


Электрические свойства 2

A decorative graphic consisting of several horizontal lines of varying lengths and colors (teal, white, and light blue) extending across the width of the slide below the title.

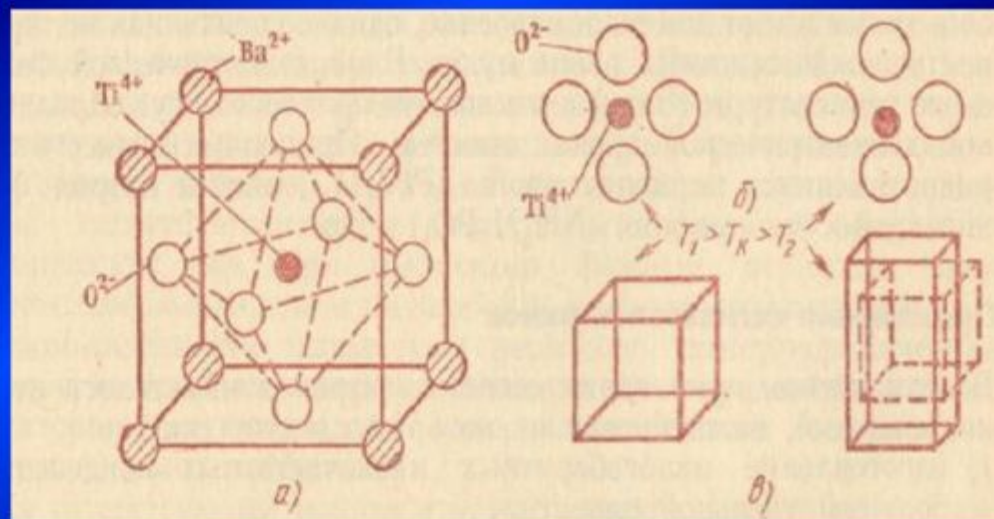


- **Сегнетоэлектрики** – материалы, способные изменять сопротивление при наложении электрического поля.
- **Сегнетоэлектрические материалы** включают подгруппы пьезоэлектрических и пиро-электрических материалов.
- **Пьезоэлектрики** – материалы, способные изменять сопротивление при наложении механической нагрузки.
- **Пироэлектрики** – материалы, способные изменять сопротивление при изменении температуры.



Атомная структура сегнетоэлектрика и ее изменений при фазовых переходах на примере титаната бария (BaTiO_3) .

- А) Кристаллическая структура типа перовскит в (BaTiO_3) –
- при температуре выше
- 120°C (точка Кюри).
- Б) Представлено нарушение кубической симметрии в расположении заряженных частиц, при температуре
- ниже $T_K = 120^\circ\text{C}$, при этом элементарная ячейка приобретает электрический момент .





Доменная природа сегнетоэлектриков

Схема расположения доменов в кристалле титаната бария тетрагональной модификации.

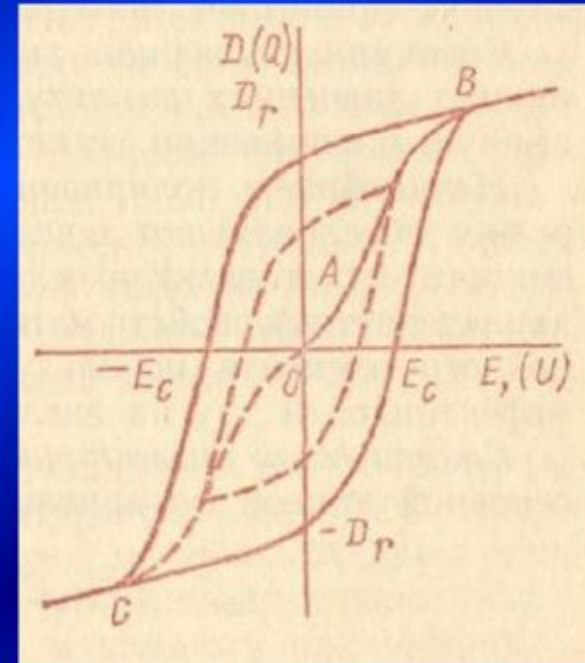


Направления электрических моментов у разных доменов различно.



