

---

# Введение в физические свойства твёрдых тел

---

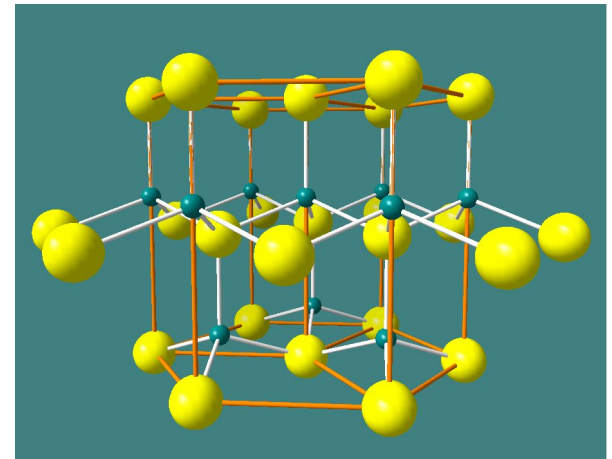
Лекция 9. Активные диэлектрики.  
Термоэлектрические явления

## Изучить материал, ответить на вопросы:

- В чём заключаются прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты?
- Как наблюдается пьезоэлектрический эффект?
- Что такое пьезоэлектрические модули? Сколько их?
- Для чего используются пьезоэлектрики?
- Какие кристаллы называются пироэлектрическими? В чём заключается пироэлектрический эффект?
- Какими свойствами обладают сегнетоэлектрики?
- В чём заключается электретный эффект? Как он используется?
- Как получают электреты?
- Как возникает термоЭДС?
- Как используются пироэлектрический эффект и термоЭДС?
- Ответы прислать [zghasanova@phtt.ru](mailto:zghasanova@phtt.ru)

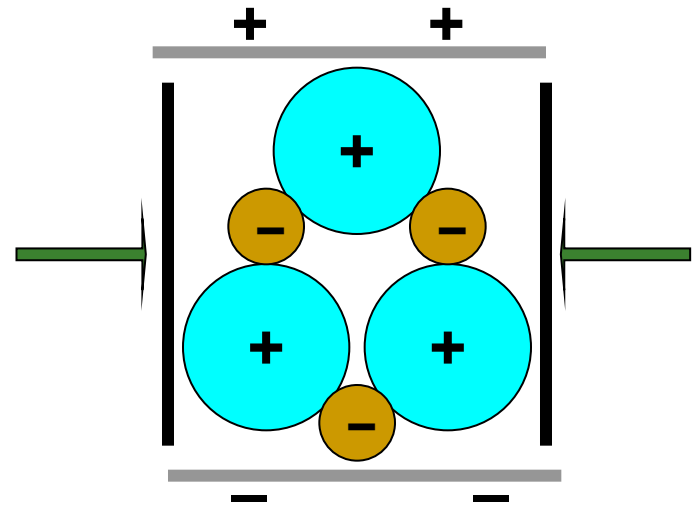
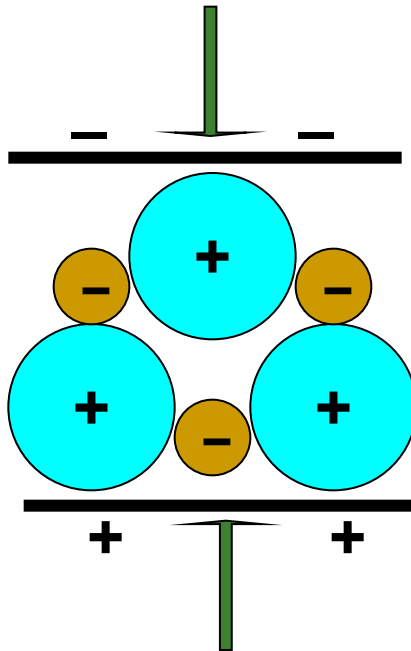
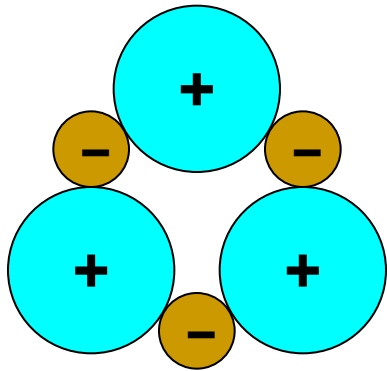
# Пьезоэлектричество

