Омский государственный технический университет

Кафедра физики

Калистратова Л.Ф.

Электронные лекции по разделам электромагнетизма

(электростатика, постоянный ток, магнетизм)

17 лекций

(34 аудиторных часа)

Тема 5.
Электрическое поле в диэлектриках

План лекции

1. Виды диэлектриков.
2. Деформационная поляризация диэлектриков.
3. Ориентационная поляризация диэлектриков.
4. Электрическое поле в диэлектрике.
5. Вектор электрической индукции.
6. Сегнетоэлектрики и их основные свойства.
7. Пьезоэлектрический эффект. Электрострикция.

1. Виды диэлектриков

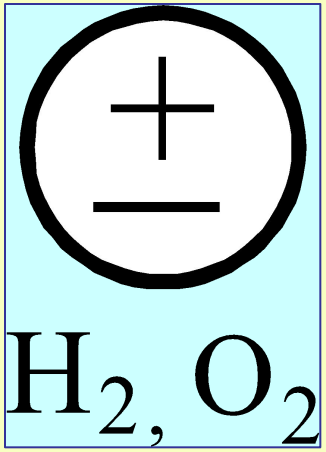
В **диэлектриках**

- нет свободных зарядов,
- его **молекулы нейтральны.**

Неполярной называется молекула, у которой **совпадают центры положительных и отрицательных зарядов**.

Диэлектрики с неполярными молекулами:

H_2, O_2, N_2, He, Ne, Ar, CH_4, полиэтилен, полистирол и др.



Полярной называется молекула, у которой **не совпадают центры тяжести положительных и отрицательных зарядов.**

Такая молекула называется **диполем**.

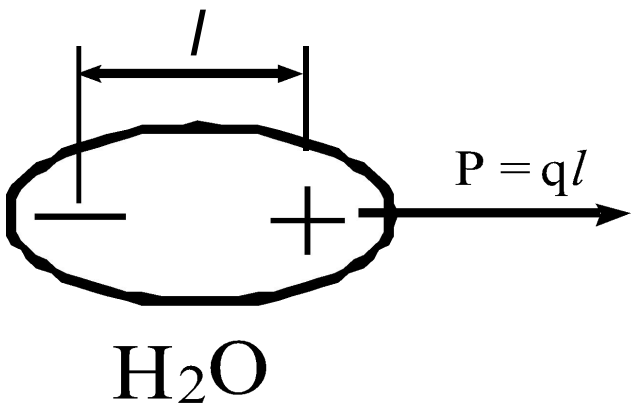
К ним относятся молекулы воды H_2O, серной кислоты HCl, и другие соединения, например, NH_4OH, CH_3OH.

Электрический момент диполя полярной молекулы **(дипольный момент):**

$$P = q\mathit{l}$$

q – заряды молекулы,

l – плечо диполя.



Существуют еще **диэлектрики ионного типа**, в узлах кристаллической решетки которых расположены положительные и отрицательные ионы (например, кристаллы NaCl).

Если диэлектрик внести в электрическое поле, он **поляризуется.**

Существуют **три основных типа поляризации** диэлектриков:

- деформационная;

- ориентационная;

- ионная.

1. Деформационная (электронная) **поляризация:**

- **характерна для диэлектриков с неполярными молекулами;**
- **время установления поляризации составляет**

$$\sim 10^{-15}\,\text{с}$$

2. Ориентационная поляризация:

- характерна для диэлектриков с полярными молекулами.

3. Ионная (деформационная) **поляризация:**

- характерна для ионных кристаллов;

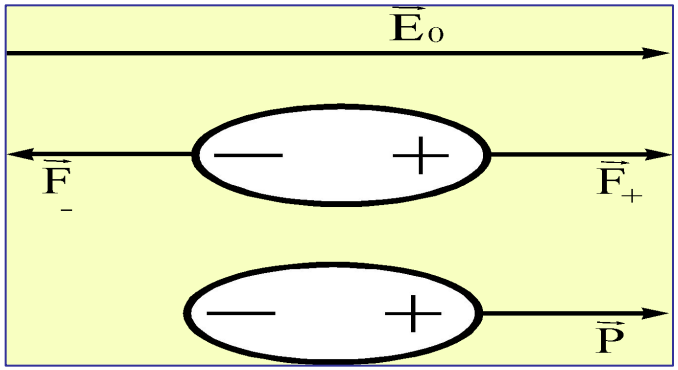
- внешнее электрическое поле смещает друг относительно друга подрешетки (положительную и отрицательную) ионных кристаллов;

- **время установления ионной поляризации в 100 – 1000 раз больше, чем электронной.**

2. Деформационная поляризация диэлектриков

Деформационной называется **поляризация диэлектриков, состоящих из неполярных молекул.**

Рассмотрим поведение такой молекулы во внешнем электрическом поле напряженностью $\vec{E}_0$.



Со стороны внешнего поля на заряды молекулы действуют равные по величине, но противоположно направленные электрические силы $\vec{F}_-$ и $\vec{F}_+$.

Положительный заряд молекулы смещается по направлению напряженности внешнего (поляризующего) поля, отрицательный – против поля.

Внешнее электрическое поле **деформирует электронные оболочки** молекул, в результате чего **молекулы приобретают дипольные моменты, направленные по полю:**

$$\vec{P}_i = \alpha \varepsilon_0 \vec{E}$$

α – **поляризуемость** молекулы.

Поляризуемость – мера того, насколько легко под действием внешнего поля молекулой приобретается дипольный момент.

Величина $\chi = N\alpha$,где N – число молекул,

называется **восприимчивостью** диэлектрика.

Смещение зарядов происходит подобно упругой деформации, как если бы между зарядами действовали упругие силы.

Смещение исчезает вместе с исчезновением поля, поэтому **неполярные молекулы** называются **«квазиупругими» диполями**.

Аналогичное поведение будет наблюдаться у всех молекул диэлектрика.

С количественной точки зрения **степень поляризации диэлектрика** характеризует **вектор поляризации** $\vec{P}$

Вектор поляризации:

- направлен по направлению напряжённости внешнего поля;
- его модуль равен суммарному дипольному моменту молекул, находящихся в единице объёма диэлектрика;

$$\vec{P} = \frac{\sum_{N} \vec{P}_i}{V}$$

- его модуль прямо пропорционально зависит от величины напряжённости поляризующего поля.

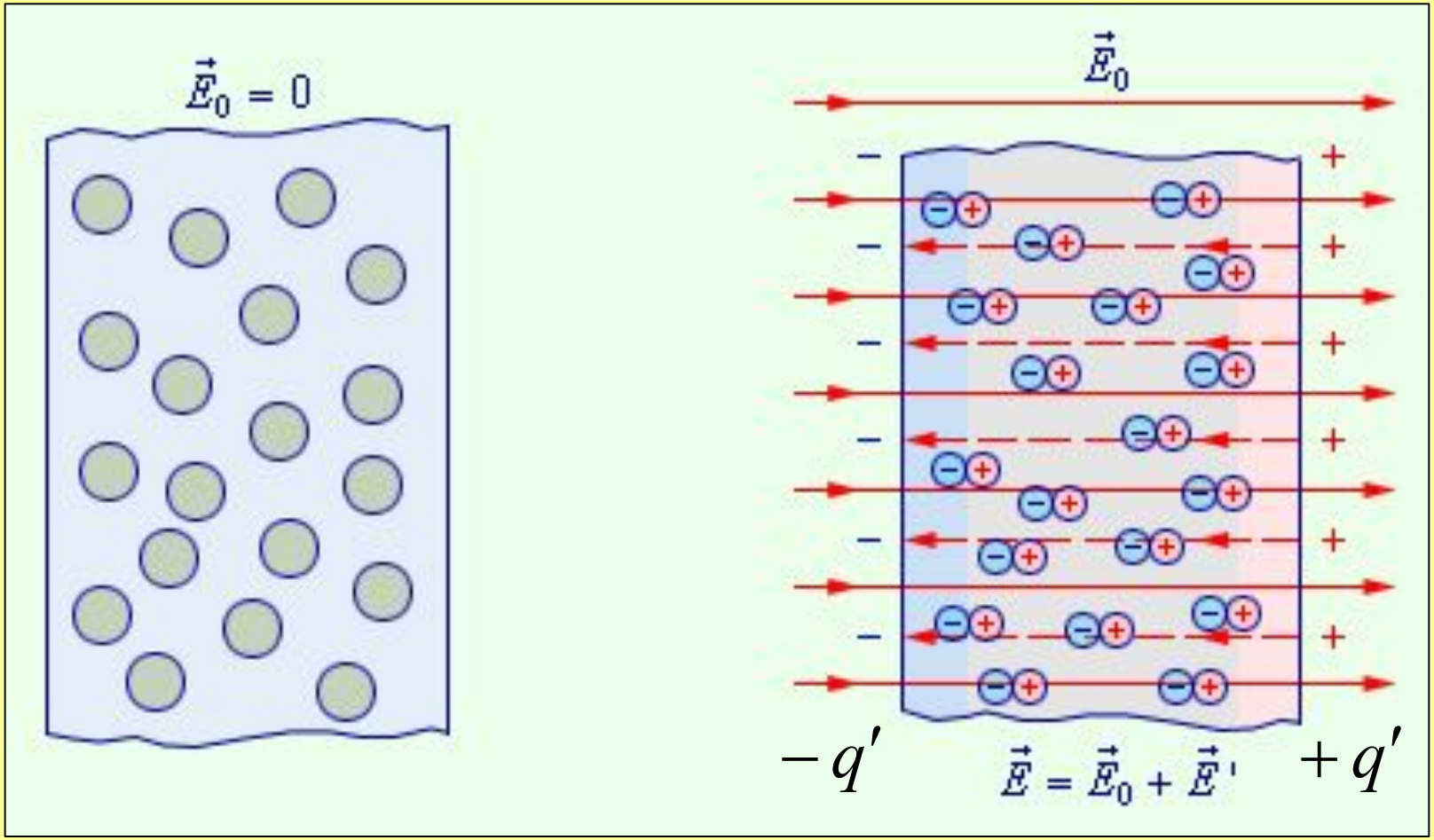
$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$$

Внутри диэлектрика положительные заряды одних молекул **компенсируются** отрицательными зарядами других молекул.

