Saint-Petersburg State University

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

тема лекции:
Электрические, магнитные и оптические свойства

Гуржий В.В.

2021

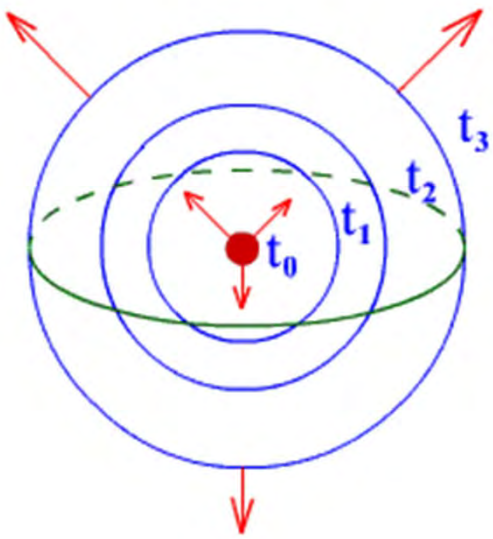
Оптические свойства кристаллов

Показатель преломления – отношение скорости распространения света в вакууме (на воздухе – $V_{вак} / V_{воздуха} = 1.0003$) к скорости распространения света в среде: $n_{среды} = V_{вак} / V_{среды}$

В изотропных средах (воздух, стекло, вода, …) свет распространяется во все стороны с одинаковой скоростью. То есть пути, пройденные светом во всех направлениях от источника за одно и то же время, равны между собой. Соединив концы этих путей получим поверхность в виде шара.

Оптические свойства кристаллов

Поверхность, до всех точек которой свет от источника доходит за одинаковое время называется волновой поверхностью или индикатрисой.

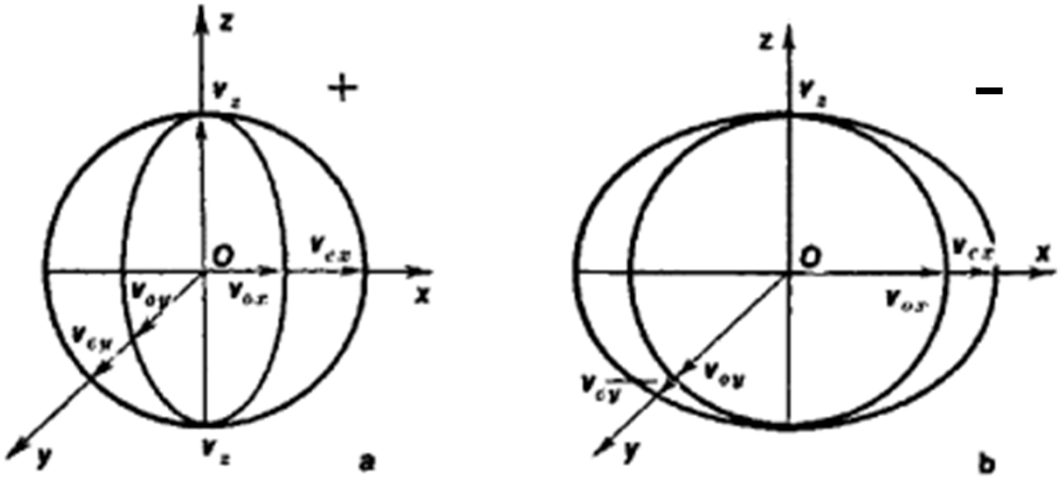


Кристаллы кубической сингонии (не имеющие единичных направлений) в оптическом отношении – изотропные тела.

Оптические свойства кристаллов

В кристаллах средних сингоний – тригональной, тетрагональной и гексагональной (имеющих одно единичное направление) – волновая поверхность – комбинация шара и эллипсоида, где длина оси вращения эллипсоида равна диаметру шара.

Единственное направление в кристалле, в котором скорости лучей *o* и *e* равны – оптическая ось



Луч *o* (обыкновенный) – сфера ;

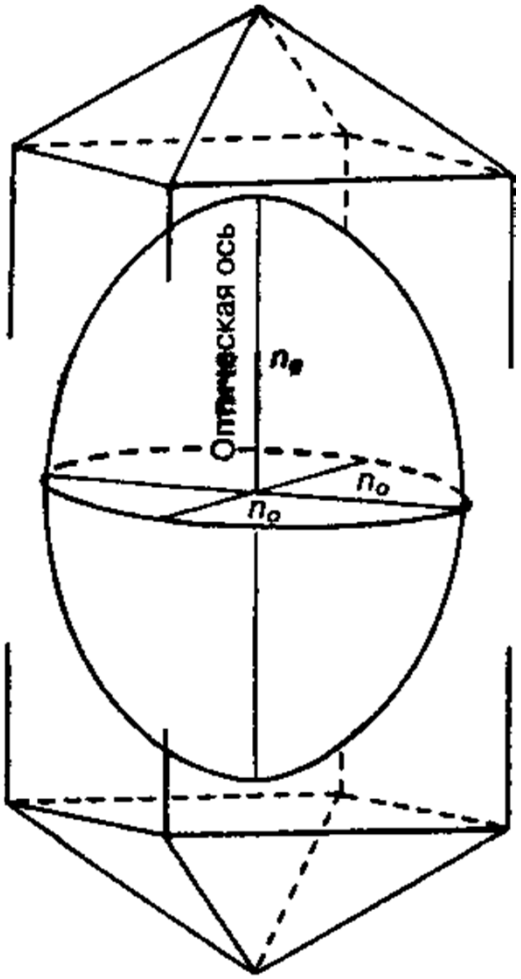
луч *e* (необыкновенный) - эллипсоид

Оптические свойства кристаллов

Кристаллы средней категории – оптически одноосны.