Основная кривая поляризации сегнетоэлектрика и петля диэлектрического гистерезиса

- Поляризация P определяется как дипольный момент на единицу объема, и численно равна заряду на единицу поверхности кристалла, если последняя перпендикулярна вектору P . Поэтому P часто выражают в микрокулонах на квадратный сантиметр ($\text{мкк}/\text{см}^2$).



При воздействии слабого электрического поля связь между D и E носит приблизительно линейный характер (участок $O A$).



• Сегнетоэлектрики обладают многими полезными свойствами:

- Высокая, зависящая от внешнего электрического поля, диэлектрическая проницаемость.
- **Статические** - определяется по основной кривой поляризации сегнетоэлектрика:

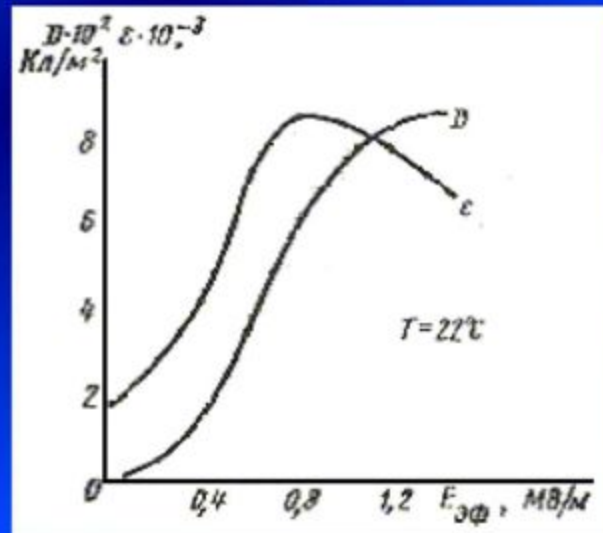
$$\epsilon_{ст} = D/(\epsilon_0 E) = 1 + P/(\epsilon_0 E) \sim P/(\epsilon_0 E),$$

- **Реверсивная** характеризует изменение поляризации сегнетоэлектрика переменном электрическом поле при одновременном воздействии постоянного поля обратимая поляризация.
- «аномальные» свойства и нелинейности.
- Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.
- Пирозлектрический эффект.



- Статическая диэлектрическая проницаемость определяется по основной кривой поляризации сегнетоэлектрика:

$$\epsilon_{ст} = D/(\epsilon_0 E) = 1 + P/(\epsilon_0 E) \sim P/(\epsilon_0 E),$$



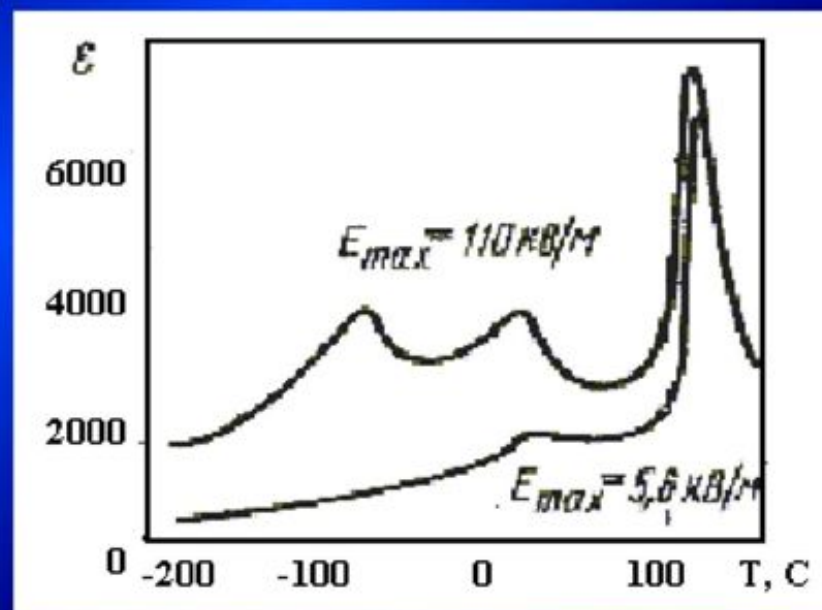
Зависимости электрической индукции D и статической диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности электрического поля.



Диэлектрическая проницаемость.