Некомпенсированными останутся заряды, принадлежащие молекулам поверхностного слоя на противоположных гранях диэлектрика:

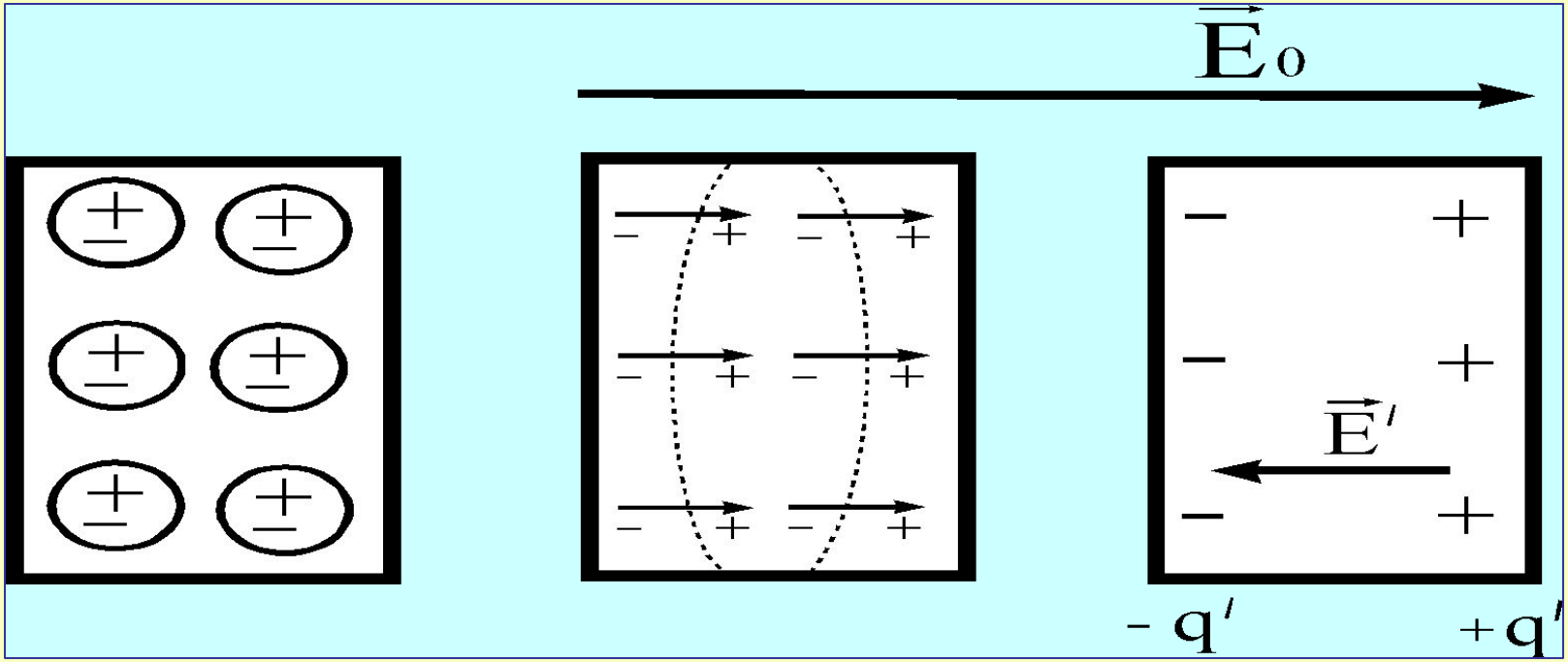
- по полю – положительные **(+q')** заряды;
- против поля – отрицательные **(-q')** заряды.

Деформационная поляризация диэлектрика



Заряды $+q'$ и $-q'$ называются связанными.

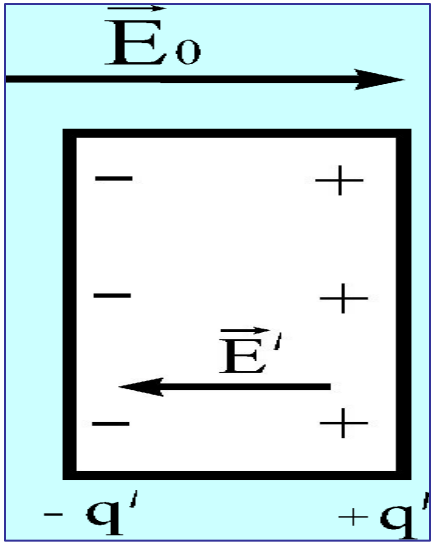
Связанным называется **заряд, который может перемещаться только в пределах молекулы и не может перемещаться по всему объёму диэлектрика.**



Поляризация диэлектрика заключается в появлении на противоположных гранях диэлектрика связанных зарядов +q' и -q‘.

Связанные заряды создают собственное электрическое поле связанных зарядов напряженностью $\vec{E}'$, направленное противоположно $\vec{E}_0$

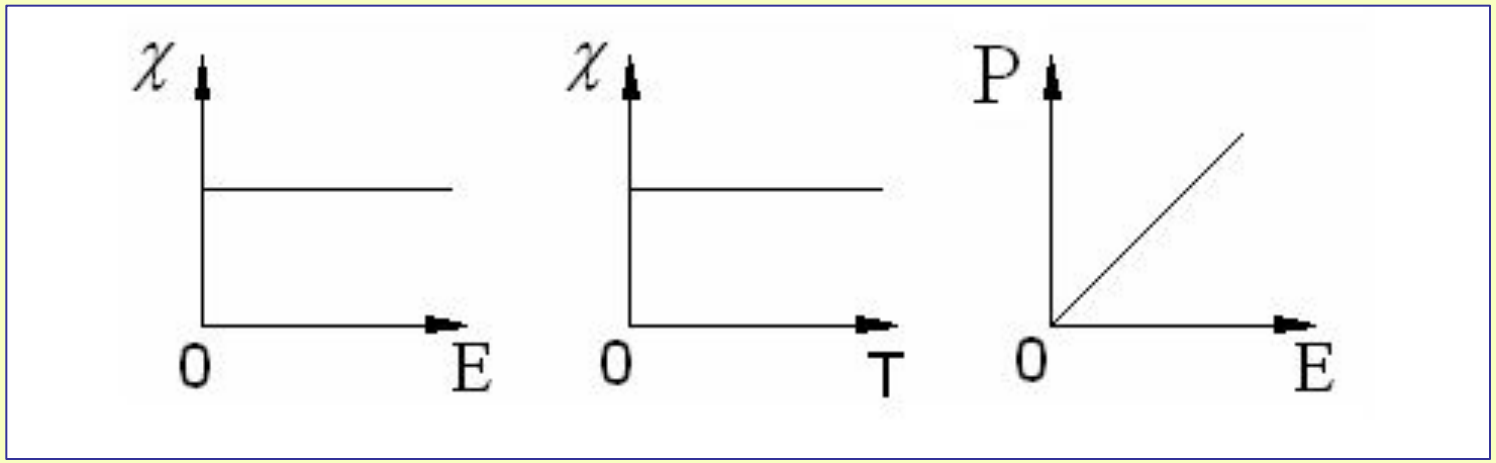
Опыт показывает, что E' меньше E_0 .



Для **деформационной поляризации** диэлектриков характерны следующие зависимости:

1) **диэлектрическая восприимчивость χ не зависит от напряженности внешнего электрического поля и температуры;**

2) **модуль вектора поляризации линейно увеличивается при возрастании напряжённости внешнего электрического поля:** $P = \chi \varepsilon_0 E$



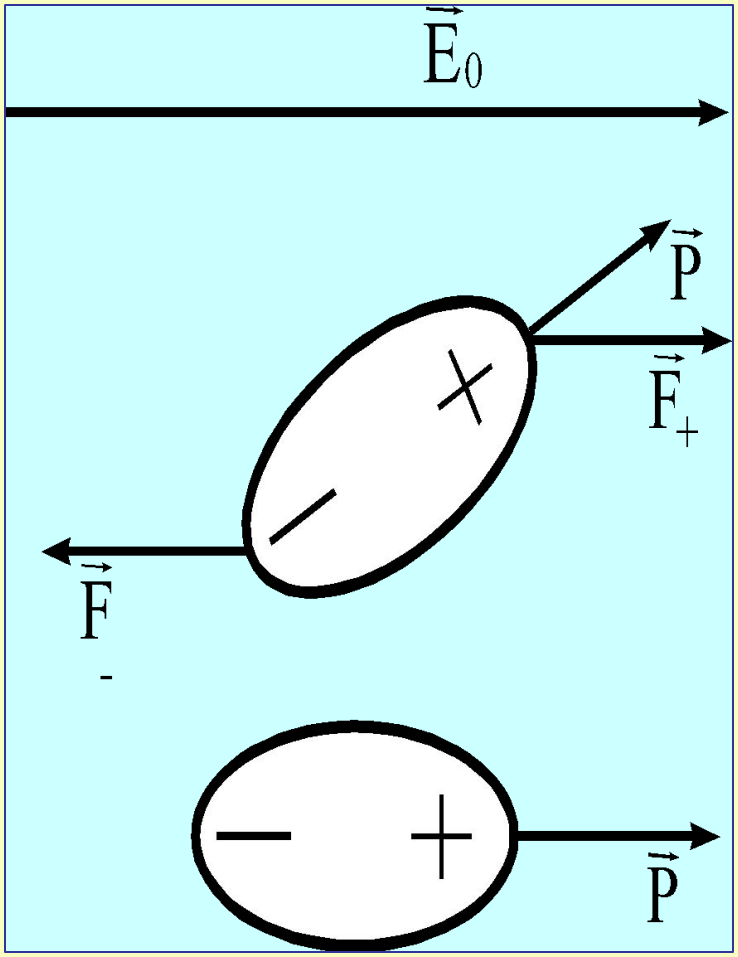
3. Ориентационная поляризация диэлектриков