Луч света, идущий по оптической оси, не разбивается на два луча

В оптически отрицательных кристаллах – *Vo* < *Ve* ; в положительных – *Vo* > *Ve*



Вытянутый эллипсоид, положительный: $n_e > n_o$

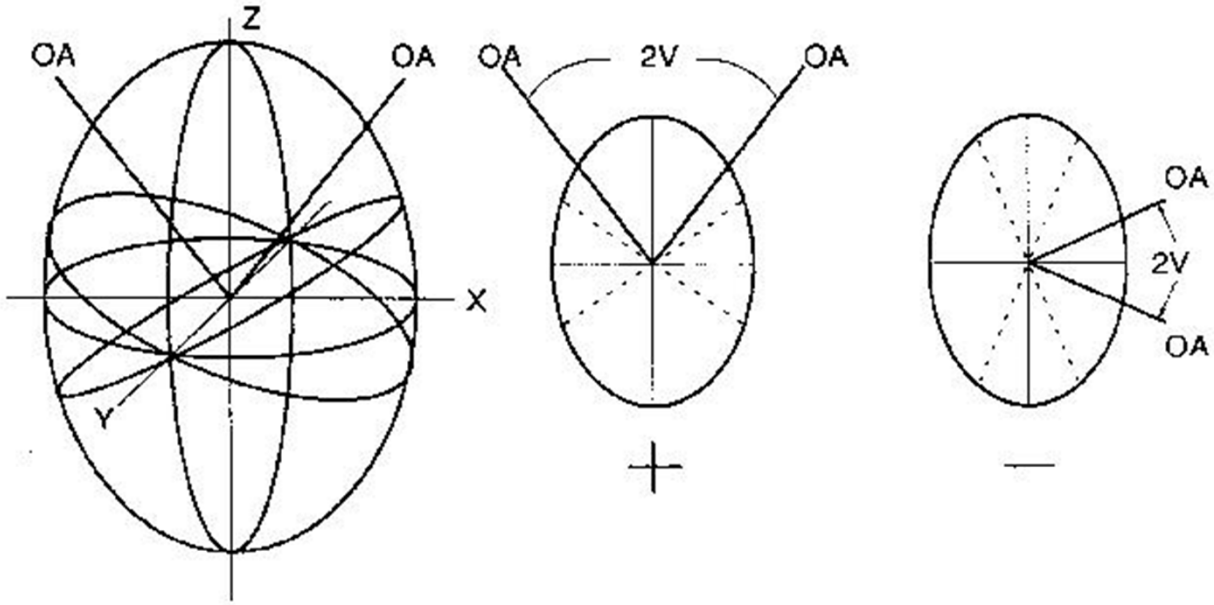
Луч *o* (обыкновенный) – сфера ;