- Эффективную диэлектрическую проницаемость, как и эффективную емкость конденсатора, определяют по действующему значению тока (несинусоидального), проходящего в цепи с нелинейным элементом при заданном действующем напряжении V с угловой частотой:
- Диэлектрическая проницаемость титаната бария в зависимости от температуры при различной напряженности электрического поля

$$\varepsilon_{эф} \sim C_{эф} = I/(\omega U),$$

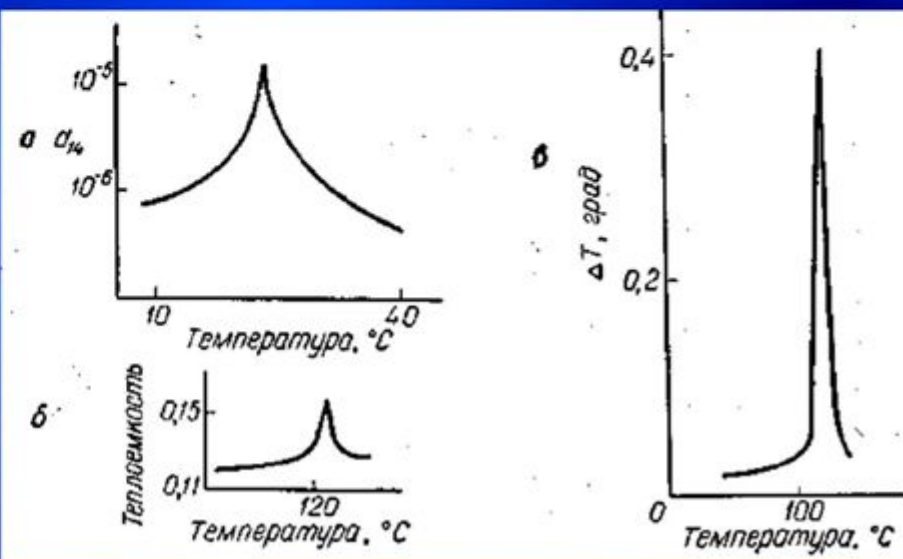




- **Температура Кюри (T_c)** - температура перехода в спонтанно поляризованное состояние (точка Кюри) у различных сегнетоэлектриков составляет от нескольких Кельвинов (например, у $Pb_2Nb_2O_7$ $T_k = 15$ K) до полутора тысяч Кельвинов (например, у $LiNbO_3$ $T_k = 1483$ K), а спонтанная поляризованность – от 0.0001 до 3 Кл/м²)

Аномалии свойств сегнетоэлектриков:

- а — аномалия пьезоэлектрического коэффициента для сегнетовой соли;
- б — аномалия теплоемкости при сегнетоэлектрическом переходе в титанате бария (в кал/г-град);
- в — аномалия электрокалорического коэффициента для поликристаллического титаната бария.
- Вызывающее эффект поле составляет 7,5 кВ/см.





Некоторые виды сегнетоэлектриков и температуры их фазовых переходов представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Виды сегнетоэлектриков и температуры их фазовых переходов

Соединение	Температура фазовых переходов T °C	Соединение	Температура фазовых переходов T °C
BaTiO ₃	120, 0, 90	PbW _{1/2} Mg _{1/2} O ₃	38
PbTiO ₃	490	BaBi ₂ Nb ₂ O ₉	100 - 200
SrTiO ₃	260	SrBi ₂ Nb ₂ O ₉	430
CdTiO ₃	-223	CaBi ₂ Nb ₂ O ₉	575 – 650
PbZrO ₃	230	PbW _{1/2} Co _{1/2} O ₃	32
PbHfO ₃	213	PbBi ₂ Nb ₂ O ₉	526
KNbO ₃	225, -10	BiBi ₂ TiNbO ₉	600 – 650, 930
KTaO ₃	-260	PbBi ₂ Ta ₂ O ₉	430
NaNbO ₃	640, 370, 0	BaBi ₂ Ta ₂ O ₉	70 – 100



