного при поперечном сечении монокристалла, называются **электрическими осями**. Пластинка, вырезанная перпендикулярно оси  $X$ , обладает наибольшим пьезоэффектом. Три оси  $Y$ , перпендикулярные боковым граням шестигранника, носят название **механических осей**. Коэффициент электромеханической связи  $k_M \approx 0,05 \dots 0,1$ .

Из ионных сегнетоэлектриков в качестве пьезоэлектрических материалов широкое практическое применение получили ниобат лития  $\text{LiNbO}_3$ , танталат лития  $\text{LiTaO}_3$ , а также германат висмута  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ . Коэффициент электромеханической связи  $k_M \approx 0,1 \dots 0,3$ .

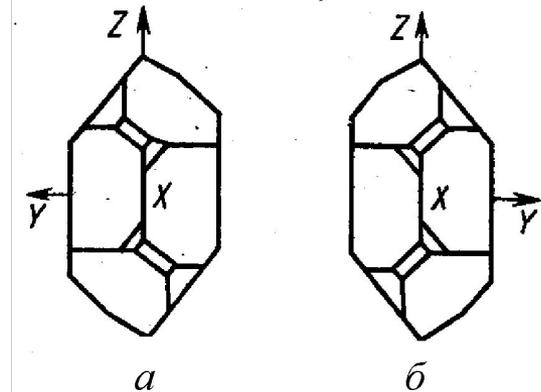


Рис. 4.36. Идеальный монокристалл  $\beta$ -кварца в виде левой (а) и правой (б) модификации

# Характеристики пьезоэлектрических материалов 2

**Пьезополупроводники** - соединения полупроводникового типа с ионно-ковалентной связью CdS, ZnO, ZnS и др. Практический интерес представляют также такие полупроводниковые соединения, как селенид кадмия (CdSe), арсенид галлия (GaAs) и др.

**Пьезоэлектрики на основе дипольных сегнетоэлектриков.** К ним относятся монокристаллы сегнетовой соли, этилендиаминтарtrat  $C_6H_{14}N_8O_8$  (ЭДТ), сульфат лития  $Li_2SO_4 \cdot xH_2O$ , турмалин.

**Поликристаллические пьезоэлектрики.** К ним относится сегнетоэлектрическая керамика. В сегнетокерамике, обладающей изотропными свойствами, пьезоэффект не наблюдается. Для придания пьезоэлектрических свойств сегнетокерамику предварительно поляризуют в постоянном электрическом поле напряженностью 2...4 МВ/м при температуре 100...150 °С в течение около 1 часа. После выключения внешнего электрического поля в сегнетокерамике сохраняется устойчивая остаточная поляризация, что является причиной появления пьезоэффекта. Поляризованную сегнетокерамику называют пьезокерамикой.