луч *e* (необыкновенный) - эллипсоид

Оптические свойства кристаллов

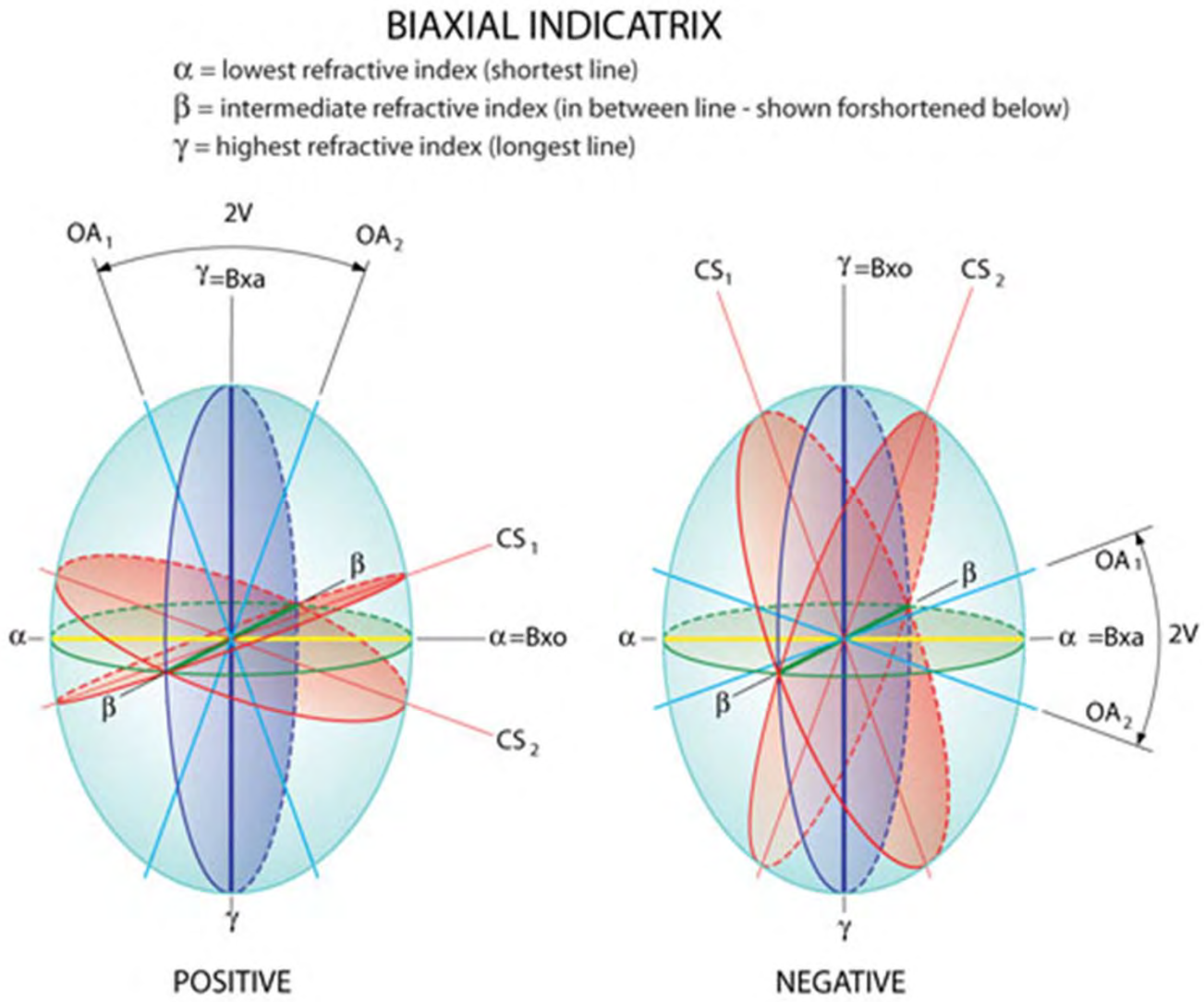
В кристаллах низших сингоний – ромбической, моноклинной и триклинной (имеющих не меньше трех единичных направлений) – волновая поверхность состоит из вложенных друг в друга эллиптических поверхностей. В таких кристаллах нет волны обыкновенной (имеющей форму шара), а следоввательно оба луча будут «необыкновенные».

Оптическая ось – перпендикуляр к круговому сечению



Кристаллы низшей категории – оптически двуосны

Оптические свойства кристаллов



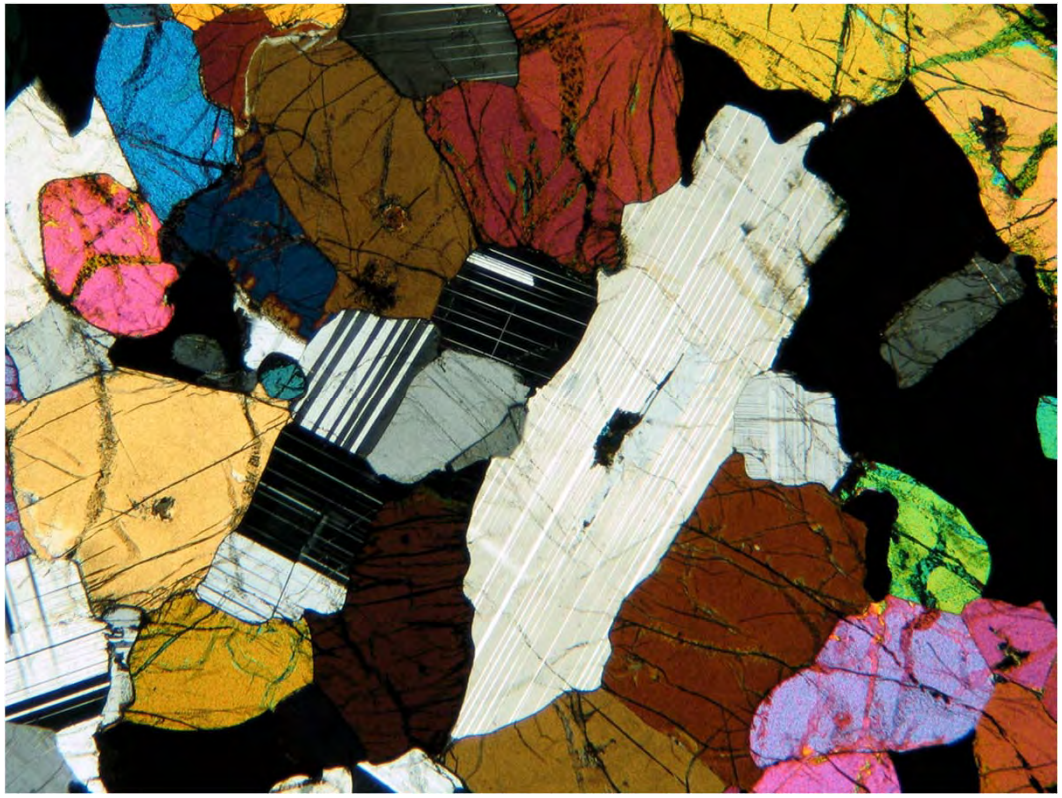
Индикатрисы оптических положительных и отрицательных двуосных кристаллов

Оптические свойства кристаллов

В свете, проходящем через кристалл и систему специальных линз (поляроидов или линз Николя), оптически анизотропные кристаллы обладают интерференционной окраской. Окраска тем ярче, чем выше сила двупреломления кристалла.