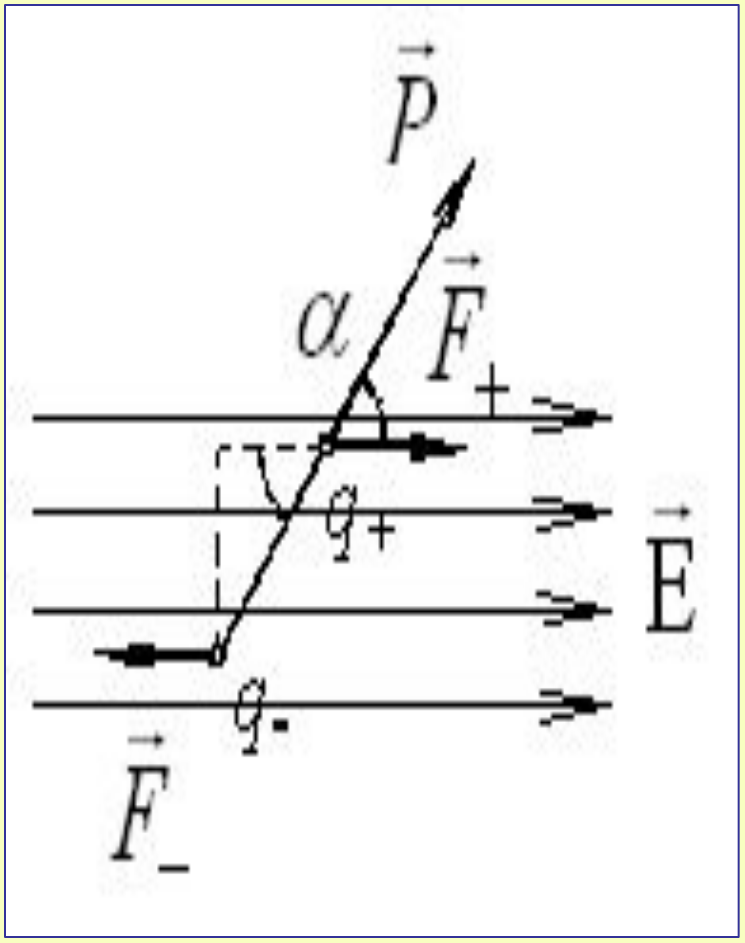
Ориентационной называется **поляризация диэлектриков, состоящих из полярных молекул.**

Если полярную молекулу поместить в электрическое поле напряженностью $\vec{E}_0$, то на нее действуют силы $\vec{F}_-$ и $\vec{F}_+$, которые поворачивают молекулу.

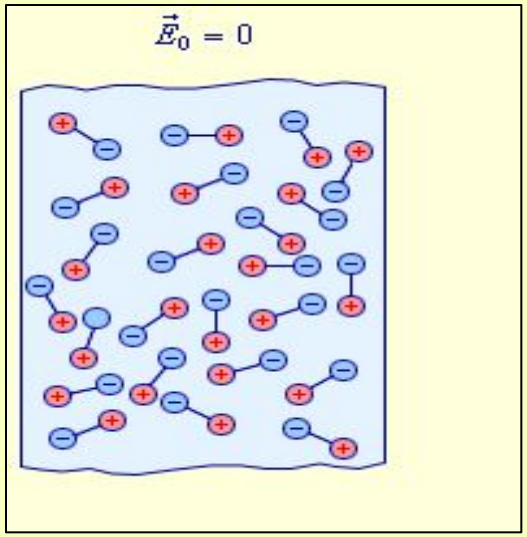
Эти силы **ориентируют** молекулу так, что дипольный момент молекулы становится параллельным напряженности внешнего поля $\vec{E}_0$.

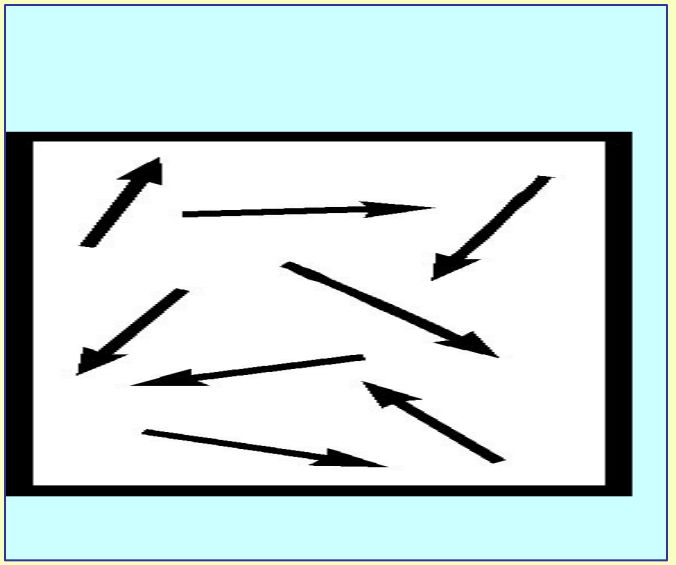
Ориентация полярной молекулы во внешнем поле





В отсутствие внешнего поля тепловое движение молекул, сосредоточенных в объёме диэлектрика, приводит к тому, что **дипольные моменты молекул хаотично ориентированы в разные стороны**.





Дипольный момент диэлектрика равен нулю:

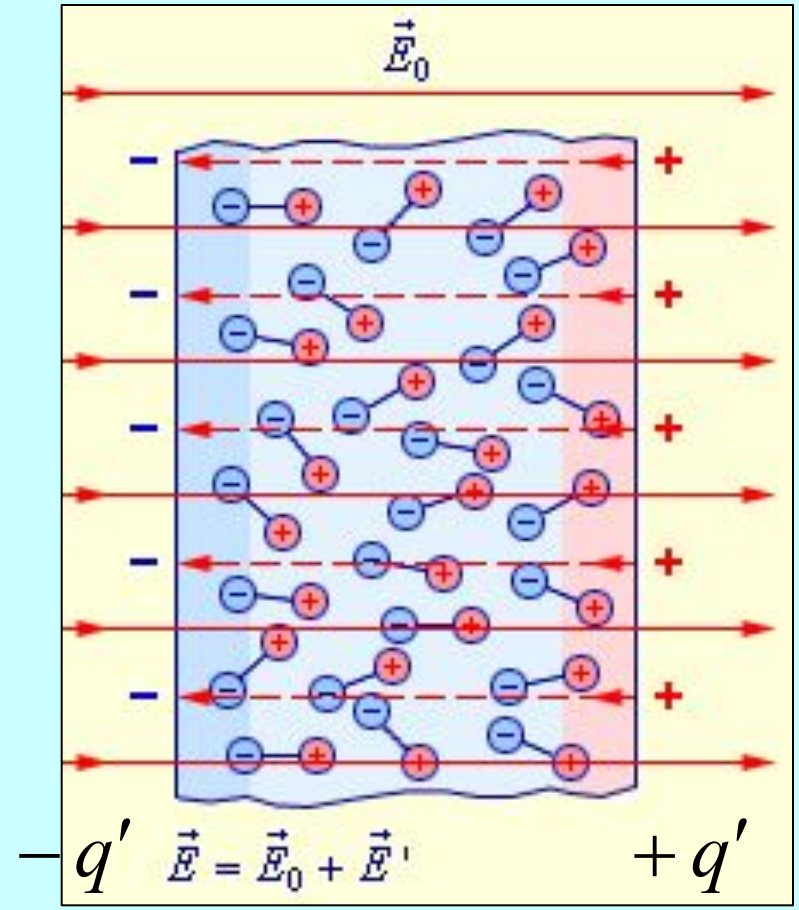
$$\vec{P} = 0$$

Во внешнем электрическом поле молекулярные диполи стремятся расположиться упорядоченно в направлении внешнего поля.

Тепловое движение нарушает эту ориентацию.

При определенных условиях наступает динамическое равновесие между данными процессами и **устанавливается преимущественная ориентация диполей по направлению внешнего поля.**

Во внешнем поле дипольные моменты полярных молекул получают преимущественную ориентацию по направлению внешнего поля.