AgNbO_3	340	$\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$	310 – 335
BiFeO_3	850	$\text{CaBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$	550 – 600
$\text{PbNb}_{1/2}\text{Co}_{1/2}\text{O}_3$	10	$\text{BiBi}_2\text{TiTaO}_9$	870
$\text{PbNb}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}\text{O}_3$	110	$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$	675
$\text{PbNb}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}\text{O}_3$	20	$\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	375
$\text{PbNb}_{1/2}\text{Sc}_{1/2}\text{O}_3$	90	$\text{SrBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	530
$\text{PbNb}_{1/2}\text{In}_{1/2}\text{O}_3$	90	$\text{PbRe}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}\text{O}_3$	120
$\text{PbNb}_{1/2}\text{YB}_{1/2}\text{O}_3$	280	$\text{PbBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	570
$\text{PbNb}_{1/2}\text{Lu}_{1/2}\text{O}_3$	280	$\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{4.5}\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	655
$\text{PbNb}_{1/2}\text{Ho}_{1/2}\text{O}_3$	240	$\text{K}_{1/2}\text{Bi}_{4.5}\text{Ti}_4\text{O}_{15}$	550
$\text{PbTa}_{1/2}\text{Fe}_{1/2}\text{O}_3$	-30	$\text{Bi}_5\text{GaTi}_3\text{O}_{15}$	670
$\text{PbTa}_{1/2}\text{Sc}_{1/2}\text{O}_3$	26	$\text{Ba}_2\text{Bi}_4\text{Ti}_5\text{O}_{18}$	329
$\text{PbTa}_{1/2}\text{Lu}_{1/2}\text{O}_3$	280	$\text{Sr}_2\text{Bi}_4\text{Ti}_5\text{O}_{18}$	285
$\text{PbTa}_{1/2}\text{Yb}_{1/2}\text{O}_3$	280	$\text{Pb}_2\text{Bi}_4\text{Ti}_5\text{O}_{18}$	310



- Наиболее эффективными материалами сегнето и пьезоэлектриков являются керамики и пленки
 - $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})\text{O}_3$ (PZT)
 - $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (PMN)

Для пленок титаната свинца найдено: $c/a=1.056$, $\epsilon_{20}=105-110$,
 $\text{tg } \alpha_{20} = 0,11 - 0,16$; $P_s = 4.1$ мкКл/см²; $E_c = 34$ кВ/см,

$\rho = (0,8-3) \cdot 10^9$ Ом см.; $U_{\text{пр}} = 50 - 100$ кВ/см.

- ток утечки не превышает 10^{-8} А/см² при 300 кВ/см и частоте 100 Гц
- остаточная поляризация составила 5,1 мкс/см²,
- коэрцитивное электрическое поле 70 кВ/см.



• Сегнетоэлектрики $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$

- Свойства материалов сильно зависят от содержания компонентов. диэлектрическая проницаемость меняется от 200 до 600, $\text{tg } \alpha = 0,025 - 0,050$.
- **Оптимальные параметры** ($\text{max } \epsilon$ и $\text{min } \text{tg } \alpha$) получены для значения $x = 0,5$.
- Диэлектрическая проницаемость тонких пленок $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$, составила 1800,
- спонтанная поляризация – $39,2 \cdot 10^{-2}$ Кл/м²,
- остаточная поляризация – $18,4 \cdot 10^{-2}$ Кл/м²,
- коэрцитивное поле – $59,9 \cdot 10^{-5}$ В/м,
- пьезомодуль $d_{31} = 30,0 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.
- Относительная диэлектрическая постоянная PZT пленки толщиной 12 мкм изменялась от 1100 до 1400 при 10000Гц и 100Гц, а значения остаточной поляризации и коэрцитивной силы составили соответственно 367 мкКл/ 54,5 кВ/см.
- Поэтому можно сделать вывод о том, что свойства материалов определяются технологией их получения.



Качество пьезоэлектрического материала принято характеризовать приведенным физическим параметром

$$R_E = \rho / (\epsilon C),$$

Где ϵ — диэлектрическая проницаемость;

C — удельная объемная теплоемкость.