Силой двупреломления называется разность между наибольшим и наименьшим показателями преломления кристалла данного вещества:
$\Delta = d\ (n_g - n_p)$

d – толщина препарата.



Электрические свойства кристаллов

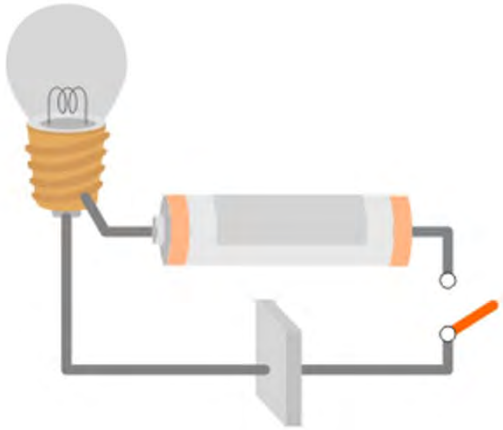
Электропроводность.

Кристаллы разделяются на проводники (проводящие электрический ток), полупроводники и диэлектрики (изоляторы)

В проводящих кристаллах есть заряженные частицы, которые могут свободно перемещаться. При помещении их в электрическое поле, возникает ток.

В монокристаллах коэффициент электропроводности описывается индикатрисой, соответствующей его симметрии

Проводники: металлы



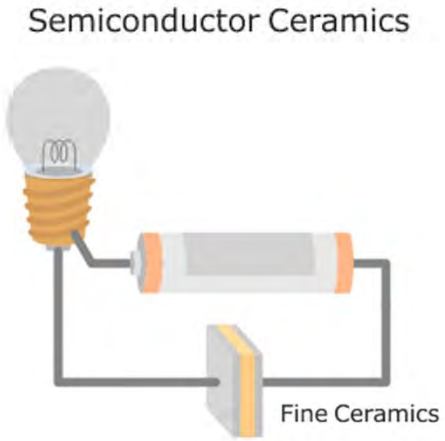
Электрические свойства кристаллов

Электропроводность.

Кристаллы разделяются на проводники (проводящие электрический ток), полупроводники и диэлектрики (изоляторы)

Полупроводники – основным свойством этих материалов является увеличение электрической проводимости с ростом температуры.

Обладают сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения.



Полупроводники: кремний, германий, алмаз, …

Электрические свойства кристаллов

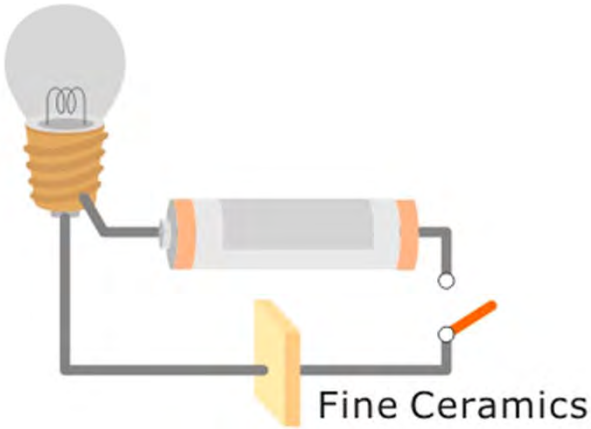
Электропроводность.

Кристаллы разделяются на проводники (проводящие электрический ток), полупроводники и диэлектрики (изоляторы)

Диэлектрики – вещества, плохо проводящие электрический ток.

Основное свойство диэлектрика состоит в способности поляризоваться во внешнем электрическом поле

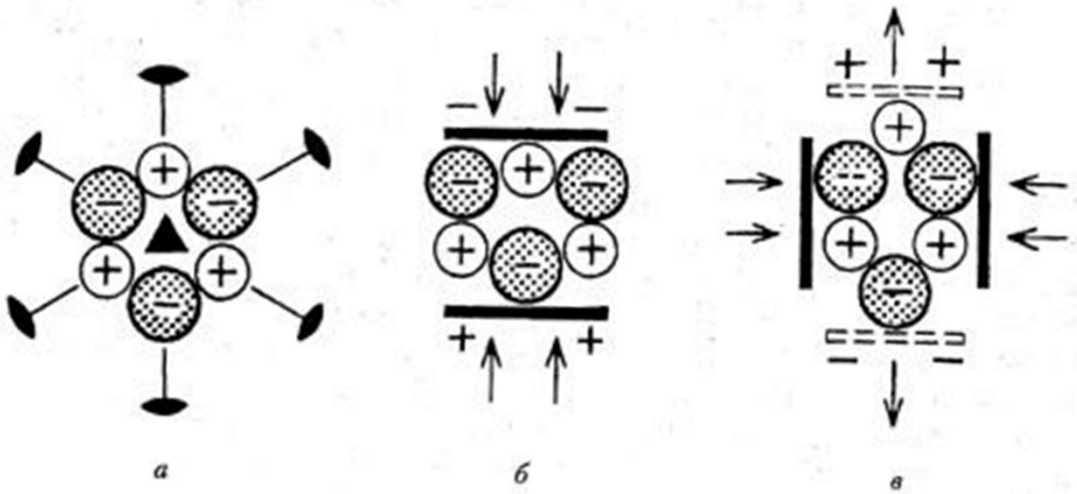
Ряд диэлектриков проявляют интересные свойства: пьезоэффект, пироэффект



Электрические свойства кристаллов

Пьезоэлектричество.