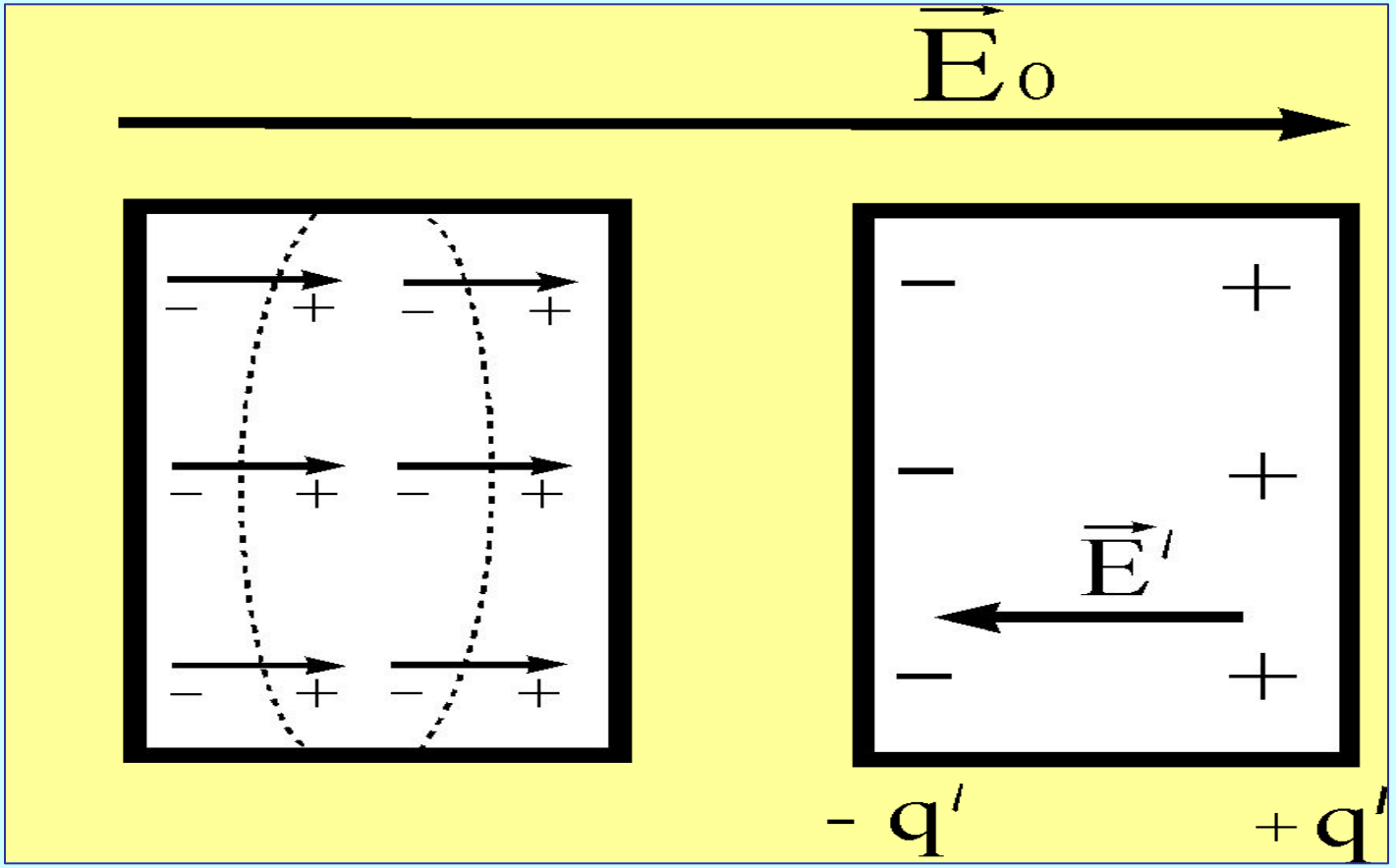


Внутри объёма диэлектрика положительные заряды одних молекул будут скомпенсированы отрицательными зарядами других молекул.

Некомпенсированные заряды молекул поверхностного слоя образуют **связанные заряды +q'** и **-q',** принадлежащие противоположным граням диэлектрика.

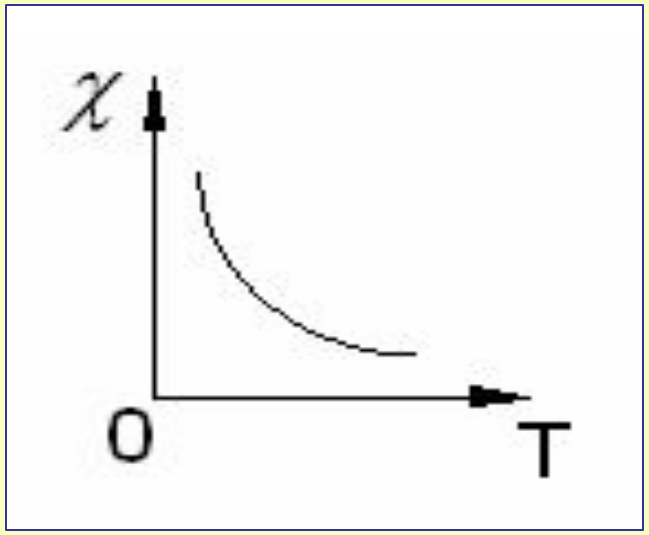
Диэлектрик **поляризуется**, внутри него образуется собственное поле связанных зарядов напряженностью $\vec{E}'$, направленное противоположно $\vec{E}_0$.

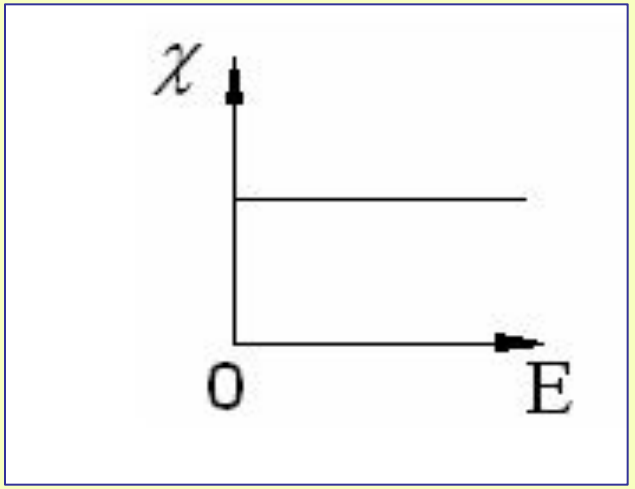
Напряжённость поля связанных зарядов E' меньше напряжённости внешнего поля E_0.



1. При нагревании **восприимчивость диэлектрика** χ **уменьшается** вследствие усиления дезориентирующего действия теплового движения.

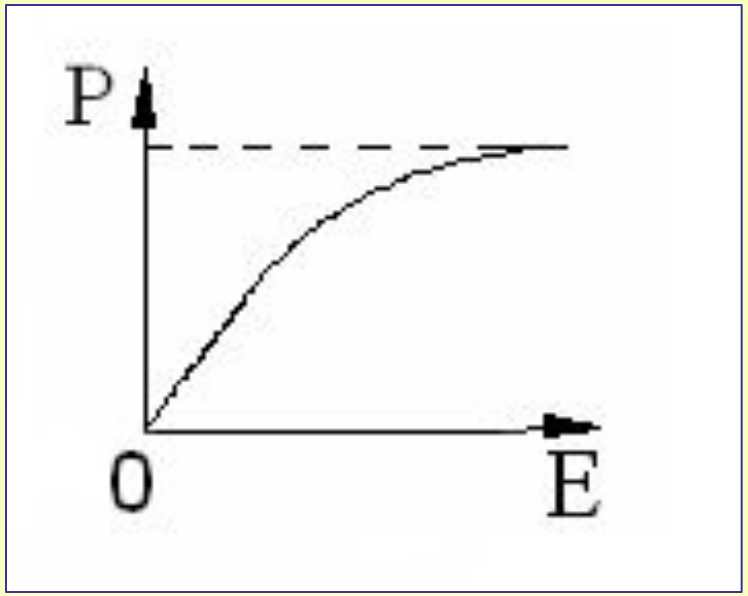
2. **Восприимчивость диэлектрика** χ **не зависит от напряжённости внешнего поля.**





Опыт показывает, что в слабых внешних электрических полях **модуль вектора поляризации линейно увеличивается с ростом напряжённости внешнего поля**, но не бесконечно.

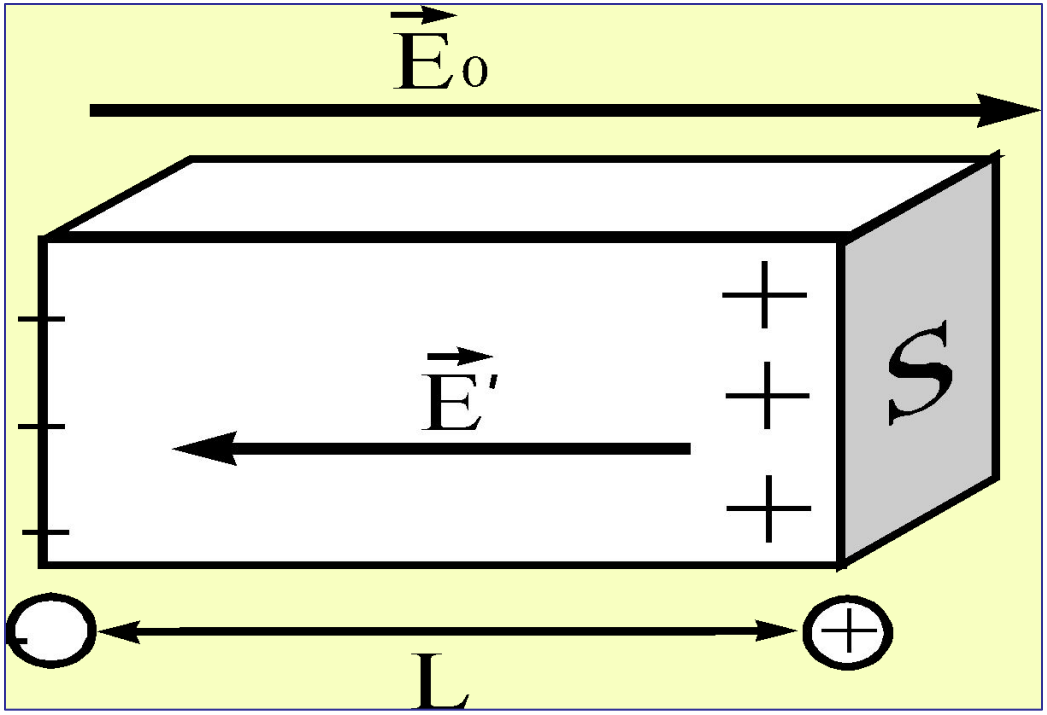
$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$$



В очень сильных полях **величина вектора поляризации стремится к насыщению** (все диполи выстроены по внешнему полю).