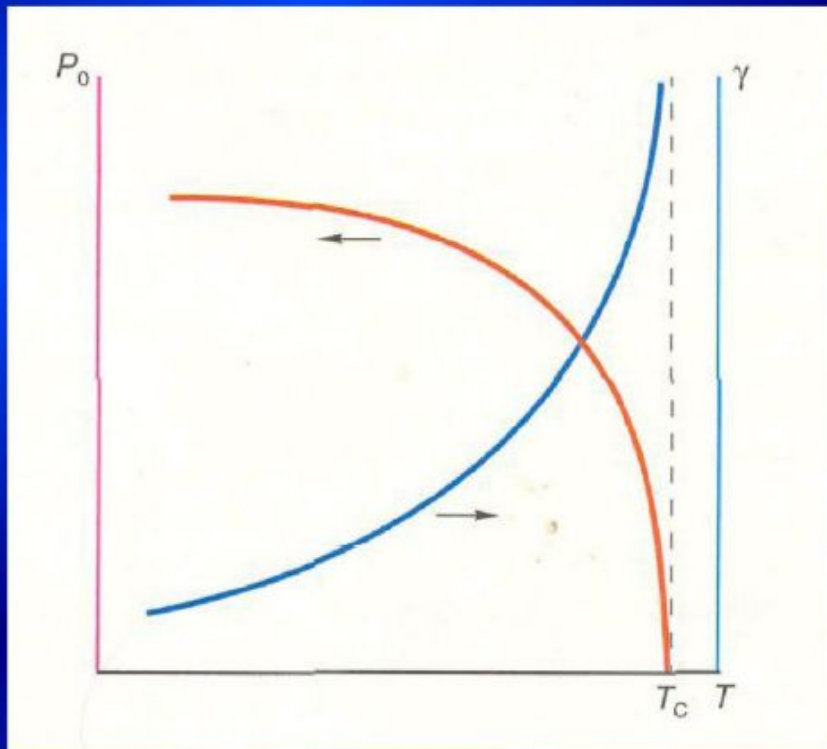
Появление так называемого деполяризирующего поля $E_{деп}$, приводит к появлению дополнительной положительной энергии ($W_{деп}$).

$$W_{деп} = \frac{1}{2} \int \mathbf{D} E_{деп} dV,$$

где \mathbf{D} — вектор электрической индукции и интеграл берется по всему пространству.



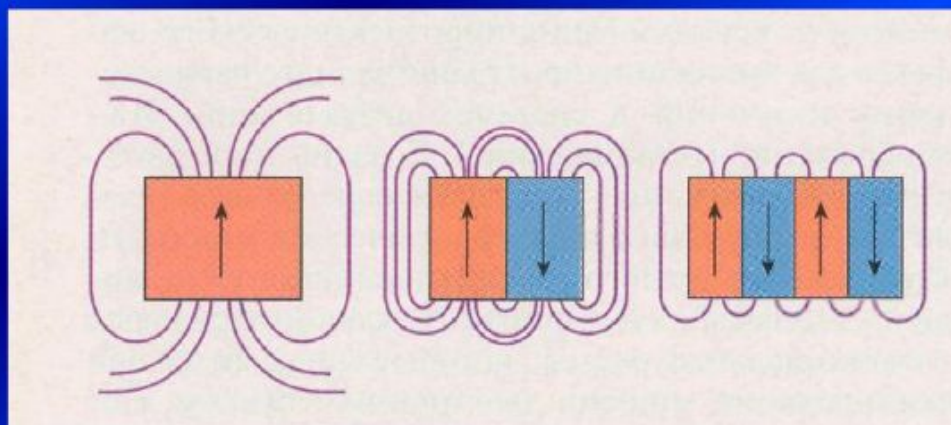
Температурная зависимость спонтанной поляризации (T_c) и пьезоэлектрического коэффициента (P_0) в сегнетоэлектрическом кристалле.



Известные линейные пьезоэлектрики, спонтанная поляризация в которых существует во всей области существования кристаллической фазы вплоть до температуры плавления, имеют весьма низкие значения пьезоэлектрического коэффициента порядка 10^{-5} - 10^{-4} Кл/(м² ■ К). Поэтому вопрос о практическом применении пьезоэлектриков не вставал, пока не появились сегнетоэлектрические кристаллы (см. [1]), у которых спонтанная поляризация возникает при некоторой определенной температуре и сравнительно быстро увеличивается при ее понижении.



При разбиении кристалла на домены происходит уменьшение положительной энергии, поскольку пространственная протяженность электрического поля уменьшается вследствие замыкания электрических силовых линий непосредственно вблизи поверхности кристалла



Процесс разбиения кристалла на домены заканчивается, когда уменьшение энергии электрического поля скомпенсируется положительным вкладом энергии доменных границ — пограничных слоев между доменами.