Возникновение электрической поляризации под действием механических напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект).



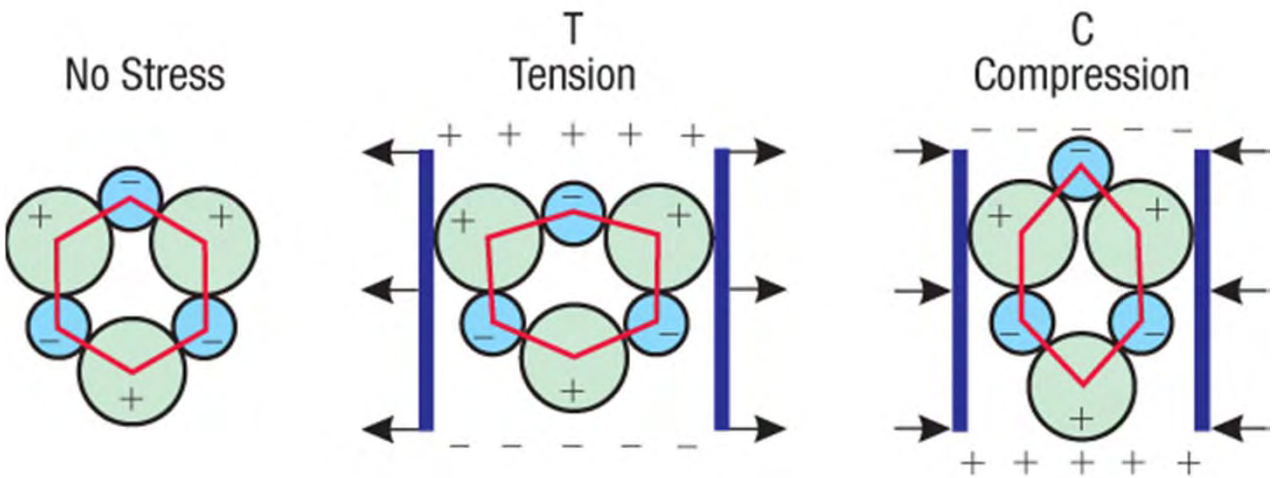
Пьезоэффект: кварц

Прямой эффект был открыт братьями Жаком и Пьером Кюри в 1880 г. Обратный эффект был предугадан в 1881 г. Габриэлем Липпманом исходя из термодинамических соображений. В том же году экспериментально открыт братьями Кюри.

Электрические свойства кристаллов

Пьезоэлектричество.

Обратный пьезоэлектрический эффект – возникновение механических деформаций под действием электрического поля