4. Электрическое поле в диэлектрике

Внесём бесконечную плоскопараллельную пластину из однородного диэлектрика в однородное поле и расположим её перпендикулярно к линиям поля.



Как показано выше, независимо от строения его молекул, **диэлектрик поляризуется** во внешнем электрическом поле.

Количественно **результат поляризации** диэлектрика принято характеризовать двумя величинами:

- **поверхностной плотностью связанного заряда:**

$$\sigma' = \frac{q'}{S}$$

- **модулем вектора поляризации** или **поляризованностью (P)** :

$$\vec{P} = \frac{\sum_{N} \vec{P}_i}{V}$$

Опыт показывает, что

1) **поляризованность определяется величиной связанного заряда:**

$$P \approx \sigma'$$

2) **поляризованность диэлектрика пропорциональна напряженности суммарного поля в диэлектрике: P ~ E:**

$$P = \chi \varepsilon_0 E$$

Диэлектрическая восприимчивость вещества χ :

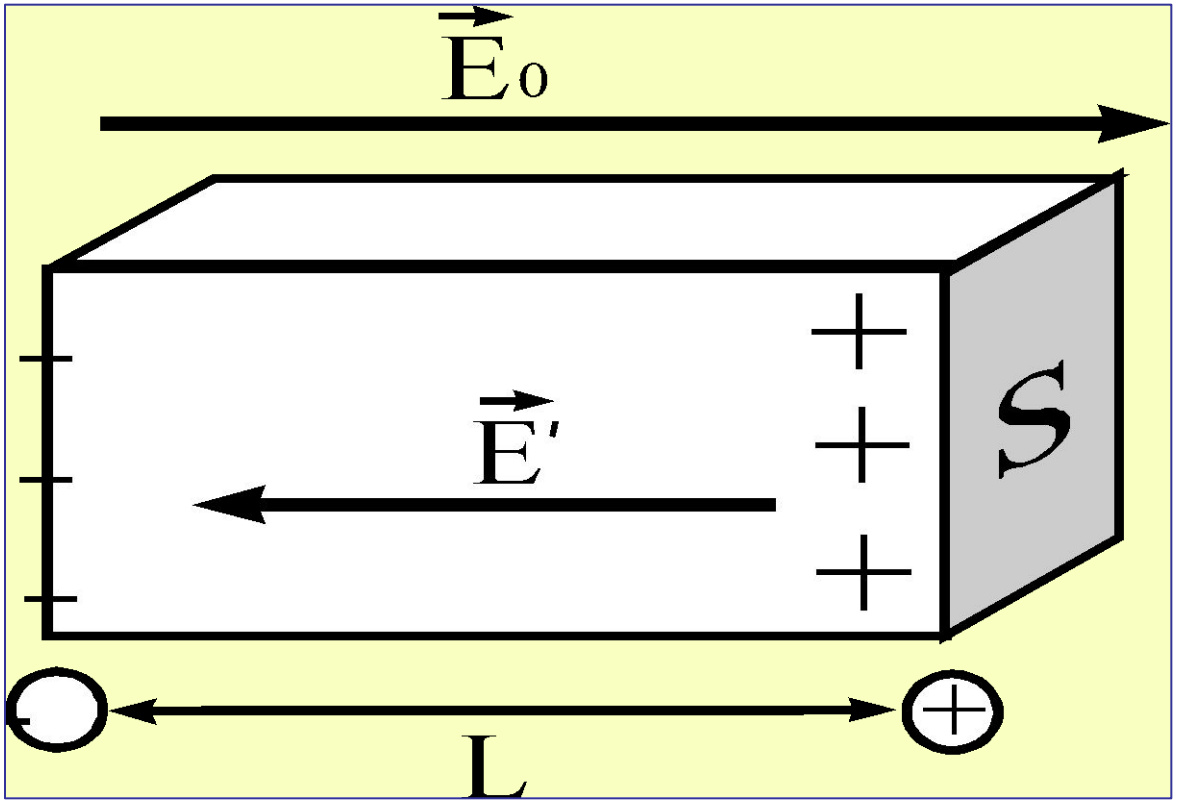
- **показывает как сильно поляризуется данное вещество во внешнем электрическом поле;**
- **численно равна модулю вектора поляризации, приобретаемого диэлектриком в поле с напряженностью**

$$\mathrm{E} = \left| \frac{1}{\varepsilon_0} \right| \frac{\mathrm{В}}{\mathrm{м}} \quad .$$

Докажем эту зависимость для частного случая:

диэлектрик взят в форме параллелепипеда

длиной L и площадью граней S, перпендикулярных напряженности внешнего поля $\vec{E}_0$.



Диэлектрик можно представить **как «гигантский» диполь** с плечом L.

Тогда вектор поляризации можно определить как

$$P = \frac{\sum P_i}{V} = \frac{q'L}{SL} = \sigma' \qquad P = \sigma'$$

Поскольку $\sigma' = \frac{q'}{S}$, то величина связанного заряда определится как $q' = PS$

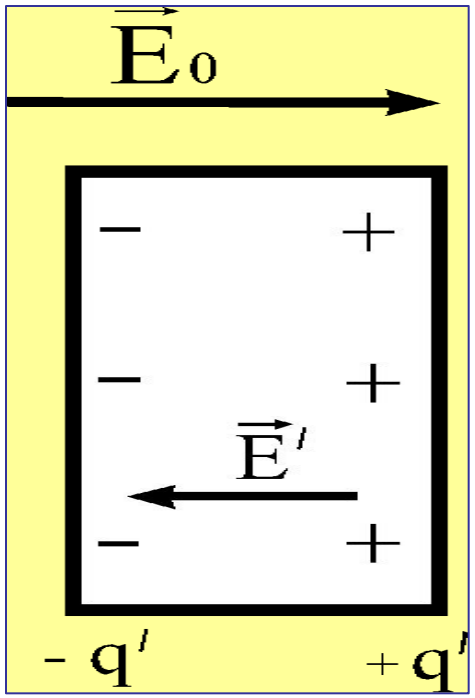
Для **диэлектрика любой геометрической формы**

полный связанный заряд, заключенный в объеме, охваченном поверхностью S, связан с вектором поляризации по формуле:

$$q' = -\oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S} \qquad \text{или} \qquad \oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S} = -q'$$

Поток вектора поляризации через произвольную замкнутую поверхность поляризованного диэлектрика равен отрицательному связанному заряду, заключённому внутри этой поверхности.

Напряжённость электрического поля внутри диэлектрика равна сумме напряжённости внешнего поля и напряжённости собственного поля диэлектрика , созданного связанными зарядами этого диэлектрика.



$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$$

$$E = E_0 - E'$$

Поляризация диэлектрика обусловлена именно полным полем $\vec{E}$.

Поле связанных зарядов $\vec{E}'$ внутри диэлектрика всегда ослабляет внешнее поле.

Поле связанных зарядов никогда не компенсирует внешнее поле внутри диэлектрика полностью.

Суммарное поле $\vec{E}$ внутри диэлектрика всегда меньше внешнего $\vec{E}_0$.

Напряженность поля связанных зарядов E' найдем как для поля типа конденсатора:

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}$$

С учётом формулы $P = \sigma'$

$$E' = \frac{P}{\varepsilon_0}$$

Поскольку $P = \chi \varepsilon_0 E$, то $E' = \chi E$

Тогда $E = E_0 - \chi E$ или $E(1+\chi) = E_0$

Величина $1 + \chi = \varepsilon$ получила название **диэлектрической проницаемости вещества**.

$$\varepsilon E = E_0$$

Напряжённость результирующего электрического поля в диэлектрике в ε раз меньше, чем в ваккуме.

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon}$$

Диэлектрик уменьшает внешнее поле внутри себя.

Диэлектрическая проницаемость вещества:

- показывает, во сколько раз напряженность электрического поля в диэлектрике меньше чем в вакууме;
- безразмерная величина.

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$$

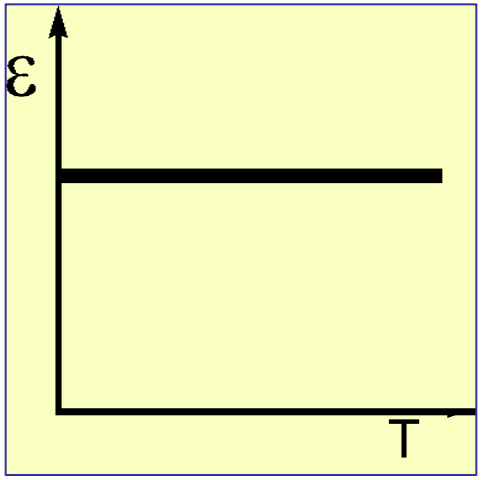
В таблице приведены значения диэлектрической проницаемости некоторых диэлектриков.