- В некоторых кристаллах возникает электрическая поляризация при растяжении и сжатии. Это проявление **прямого пьезоэлектрического эффекта**
- Пьезоэлектрическими свойствами могут обладать только ионные кристаллы не имеющие центра симметрии



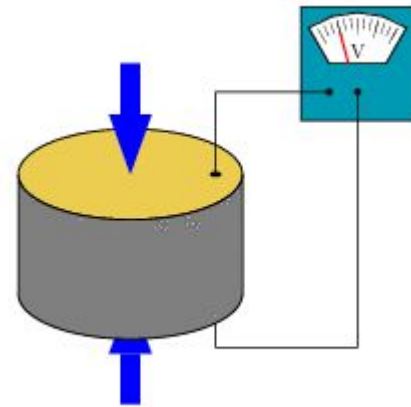
ZnO со структурой вюрцита

# Пьезоэлектричество



# Пьезоэлектричество

- Чтобы использовать поляризационные заряды, на противоположные грани пьезоэлектрической пластинки наносят металлические электроды, на которых индуцируются заряды, противоположные поляризационным. При этом во внешней цепи возникает электрический ток



# Пьезоэлектричество

- Уравнение пьезоэлектрического эффекта связывает линейной зависимостью вектор поляризации  $\mathbf{P}$  и тензор напряжения  $\sigma_{jk}$ :

$$P_i = d_{ijk} \sigma_{jk}$$

- $d_{ijk}$  – пьезоэлектрические модули, составляющие тензор третьего ранга
- Всего 27 компонент, 18 - независимых
- Возможны и другие представления пьезоэлектрического эффекта

# Пьезоэлектричество

- **Обратный пьезоэлектрический эффект** состоит в том, что при внесении пьезоэлектрического кристалла в электрическое поле в кристалле возникают механические напряжения, под действием которых кристалл деформируется
- Оказывается, что те же самые коэффициенты, которые связывают поляризацию и напряжение в прямом эффекте, связывают поле и деформацию в обратном эффекте:  $\epsilon_{jk} = d_{ijk} E_i$

---

# Пьезоэлектричество

- Наиболее известные пьезоэлектрики: кварц, сегнетова соль, титанат бария и др.
- Пьезоэлектрики используются в технике для изготовления пьезоэлектрических стабилизаторов и фильтров, датчиков вибрации и давления, звукоснимателей, микрофонов, телефонов, излучателей ультразвука и т.д.



# Пироэлектричество

- У некоторых пьезоэлектрических кристаллов решётка положительных ионов в состоянии термодинамического равновесия смещена относительно решётки отрицательных ионов таким образом, что кристаллы оказываются электрически поляризованными даже в отсутствие электрического поля. Такая поляризация называется спонтанной, а кристаллы - **пироэлектрическими**

# Пироэлектричество

- В обычных условиях поляризационные заряды скомпенсированы свободными поверхностными зарядами, осевшими из атмосферы или диффундировавшими из объёма. Однако при нагревании баланс нарушается и на поверхностях появляются поляризационные заряды. Возникновение таких зарядов называется **прямым пироэлектрическим эффектом**

# Пироэлектричество

- Пироэлектрический эффект можно описать формулой:

$$\Delta P_i = \gamma_i \Delta T,$$

где  $\Delta P$  – изменение величины поляризации диэлектрика;  $\gamma_i$  – пироэлектрические коэффициенты;  $\Delta T$  – изменение температуры диэлектрика

- Типичные значения  $\gamma$   $10^{-5}$ – $10^{-4}$  Кл/(м<sup>2</sup>·К)

---

# Пироэлектричество

- К наиболее известным природным пироэлектрикам относится турмалин
- Появления пироэлектрических свойств можно добиться у сегнетоэлектриков: триглицинсульфата; ниобата и танталата лития; титаната свинца и др.

---

# Пироэлектричество

- При нагревании происходит деформация, которая может сопровождаться пьезоэлектрическим эффектом, который обычно превышает первичный пироэлектрический эффект. Такая электризация называется **вторичным пироэлектрическим эффектом**

# Пироэлектричество

- Поляризационные заряды могут возникать при неоднородном нагреве. Это **третичный (или ложный) пироэлектрический эффект**
- **Обратный пироэлектрический эффект** состоит в том, что изменение электрического поля в отсутствие теплообмена (адиабатический процесс) сопровождается изменением температуры кристалла

---

# Применение пирозлектриков

- Пирозлектрические материалы находят применение в качестве детекторов и приёмников излучения, датчиков теплометрических приборов
- Важной областью применения пирозлектриков является визуализация ИК-изображений