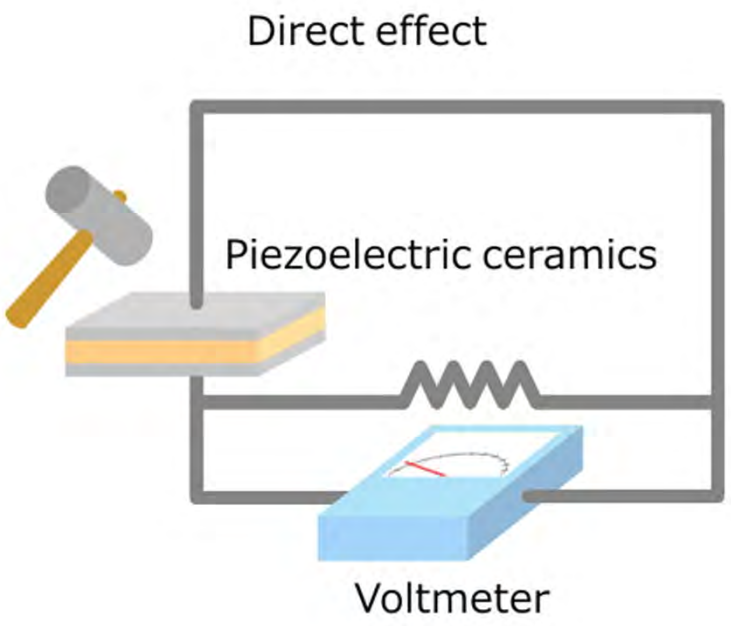


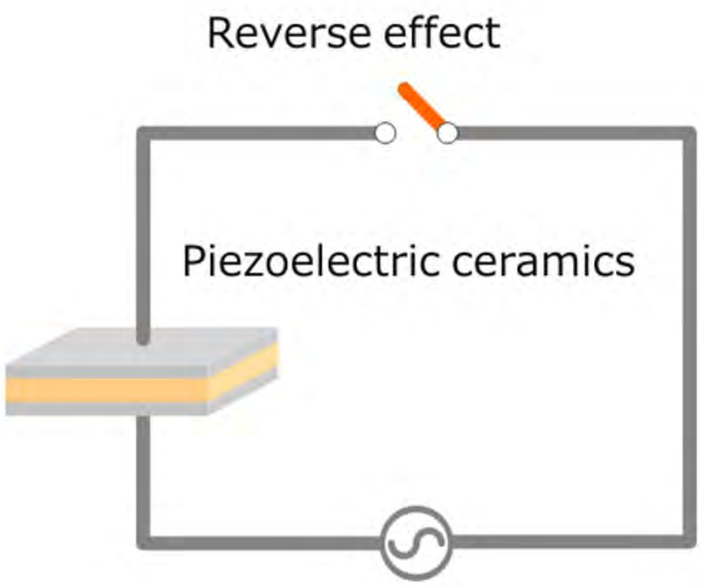
Пьезоэффект: кварц

Прямой эффект был открыт братьями Жаком и Пьером Кюри в 1880 г. Обратный эффект был предугадан в 1881 г. Габриэлем Липпманом исходя из термодинамических соображений. В том же году экспериментально открыт братьями Кюри.

Электрические свойства кристаллов

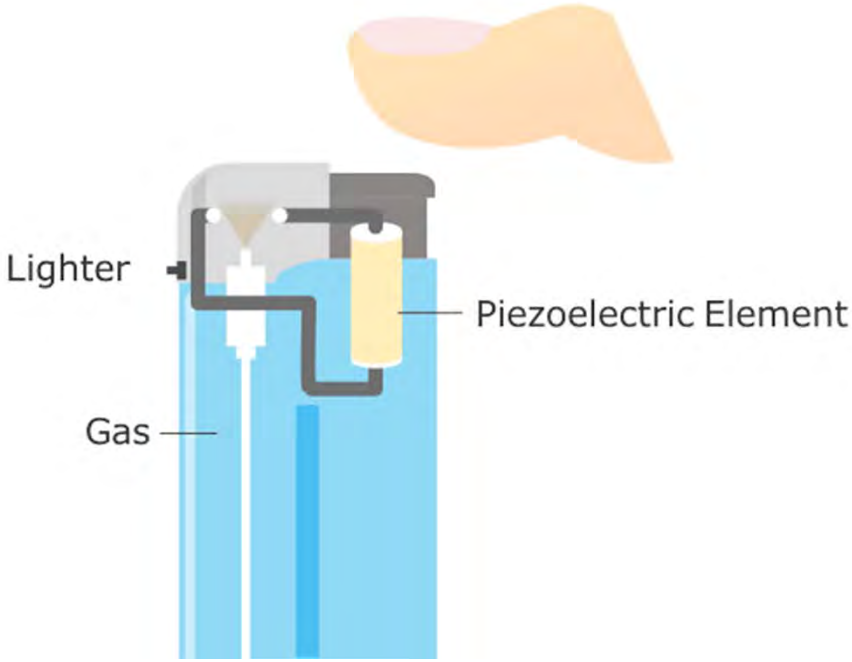
Пироэлектричество.





Электрические свойства кристаллов

Пироэлектричество.



Электрические свойства кристаллов

Пироэлектричество.

В 1916 г. французский математик и физик П. Ланжевен изобрёл прибор для подводной сигнализации при помощи ультразвуковых колебаний, в котором кварцевый элемент использовался как излучатель и приемник ультразвуковых колебаний под водой.

Посредством обратного пьезоэффекта возбуждались колебания группы кристаллических элементов. В воду излучались продольные ультразвуковые колебания. Отраженные колебания, попадая на кристаллические элементы, возбуждали на их поверхности переменную ЭДС, которая усиливалась и принималась оператором. На этой основе строились эхолоты с высокой точностью измерений.

Поль Ланжевен
(1872 – 1946)

Электрические свойства кристаллов

Пироэлектричество.

В 1921 г. установил, что тонкие пластинки, вырезанные определенным образом из кристаллов кварца, можно использовать для контроля частоты в радиоосцилляторных контурах: колеблющаяся с резонансной частотой пластина оказывает стабилизирующее действие на переменное электрическое поле, возбуждающее её колебания.

Уолтер Кэди
(1874 – 1974)

В радиопередатчиках и в радиоприемниках такие кварцевые пластинки играют роль стабилизатора частот, препятствующего их изменению, сильно уменьшают интерференцию волн и играют роль фильтров, пропускающих лишь волны определенных узких пределов частоты. Таким образом, кварцевые пластинки и держат радиопередачу на определенной «волне».

В 1939 г. в США было изготовлено приблизительно 50 тыс. кварцевых пластинок, а с января 1942 г. до конца войны вооруженные силы получили более 70 млн. кварцевых пластинок.

Электрические свойства кристаллов

Пироэлектричество.

