

## 2.9. Пьезо и сегнетоэлектричество.

Сивухин Д.В. том 3 (§§ 37,39)

Матвеев том 3 (§§ 23,24)

### 2.9.1. Пьезоэлектрики.

При механическом растяжении и сжатии ряда кристаллов в определенных направлениях возникает поляризация: на поверхности образцов появляются заряды. Это явление имеет название *прямого пьезоэлектрического эффекта*. Его обнаружили братья Пьер и Жак Кюри в 1880г.

Пьезоэлектрическими свойствами могут обладать только *ионные кристаллы*. Примеры: кварц, турмалин, сегнетова соль, титанат бария, хлорат натрия и другие кристаллы. При воздействии внешних сил кристаллические решетки положительных и отрицательных ионов деформируются по-разному и в результате в противоположных местах на поверхности кристалла выступают электрические заряды разных знаков.

Поясним механизм проявления эффекта на примере кварца –  $\text{SiO}_2$ . На рисунке 9.1 представлена упрощенная модель кристаллической ячейки кварца, которая просматривается вдоль оптической оси кристалла. Ионы кремния  $\text{Si}^{+2}$  изображены розовыми большими шариками. Два иона кислорода  $\text{O}^-$  объединены и показаны одним голубым шариком (более сложная модель, когда ионы кремния расположены по спирали, в силу чего получается “левый” и “правый” кварц в зависимости от направления спирали). В целом ячейка электрически нейтральна и не имеет электрического дипольного момента.

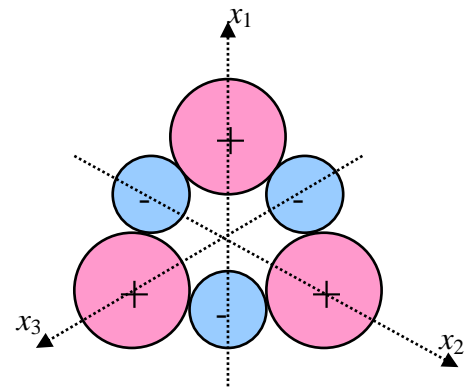


Рис. 9.1.

При сжатии вдоль оси  $x_1$  (перпендикулярно оптической оси, см рис. 9.1 и 9.2.) появляется дипольный момент, направленный в противоположную сторону направления полярной оси  $x_1$ . На верхней плоскости появляется отрицательный заряд, а на нижней плоскости – положительный. Получаем *продольный пьезоэлектрический эффект*.

При сжатии в поперечном направлении, перпендикулярном к оси  $x_1$  и оптической оси, происходит другое смещение ионов. Это приводит к появлению положительных зарядов на верхней плоскости, и

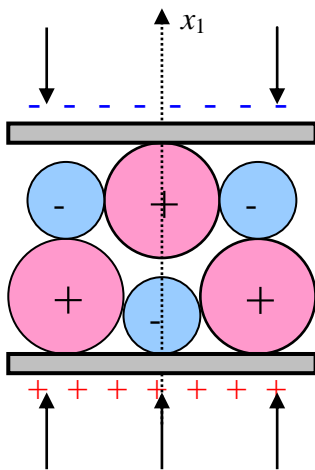


Рис. 9.2.

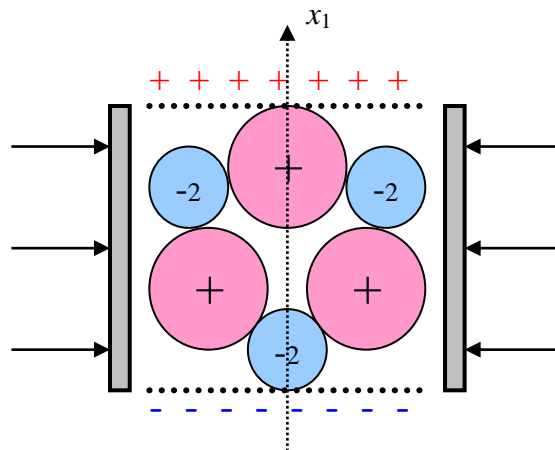


Рис. 9.3.

отрицательных зарядов – на нижней (рис. 9.3). В этом случае получаем *поперечный пьезоэлектрический эффект*. Замена сжатия растяжением приводит к изменению знака электрических зарядов на плоскостях.

В 1881 году Г. Липпман предсказал существование, а братья Кюри экспериментально подтвердили, *обратного пьезоэлектрического эффекта*. При внесении кристалла в электрическое поле в кристалле возникают механические напряжения, и кристалл деформируется.

У части пьезоэлектриков решетка положительных ионов смещена относительно решетки отрицательных ионов в состоянии термодинамического равновесия. В результате эти кристаллы при определенных конечных температурах оказываются электрически поляризованными даже в отсутствии электрического поля и механических напряжений. В таких случаях говорят, возникает *спонтанная*

**поляризация.** Это так называемые **пироэлектрические** кристаллы (“пир” – огонь). Обычно эффект спонтанной поляризации замаскирован свободными поверхностными зарядами, поэтому эффект смещения решеток выявляется при нагревании кристаллов. Иначе говоря, появление электрического поля наблюдается при нагревании кристалла, пока свободные заряды не успевают его компенсировать. Это явление называется **пироэлектрическим эффектом** или пироэлектричеством. Наиболее известный пример пироэлектрика – турмалин.

Помимо прямого существует и обратный пироэлектрический эффект, состоящий в том, что изменение электрического поля сопровождается изменением температуры пироэлектрика. Наблюдать этот эффект можно в адиабатическом процессе, когда нет отвода или подвода тепла.