# Сегнетоэлектричество

- Некоторые диэлектрические кристаллы в определённой области температур, называемой полярной областью, являются пирозлектриками, т.е. спонтанно поляризованы в отсутствие поля. На границах этой области они испытывают фазовые превращения, переходя в состояния без спонтанной поляризации. Такие диэлектрики называются **сегнетоэлектриками**
- Все кристаллы в сегнетоэлектрическом состоянии являются пьезоэлектриками но не наоборот (например кварц)



# Сегнетоэлектричество

- В отличие от обычных пирозэлектриков, в сегнетоэлектриках состояние спонтанной поляризации может быть изменено на противоположное в относительно слабых электрических полях
- Температура  $T_K$ , при которой сегнетоэлектрик переходит из спонтанно поляризованного состояния в неполяризованное называется **диэлектрической точкой Кюри**

# Сегнетоэлектричество

- Как правило, сегнетоэлектрик имеет одну точку Кюри, ниже которой он находится в поляризованном (полярная фаза), а выше – в неполяризованном состоянии (неполярная фаза)
- Некоторые сегнетоэлектрики, например сегнетова соль, имеют две точки Кюри: нижнюю и верхнюю. Спонтанная поляризация наблюдается в области между нижней и верхней точками Кюри

# Сегнетоэлектричество

- Наиболее известные сегнетоэлектрики: сегнетова соль  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  и титанат бария  $\text{BaTiO}_3$
- Поляризация сегнетоэлектрика складывается из спонтанной поляризации, не зависящей от внешнего поля, и индуцированной поляризации
- Связь между **P** и **E** у сегнетоэлектриков нелинейна

# Сегнетоэлектричество

- Особенностью сегнетоэлектриков является то, что значения их диэлектрической проницаемости в полярной фазе аномально велики
- Для сегнетовой соли в максимуме  $\epsilon \approx 10000$
- Для титаната бария  $\epsilon_{\text{макс}} \approx 6000-7000$
- В неполярной фазе сегнетоэлектрик ведёт себя как обычный линейный диэлектрик

# Сегнетоэлектричество

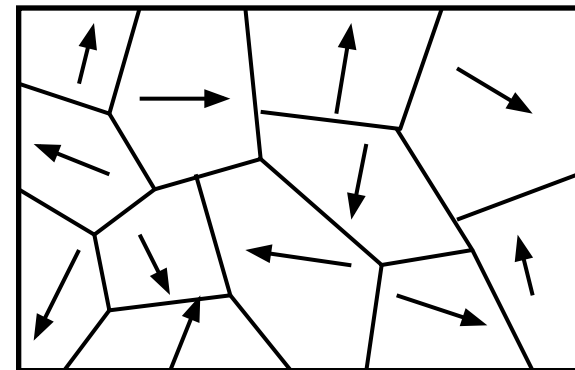
- Поляризуемость  $\alpha$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  сегнетоэлектрика зависят от температуры
- Вблизи точки Кюри выполняется закон Кюри-Вейсса:

$$\alpha = \frac{C}{T - T_0}$$

где  $C$  и  $T_0$  – постоянные.  $T_0$  – температура Кюри-Вейсса.  $T_0$  мало отличается от  $T_K$

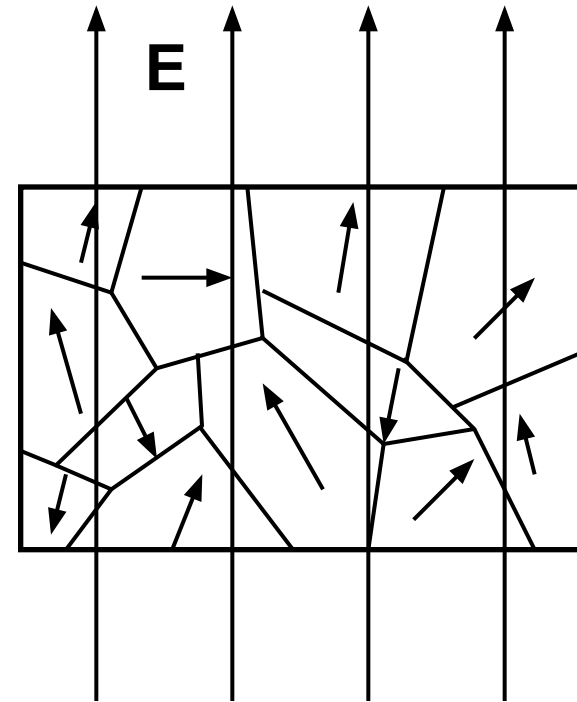
# Сегнетоэлектричество

- Сегнетоэлектрик состоит из спонтанно поляризованных в различных направлениях областей – **доменов**
- В отсутствие внешнего поля поляризация одних доменов компенсируется противоположно направленной поляризацией других доменов