# Применение пьезоэлектриков

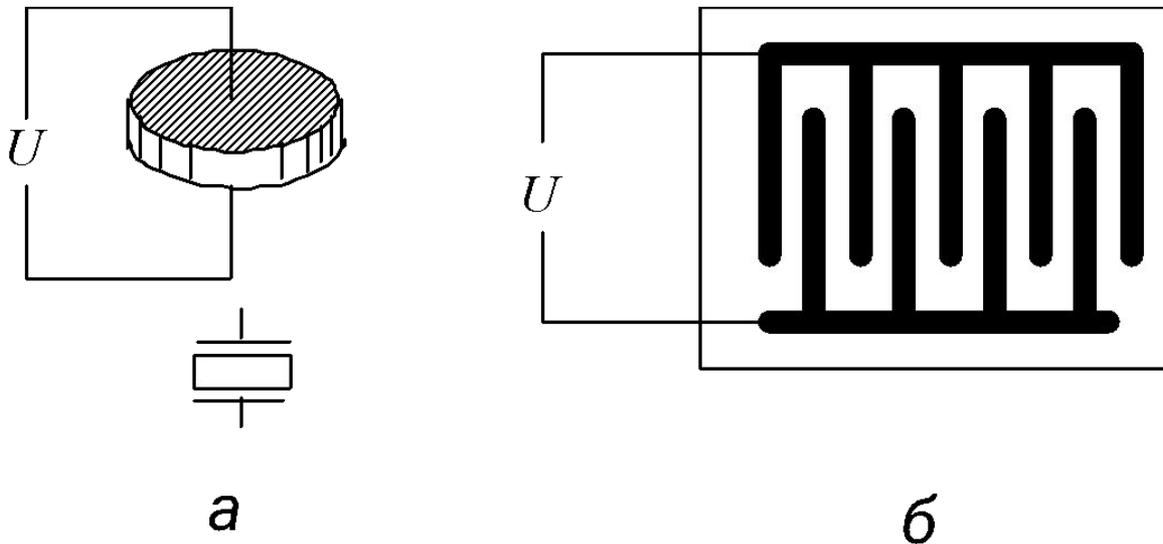


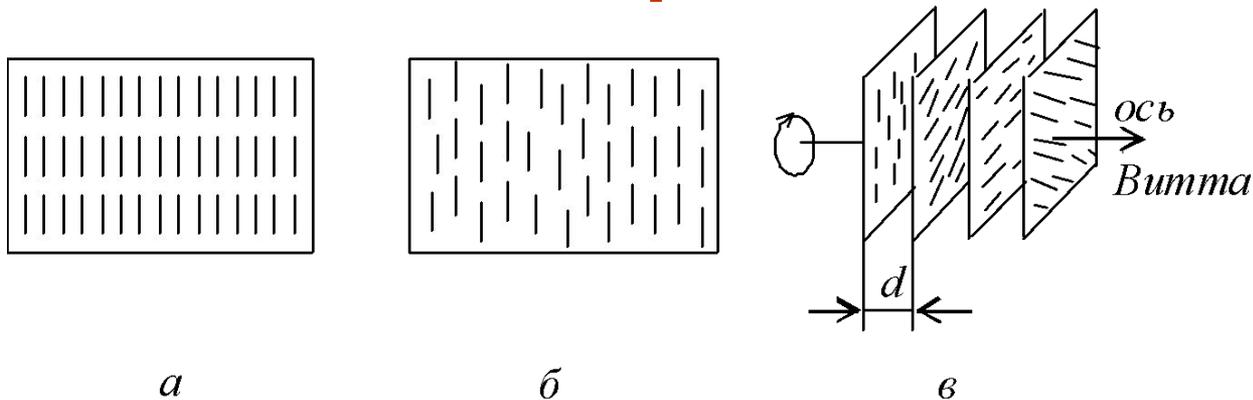
Рис. 4.37. Пьезоэлектрические преобразователи: а - пьезоэлектрический резонатор и его условное обозначение на электрической схеме; б - встречно-штыревой преобразователь поверхностных акустических волн

# 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.

# Жидкие кристаллы



Виды жидкокристаллических материалов: *a* - смектическая фаза; *б* – нематическая фаза; *в* – холестерическая фаза

**В жидкокристаллических индикаторах используется эффект динамического рассеяния света.** Этот эффект наблюдается в ЖК - нематиках с отрицательной диэлектрической анизотропией  $\Delta\varepsilon$  и удельным электросопротивлением  $\rho$  около  $10^6$  Ом $\times$ м. Эффект динамического рассеяния света проявляется при приложении к ЖК как постоянного, так и переменного напряжений низкой частоты  $10^2 \dots 10^4$  Гц. Для практических целей обычно используется смесь двух или нескольких жидкокристаллических соединений, например, 60% МББА+40% ЭББА, что позволяет получить более широкий температурный интервал существования мезофазы.