Изменение спонтанной поляризации и появление электрического поля в пироэлектриках может происходить не только при изменении температуры, но и при деформировании. Таким образом, все пироэлектрики являются пьезоэлектриками, но не все пьезоэлектрики обладают пироэлектрическим эффектом. Ниже определенной температуры – точки Кюри – пироэлектрики являются **сегнетоэлектриками**.

### 2.9.2. Сегнетоэлектрики.

**Сегнетоэлектриками** называются некоторые диэлектрические кристаллы со **спонтанно поляризованными** областями, т.е. наличие поляризации в отсутствие внешнего электрического поля, в определенной области температур. Таким образом, они являются пироэлектриками в этой области температур, но при этом на границах температурной области они испытывают фазовые превращения, переходя в новые кристаллические модификации. Последние обычно не имеют спонтанной поляризации. Существуют и другие отличия сегнетоэлектриков от пироэлектриков. В частности, направление спонтанной поляризации сегнетоэлектрика может быть изменено на противоположное сравнительно слабым электрическим полем, что не наблюдается в пироэлектриках.

Итак, у сегнетоэлектриков существует как полярная фаза, т.е. кристаллическая модификация, в которой имеется спонтанная поляризация, так и неполярная фаза. Переход из полярной фазы в неполярную происходит при температуре Кюри  $T_K$ . Наиболее популярные сегнетоэлектрики: сегнетова соль:  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , титанат бария:  $\text{BaTiO}_3$ . Последний обладает достаточно высокой температурой Кюри ( $T_K = 393 \text{ K}$ ) высокой механической прочностью, большой химической устойчивостью, благодаря чему получил широкое применение.

Диэлектрические свойства сегнетоэлектриков во многих отношениях аналогичны магнитным свойствам ферромагнетиков, в связи с этим их часто называют ферроэлектриками. В сегнетоэлектриках имеются области спонтанной поляризации – **доменная** структура. Области спонтанной поляризации – домены – образуются исходя из минимума свободной энергии. Это также следует из общих принципов термодинамического равновесия.

Полная энергия кристалла сегнетоэлектрика складывается из трех частей:

- 1) суммы внутренних энергий всех доменов,
- 2) энергии внешнего электрического поля,
- 3) поверхностной энергии на границах раздела доменов.

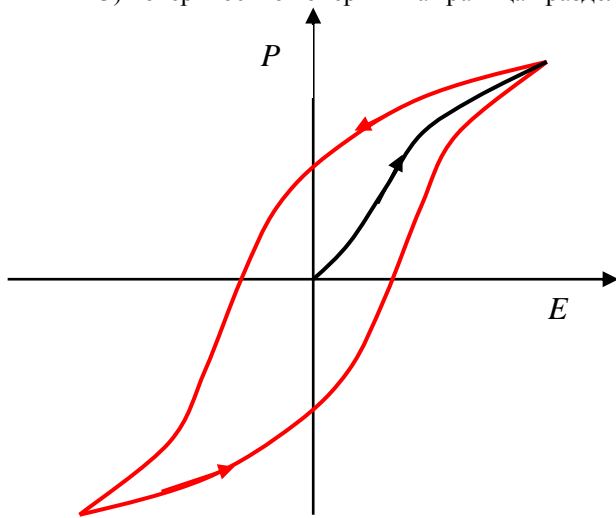


Рис. 9.4.

Равновесное состояние при данной температуре достигается, когда полная энергия достигает минимума. В соседних доменах направление вектора спонтанной поляризации различно, а величина — одинакова. В сегнетоэлектриках домены имеют размеры  $10^{-5} — 10^{-3}$  см, а переходная область между ними (доменная граница, или стенка) имеет ширину  $\sim 10^{-7}$  см.

В неполярной фазе сегнетоэлектрик ведет себя как обычный линейный диэлектрик, в котором поляризация пропорциональна электрическому полю.

При переходе в полярную фазу диэлектрическая проницаемость для сегнетоэлектриков аномально велика и достигает  $\epsilon \sim 6000-7000$  для титаната бария,  $\epsilon \sim 10000$  в максимуме для сегнетовой соли. При наложении внешнего поля диэлектрическая проницаемость и поляризуемость меняются, они также изменяются с температурой. Вблизи точки Кюри имеет место закон Кюри - Вейсса:

$$\alpha = \frac{C}{T - T_0} \quad (2.9.1)$$

где  $C$  – постоянная,  $T_0$  – температура Кюри – Вейсса (мало отличается от температуры Кюри).

При наложении внешнего электрического поля происходит частичная переориентация доменов, а также рост одних доменов за счет других. Это приводит к появлению поляризации  $\vec{P}$  в кристалле. При изменении внешнего поля возникает явление *диэлектрического гистерезиса* (см рис. 9.4). Петля гистерезиса наблюдается в зависимости поляризации  $P$  от внешнего поля  $E$ :  $P = P(E)$ . При снятии внешнего поля остается поляризация сегнетоэлектрика отличная от нуля.

Аналогичные петли гистерезиса получаются, если рассматривать зависимость вектора электрической индукции от напряженности электрического поля  $D = D(E)$ .

---

Примечание 1. *Пьер Кюри, французский физик, 1859-1906, Нобелевская премия 1903 г. за исследования радиоактивности и открытие радия;*  
*Жак Кюри, французский минералог;*  
*Габриэль Липпман, французский физик, 1845-1921, Нобелевская премия 1908 г. за цветную фотографию солнечного спектра;*  
*Пьер Эрнест Вейсс, французский физик, 1865-1940.*

---