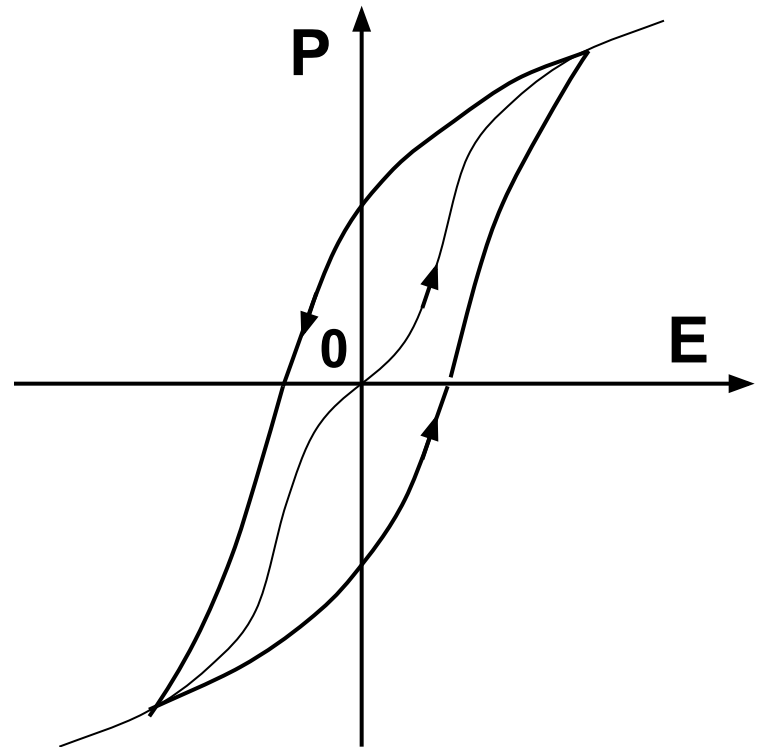
# Сегнетоэлектричество

- При приложении электрического поля происходит частичная переориентация доменов, а так же рост одних доменов за счёт других, это ведёт к появлению поляризации **P**



# Сегнетоэлектричество

- Зависимость  $P$  от  $E$  неоднозначна. Она зависит от истории образца. Это явление называется диэлектрическим гистерезисом и обусловлено доменной структурой диэлектрика





# Сегнетоэлектричество

- Остаточной поляризованностью сегнетоэлектрика называется поляризованность, сохраняющаяся после снятия внешнего электрического поля
- Коэрцитивной силой называется величина напряжённости электрического поля, в котором поляризованность сегнетоэлектрика становится равной нулю

---

# Электретный эффект

- Электретом называется диэлектрик в котором длительное время сохраняется поляризованное состояние
  - Органические электреты. Пчелиный и карнаубский воск, церезин, полимеры
  - Неорганические. Стёкла, сера, титанаты, галогениды
- Применяются в качестве мембран микрофонов, телефонов, датчиков различных устройств

# Электретный эффект

- Существуют различные способы получения электретов:
  - Нагревание и охлаждение в электрическом поле – термоэлектреты
  - Выдержка в сильном электрическом поле – электроэлектреты
  - Воздействие коронным разрядом – короноэлектреты
  - Освещение в электрическом поле – фотоэлектреты
  - Облучение электронами и ионами - радиоэлектреты