Явление возникновения электрического поля в кристаллах при изменении их температуры, например: при нагревании, трении, облучении или даже примитивном натирании

Первые упоминания:

Теофраст – 314 г. до н. э. – нагретые кристаллы турмалина притягивают к себе соломинки и частички пепла

Фалес Милетский – VI в. до н. э. – истолковал способность янтаря притягивать птичий пух или соломинки после натирания (эффект электризации трением)

Рассказ об этом физическом явлении впервые документирован в диалоге «Тимей» древнегреческого философа – Платона

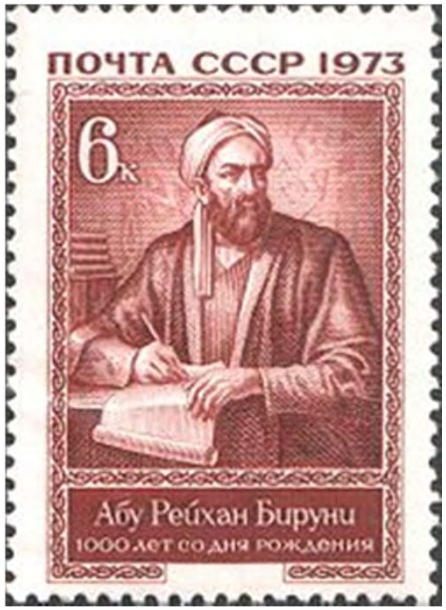
Электрические свойства кристаллов

Пироэлектричество.

Явление возникновения электрического поля в кристаллах при изменении их температуры, например: при нагревании, трении, облучении или даже примитивном натирании

Первые упоминания:

о подобных свойствах кристаллов граната написал в 1038 г. в своём фундаментальном труде «Минералогия, или Книга сводок для познания драгоценностей», и привёл строки из стихотворения, посвящённые пироэлектрическому эффекту



Аль-Бируни
(973 – 1048)

Глаза мерцают, словно влажный виноград.
Молю: взгляни! Других не надобно наград.
Ресницы так притягивают сердце,
Как не влечёт к себе соломинку гранат.

(пер. С.Ахметова)

Электрические свойства кристаллов

Пироэлектричество.

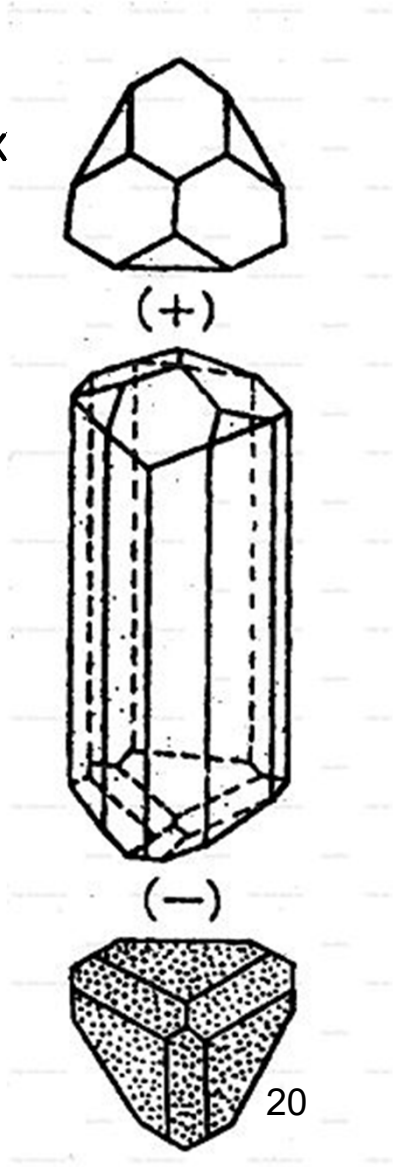
Возникновение разноименных зарядов на разных концах кристалла с колебанием температуры.

Может возникнуть лишь в диэлектрических кристаллах с единственным полярным направлением.

Пироэлектрический эффект может возникнуть в кристаллах, относящихся к одному из десяти полярных (гемиморфных) классов симметрии: 1,2,3,4,6, *m*, *mm*2, 3*m*, 4*mm*, 6*mm*

Все пироэлектрики проявляют пьезоэлектрические свойства, но не наоборот.

Пироэффект: турмалин (турмалин кристаллизуется в классе 3*m*)



Магнитные свойства кристаллов

Способность намагничиваться при помещении кристаллов в магнитное поле.

Кристаллы разделяются на диамагнитные, парамагнитные, ферромагнитные и антиферромагнитные.