Диэлектрическая проницаемость

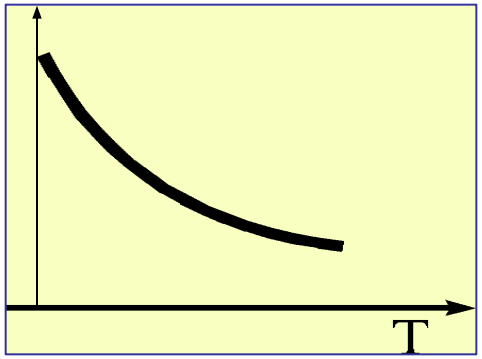
Вакуум - 1,000	Кварц - 4,3
Воздух - 1,0006	Стекло – (4 – 7)
Парафин - 2,2	Фарфор – (6 – 8)
Эбонит - 2,8	Слюда – 7
Пластик – (2,8 – 4,5)	Бумага – (3 – 7)
Этиловый спирт - 24	Вода - 81

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости

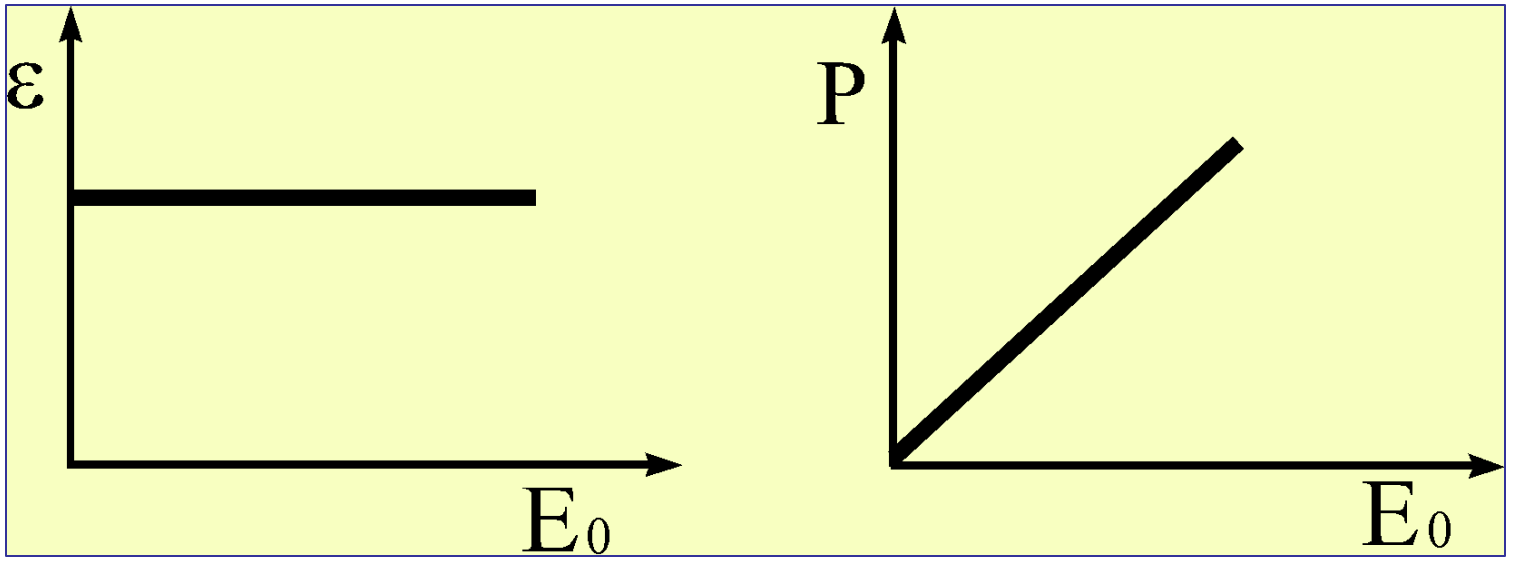
При **деформационной поляризации** **ε не зависит от температуры**.



При **ориентационной поляризации** – **ε уменьшается с увеличением температуры**.



У всех диэлектриков **ε не зависит от величины поляризующего поля E_0**, поэтому **модуль вектора поляризации линейно возрастает с увеличением напряженности внешнего поля** (в слабых полях).



5. Вектор электрической индукции

Рассмотрим теорему Гаусса применительно к диэлектрической среде.

При наличии среды (диэлектрика) **поток вектора напряженности через произвольную замкнутую поверхность S пропорционален алгебраической сумме всех свободных q и всех связанных q' зарядов, охватываемых этой поверхностью.**

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_o}(q + q')$$

Подставим полученное ранее для q' выражение в теорему Гаусса.

$$q' = -\oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_o}\left(q - \oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S} \right)$$

$$\oint_S \left(\varepsilon_o \vec{E} + \vec{P} \right) d\vec{S} = q$$

Физическая величина

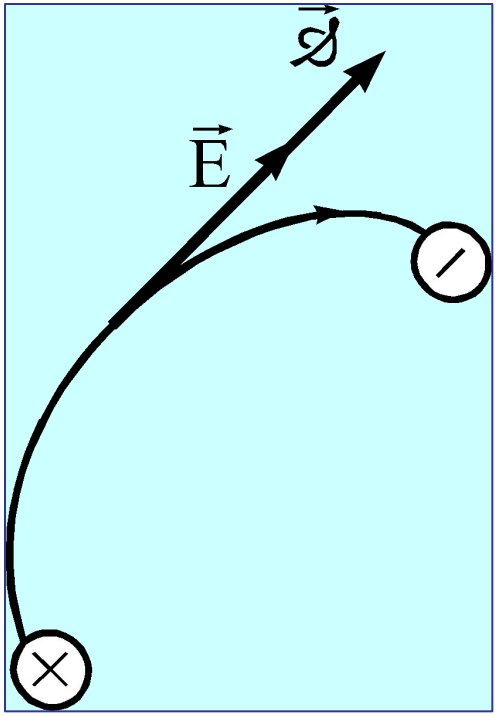
$$\vec{D} = \varepsilon_o \vec{E} + \vec{P} \qquad D_n = \varepsilon_O E_n + P_n$$

называется **электрической индукцией.**

В изотропных диэлектриках связь между индукцией и напряжённостью можно выразить более просто:

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_O \vec{E} \qquad D_n = \varepsilon\varepsilon_O E_n$$

$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}$$



В изотропных диэлектриках направление электрической индукции совпадает с направлением вектора результирующей напряженности.

Силовые линии векторов $\vec{E}$ и $\vec{D}$ совпадают.

Густота линий $\vec{D}$ пропорциональна численному значению электрической индукции в данных соответствующих точках.

Итак, для описания электрического поля в диэлектриках вводятся две величины: напряженность $\vec{E}$ и индукция (смещение) $\vec{D}$.

Из этих двух характеристик важнейшей является $\vec{E}$.

Введение $\vec{D}$ оправдано тем, что поток $\vec{D}$ не зависит от диэлектрических свойств среды, то есть число линий $\vec{D}$ не меняется при переходе через границу диэлектрика.

Интегральное выражение

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = q$$

называется **теоремой Гаусса для диэлектрика.**

Формулировка теоремы: **поток вектора электрической индукции через произвольную замкнутую поверхность S равен алгебраической сумме свободных зарядов, охватываемых этой поверхностью.**

Теорема Гаусса для диэлектрика позволяет определить поведение силовых линий напряжённости и индукции при их переходе через границу раздела двух сред с разными диэлектрическими проницаемостями.