- 1) Кристаллы LiNbO_3 и LiTaO_3 - стабильность пьезоэлектрических свойств.
- 2) Пленки PbTiO_3 , LiNbO_3 , LiTaO_3 , KNbO_3 , KTaO_3 , $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ используются в пьезоэлектрических детекторах.
- 3) Керамические материалы на основе твердых растворов:
 $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3\text{-PbSb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3\text{-PbW}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}\text{O}_3$
(система I)
и $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3\text{-PbSb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3\text{-PbNb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3$
(система II)

характеризуются высоким показателем качества, что делает их перспективными для использования в качестве пьезоэлектрических детекторов.

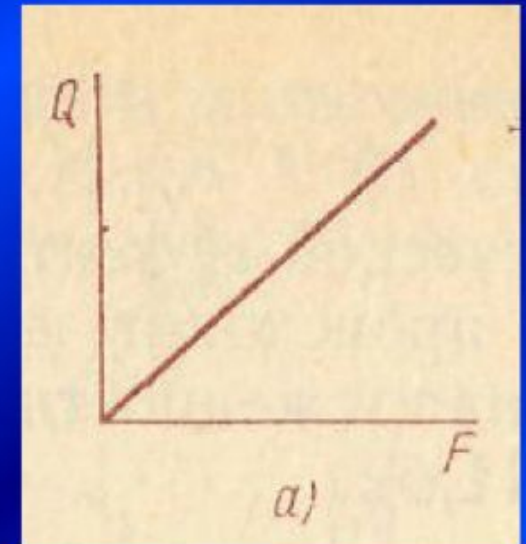


- Пирозлектрическими свойствами обладают некоторые линейные диэлектрики (например, **турмалин, сульфат лития**) и **все сегнетоэлектрические материалы**.
- Сегнетоэлектрики проявляют пирозлектрические свойства только **в монокристаллическом состоянии**, для которого характерна одинаковая ориентация спонтанной поляризованности всех доменов. **Монокристаллизация сегнетоэлектрика осуществляется** путем выдержки его в постоянном электрическом поле при температуре несколько ниже точки Кюри.
- Наиболее высоким значением $R = (8,5-10-12 \text{ м/В})$ обладают **кристаллы триглицинсульфата**. При комнатной температуре пирозлектрический коэффициент в кристаллах триглицинсульфата (ТГС) составляет $360 \text{ мкКл/м}^2\text{К}$.
- **$\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{NbO}_6$** считается одним из лучших пирозлектриков. Оптимальная толщина пленки составляет 4–8 мкм.



$$Q = dF; \quad Q/S = dF/S = q_s = P = d\sigma,$$

где Q — заряд; d — пьезомодуль; F — сила; S — площадь; q_s — заряд, который приходится на единицу площади; P — поляризованность;



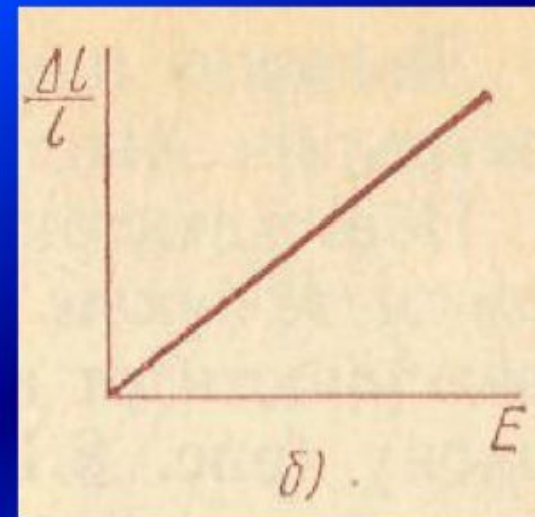
Линейная зависимость электрического заряда от приложенных механических усилий.