# Применение жидких кристаллов

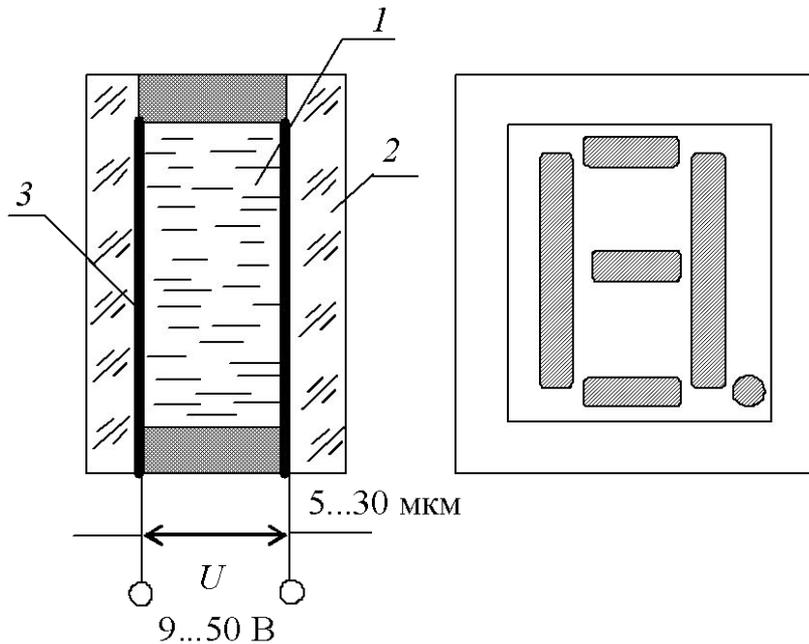


Рис. Конструкция электрооптического индикатора на ЖК  
1 – жидкий кристалл;  
2 – защитные стекла;  
3 – прозрачный электрод ( $\text{SnO}_2$ )

Для целей визуального отображения информации наибольший практический интерес представляют электрооптические эффекты в нематических жидких кристаллах. По электрическим свойствам нематические ЖК относятся к группе полярных диэлектриков - сегнетоэлектриков с удельным электросопротивлением  $\rho = 10^6 \dots 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Эти материалы характеризуются *диэлектрической и оптической анизотропией*.

# Применение холестерических жидких кристаллов

Поскольку направления молекул в слоях холестерических ЖК закручены в спиральную структуру с шагом  $d$  (рис. 4.40), то при отражении света от жидкого кристалла наблюдается эффект интерференции света, удовлетворяющий закону Вульфа-Брэгга

$$2d\sin\theta = m\lambda,$$

где  $d$  - шаг спирали;  $\lambda$  - длина волны света, нм;  $m$  - порядок дифракционного максимума (рис. 4.40). Из-за интерференции на витках спирали молекул освещенный белым светом кристалл кажется окрашенным. Шаг винтовой спирали  $d$  сильно зависит от температуры. Это ведет к изменению окраски поверхности кристалла (которая зависит и от угла наблюдения).

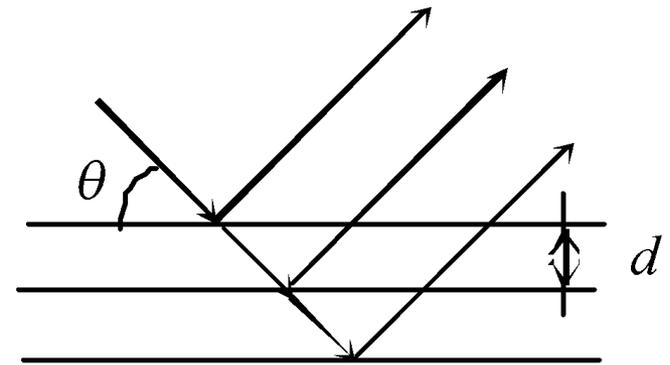


Рис. 4. 40. Интерференция света при отражении от системы параллельных плоскостей

# Применение холестерических жидких кристаллов

Изменение цвета холестерического жидкого кристалла при изменении температуры называют **термохромным эффектом**. На основе этого эффекта созданы чувствительные **пленочные жидкокристаллические датчики температуры**, предназначенные для использования в медицине и технике. Точность измерений достигает 3...5 К в диапазоне температур -40...+250 °С. **Цветовые термоиндикаторы** позволяют получить картину теплового поля в виде цветовой диаграммы.



Спасибо за внимание!