Если на границе нет свободных зарядов, то

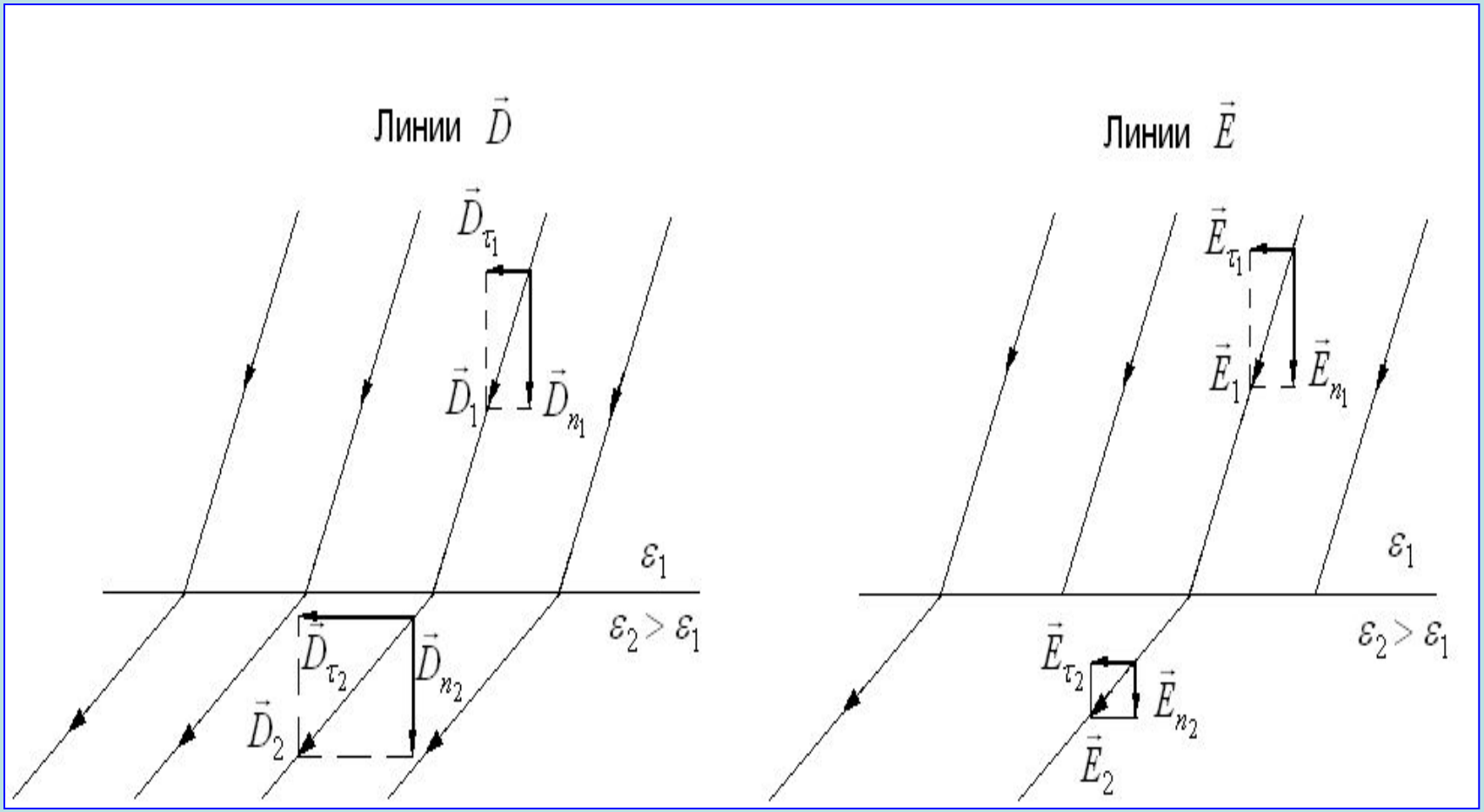
не изменяются:

- перпендикулярная границе диэлектриков **нормальная составляющая вектора** $\vec{D}$ **;**
- параллельная границе диэлектриков **тангенциальная составляющая вектора** $\vec{E}$.

$$D_{n_2} = D_{n_1}$$

$$E_{\tau_2} = E_{\tau_1}$$

Поведение векторов напряжённости и индукции на границе раздела двух диэлектриков



Скачкообразно изменяются – испытывают разрыв:

- **тангенциальная же составляющая** вектора $\vec{D}$;
- **нормальная составляющая вектора** $\vec{E}$.

$$D_{\tau_2} = D_{\tau_1} \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

$$E_{n_2} = E_{n_1} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

Это означает, что на границах диэлектриков

- **линии** $\vec{D}$ **преломляются, но остаются непрерывными;**
- **линии** $\vec{E}$ **преломляются и испытывают разрыв.**

Если **первая среда является воздухом,** то существуют следующие дополнительные зависимости:

для напряжённости поля связанных зарядов:

$$E' = E_0\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)$$

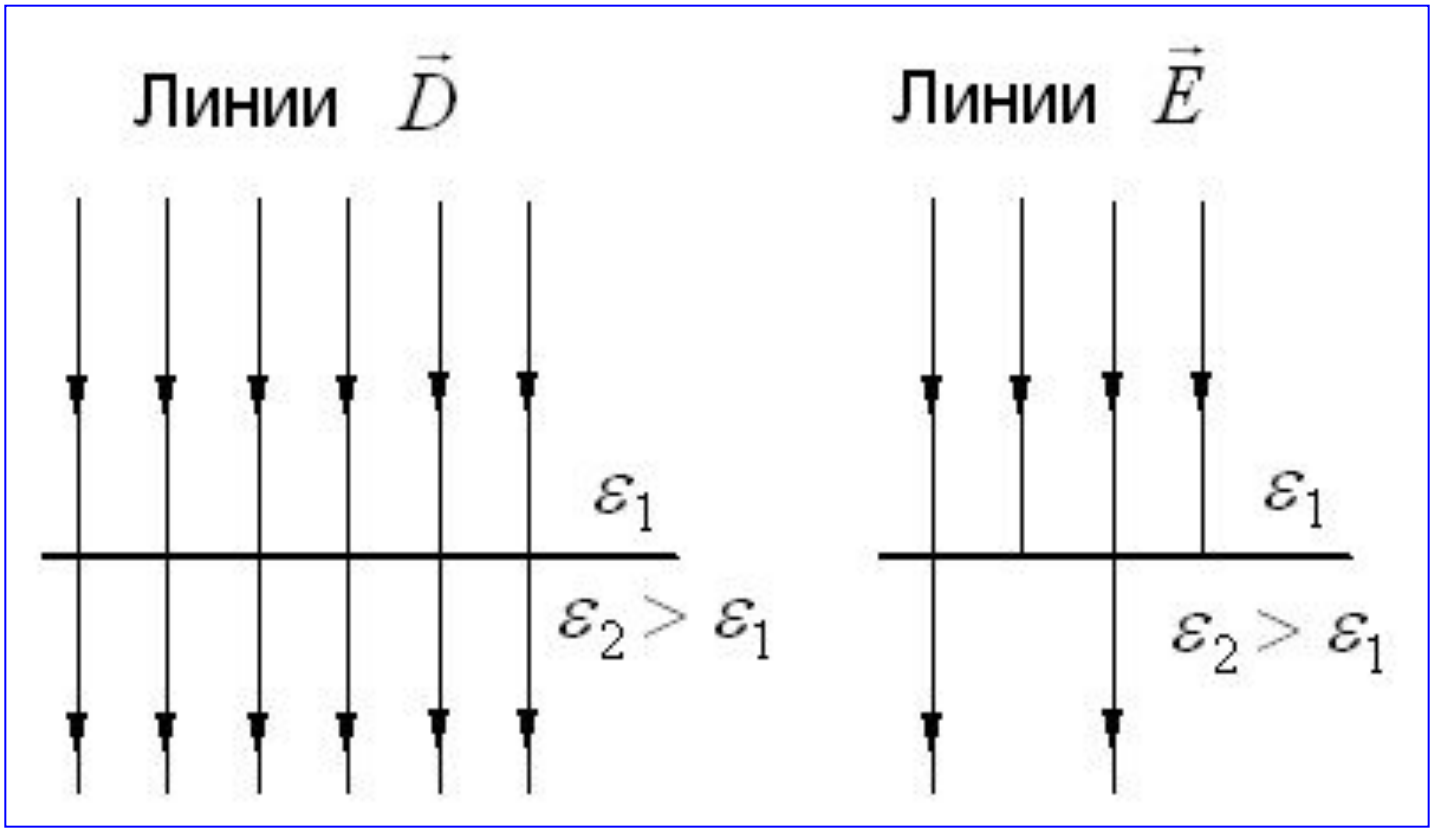
для поверхностной плотности связанных зарядов:

$$\sigma' = \sigma_0\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)$$

для величины связанных зарядов:

$$q' = q_0\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)$$

Если **граница раздела диэлектриков перпендикулярна линиям поля**, то $\vec{D}$ **= const и по величине и по направлению,** $\vec{E}$ **изменяется только по модулю.**



6. Сегнетоэлектрики и их основные свойства

Сегнетоэлектрики:

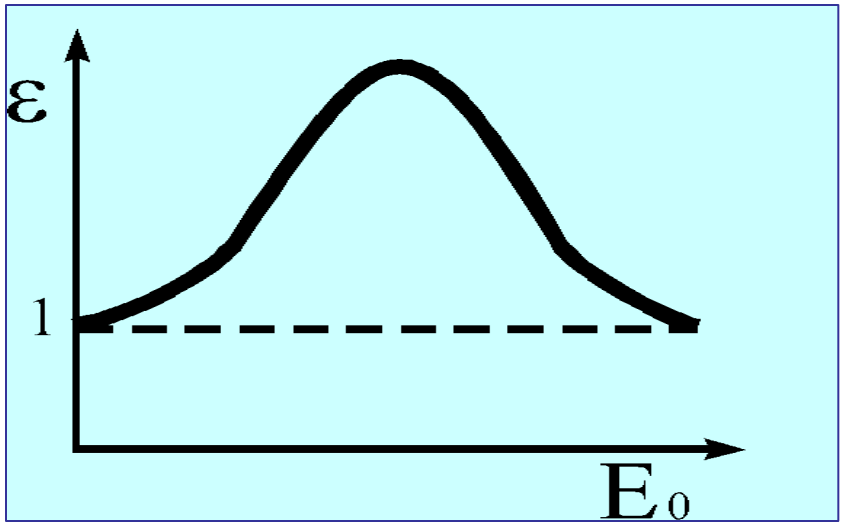
- **особого типа диэлектрики, с полярными молекулами, обладающие уникальными свойствами;**
- **вещества, которые можно использовать в качестве источников сильных электрических полей, во много раз превосходящих электрическое поле в вакууме.**

Сегнетоэлектрики получили название от сегнетовой соли, у которой и было открыто явление сегнетоэлектричества.

К сегнетоэлектрикам относятся сегнетова соль $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$, метатитанат бария BaTiO2 и др.