При обратном пьезоэлектрическом эффекте происходит изменение размеров диэлектрика Δ/l в зависимости от напряженности электрического поля E по линейному закону :

$$\Delta/l = \delta = dE,$$

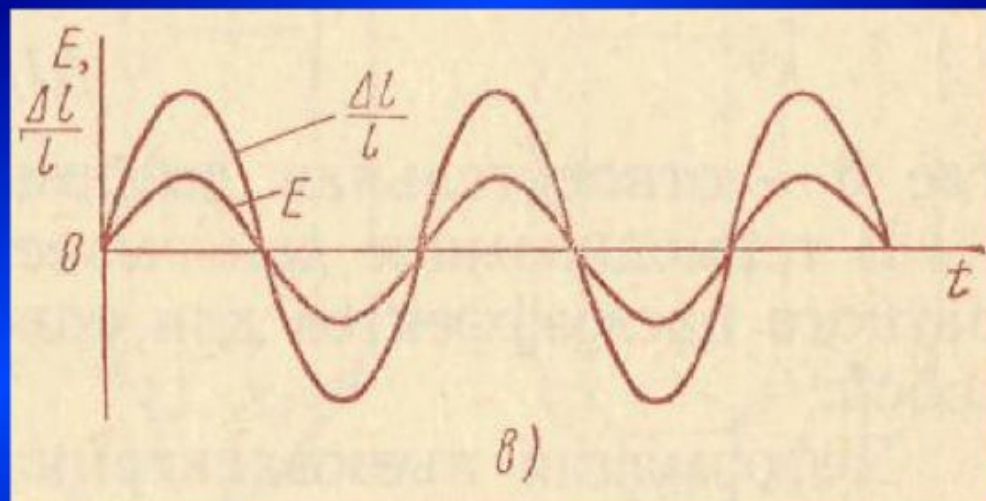
- где δ — относительная деформация.
- Линейная зависимость изменения размеров диэлектрика в зависимости от напряженности электрического поля .





Зависимость вида деформации от направления приложенного к нему электрического поля.

Здесь показано, что при приложении к пьезоэлектрику синусоидального электрического поля у него возникают синусоидальные деформации той же частоты.

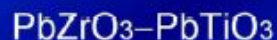
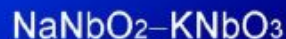
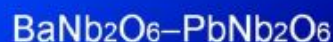




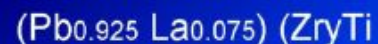
Материалы пьезоэлектриков

1) Керамика

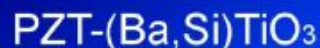
твердые растворы:



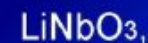
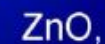
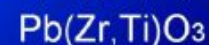
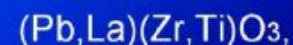
Керамики состава



2) Модифицированный КОМПОЗИТ

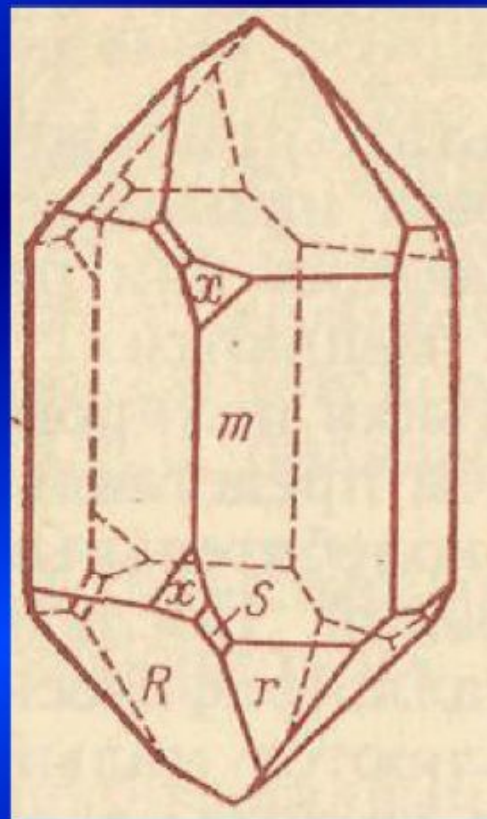


3) Тонкие пленки





Идеальная форма кристалла кварца.
 $\text{PbZrO}_3\text{—PbTiO}_3$





• Пьезотрансформаторы.

- Их обычно выполняют в виде пластины или бруска, одна половина которого (возбудитель колебаний) поляризуется по толщине, а другая половина (генератор) — по длине бруска

Схема высоковольтного пьезоэлектрического трансформатора

(стрелки указывают направление остаточной поляризованности)

Трансформаторы могут быть сконструированы для работы в диапазоне частот 10—500 кГц.