# Контактная разность потенциалов

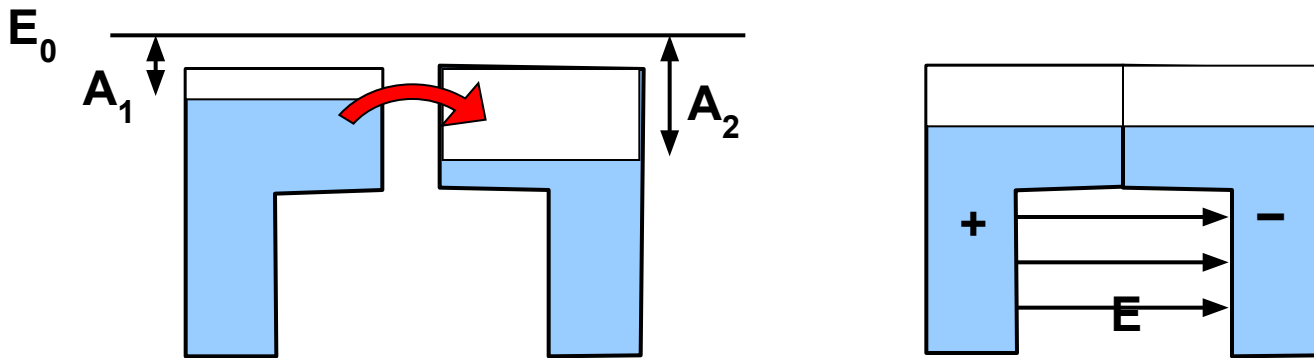
- При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает контактная разность потенциалов
- Причиной её появления является отличие **работы выхода электрона** из одного металла от работы выхода из другого металла

# Контактная разность потенциалов

- Работой выхода называется энергия, которую необходимо затратить на удаление электрона из проводника
- Работу выхода принято измерять в электрон-вольтах, эВ
- $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

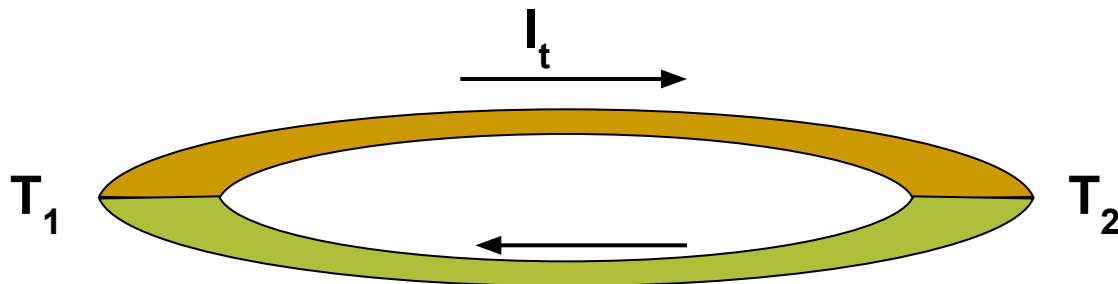
# Контактная разность потенциалов

- Электроны переходят из металла с меньшей работой выхода в металл с большей работой выхода. При этом происходит уменьшение полной энергии системы, первый металл заряжается отрицательно, а второй положительно



# ТермоЭДС

- Если температуры контактов двух проводников, различны, то в системе возникает термоэлектрический ток (**явление Зеебека**)



# ТермоЭДС

- Система, состоящая из двух контактов разнородных проводников, предназначенная для измерения температур, называется **термопарой**. Такая же система, предназначенная для преобразования тепловой энергии в электрическую, называется **термоэлементом**



# ТермоЭДС

- Полная термоЭДС термопары или термоэлемента складывается из ЭДС обоих спаев, которые, в свою очередь, определяются родом контактирующих металлов и температурой
- В простейшем случае термоЭДС является линейной функцией разности температур спаев:

$$E = \alpha(t_1 - t_2),$$

где  $\alpha$  - коэффициент термоЭДС

# ТермоЭДС

- Для металлов  $\alpha \sim 1 \div 100$  мкВ/град. Для полупроводников эта величина может превышать 1000 мкВ/град
- Эффект Пельтье заключается в выделении или поглощении тепла при прохождении электрического тока через контакт двух проводников

---

# Заключение

- Активные диэлектрики обладают рядом отличительных свойств
- Прямой и обратный пьезоэффекты связывают механические и электрические свойства диэлектрика
- Пироэлектрический эффект заключается в изменении поляризации диэлектрика при изменении температуры

---

# Заключение

- Сегнетоэлектрики обладают спонтанной поляризацией в некотором диапазоне температур
- Свойства сегнетоэлектриков обусловлены особенностями их кристаллического строения и наличием доменной структуры
- Электретный эффект заключается в длительном сохранении состояния поляризации диэлектрика

---

# Заключение

- К термоэлектрическим явлениям относятся возникновение контактной разности потенциалов, термоЭДС и эффект Пельтье
- Все рассмотренные явления имеют практическое применение

---

# Контрольные задания

- В чём причина возникновения контактной разности потенциалов?

---

# КОНЕЦ ЛЕКЦИИ

---