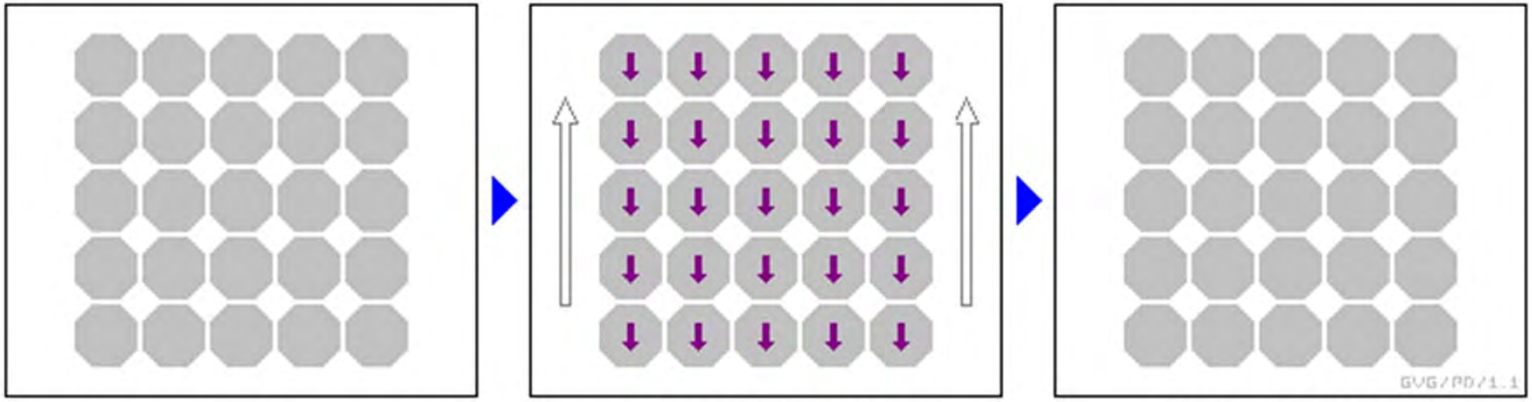
Магнитные свойства зависят не только от кристаллической структуры, но и от электронного строения ядер и оболочек атомов, а также орбитального движения вокруг них электронов.

Магнитные свойства кристаллов

Диамагнетики.

Электроны с противоположными спинами в атоме сгруппированы попарно – магнитные моменты электронов скомпенсированы, а суммарный магнитный момент равен нулю.

При внесении диамагнетика в магнитное поле, результирующие магнитных моментов электронов с противоположными спинами будут антипараллельны вектору напряженности магнитного поля – будут из него выталкиваться.



Диамагнетики: благородные металлы (Au, Ag, Cu, …), большинство ионных кристаллов (NaCl, CaF_2, …)

Магнитные свойства кристаллов

Парамагнетики: пирит, переходные металлы (Pt, Ti, Sc, …).

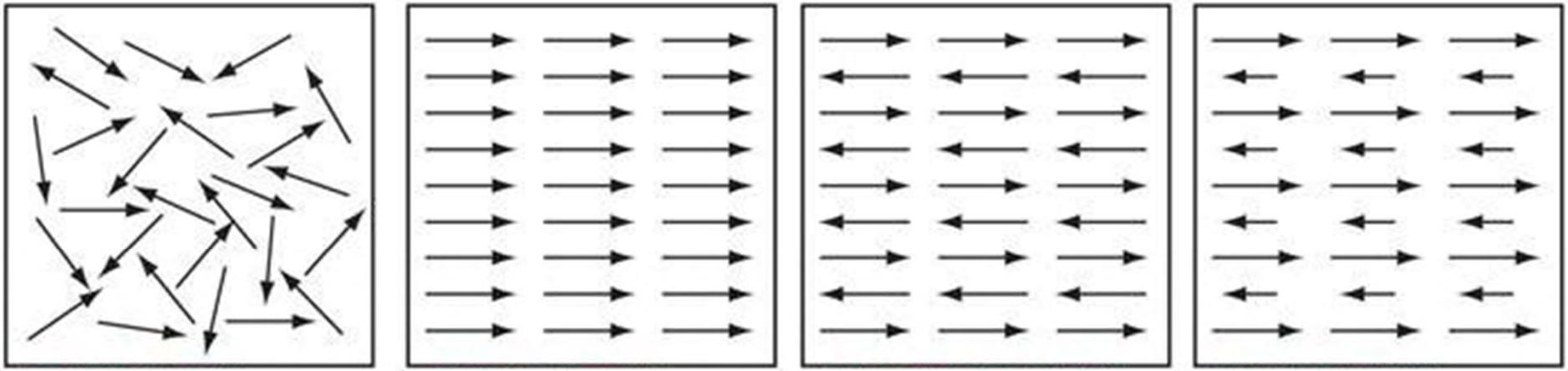
Магнитные моменты в атомах расположены хаотично.

Суммарный магнитный момент будет постоянным.

При попадании парамагнетика в магнитное поле разориентированные спины приобретают направленность:

- Ферромагнетики – магнитные моменты направлены параллельно друг другу (усиление магнитного поля) – Fe, Ni, Co ;
- Антиферромагнетики – магнитные моменты равны и антипараллельны – суммарный момент равен нулю – оксиды переходных металлов (MnO, NiO), многие фториды, сульфиды,…
- Ферримагнетики – неравенство антипараллельных магнитных моментов (суммарный момент не равен нулю) – обладают спонтанной намагниченностью – минералы группы граната, ферриты (например, Fe_3O_4)

Магнитные свойства кристаллов



ПАРАМАГНЕТИКИ
магнитные моменты атомов расположены хаотично

ФЕРРОМАГНЕТИКИ
магнитные моменты атомов расположены параллельно

АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ
магнитные моменты атомов расположены антипараллельно

ФЕРРИМАГНЕТИКИ
нескомпенсированные магнитные моменты атомов расположены антипараллельно