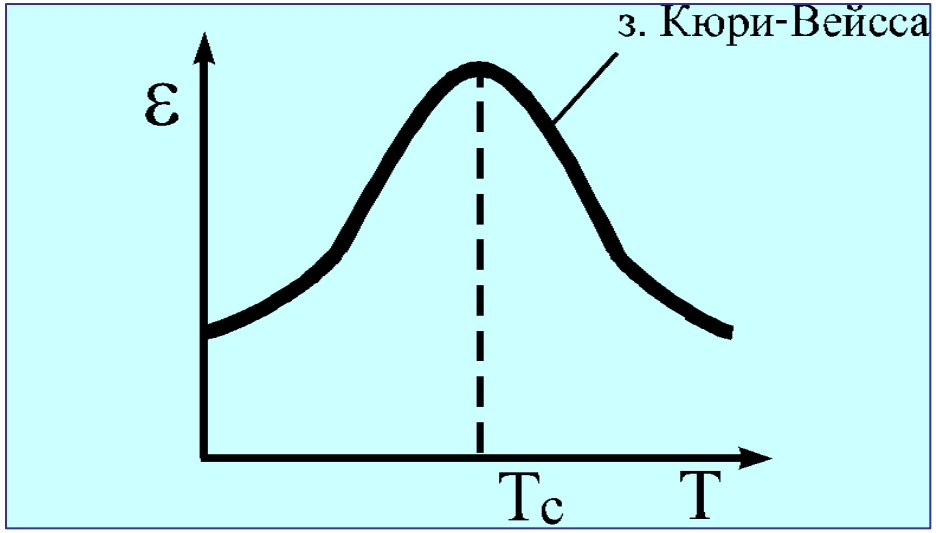
Свойства сегнетоэлектриков

1. **Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика сложным образом зависит от напряженности внешнего поляризующего поля.**



2. **Диэлектрическая проницаемость** в определенном интервале температур весьма велика – **может достигать десятков тысяч.**

3. **Диэлектрическая проницаемость зависит от температуры сложным образом.**



4. Существует особая критическая температура (**температура Кюри**), свыше которой сегнетоэлектрик теряет свои уникальные свойства и переходит в обычный диэлектрик.

При температурах, больших критической (T > Tc), для сегнетоэлектриков справедлив **закон Кюри-Вейсса:**

$$\varepsilon = \frac{C'}{(T - \Theta)}$$

C' и Θ – постоянные Кюри-Вейсса.

У **сегнетовой соли** две температуры Кюри:

– 15 °С и +22,5 °С.

В данном интервале температур её диэлектрическая проницаемость достигает значения

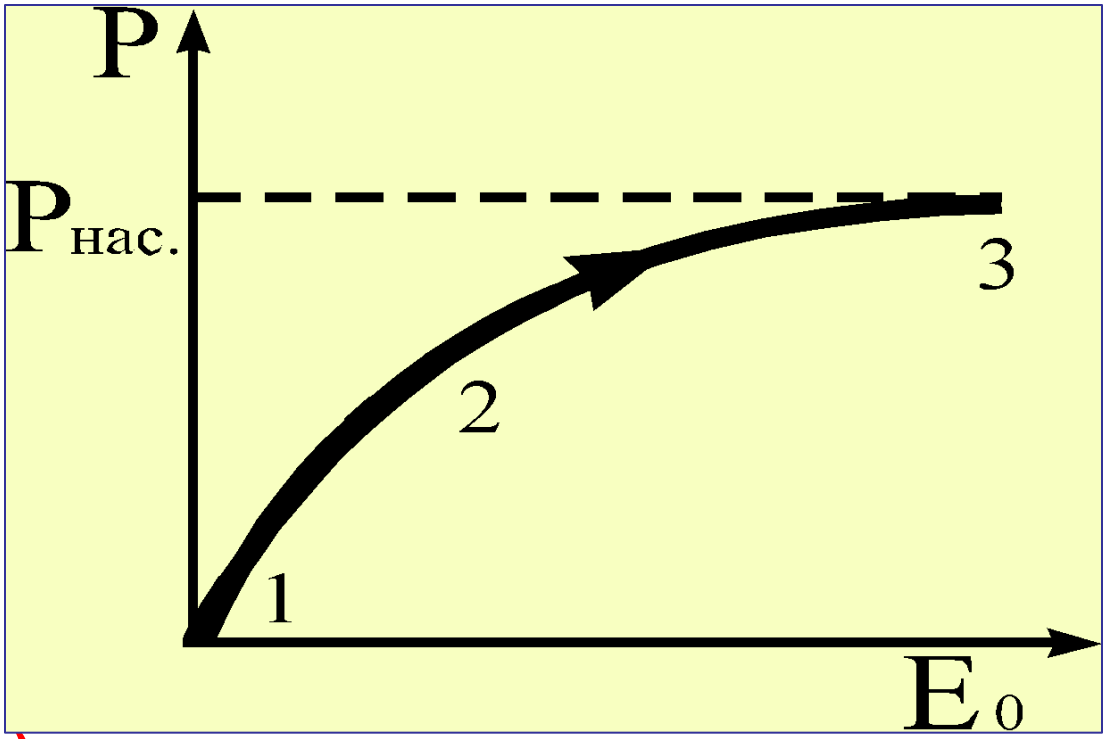
~10^4.

У **метатитаната бария** соответствующие величины имеют значения:

+125 °С и ~10^3.

5. **Вектор поляризации** сегнетоэлектрика, **не является линейной функцией напряженности** поляризующего поля E_0, поскольку величина восприимчивости χ ($\varepsilon = \chi + 1$) сама является зависящей от E_0.

$$P = \chi \varepsilon_0 E$$



Зависимость $P(E_0)$ - основная кривая поляризации.

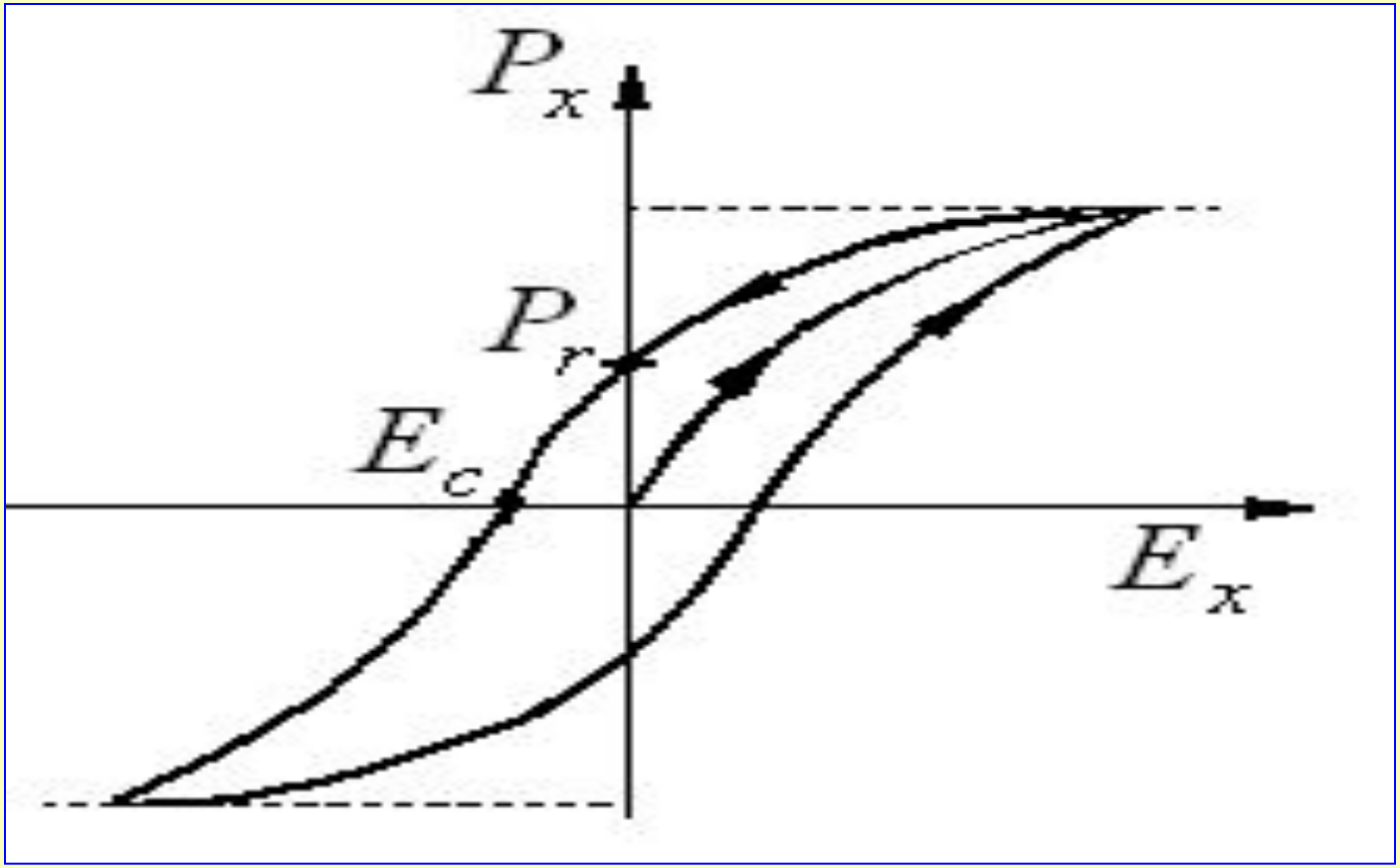
6. Для сегнетоэлектриков характерно **наличие гистерезиса.**

Гистерезис:

- **явление отставания изменений одной физической величины от изменений другой физической величины;**
- **бывает диэлектрический (в сегнетоэлектриках), магнитный (в ферромагнетиках), тепловой.**

Диэлектрический гистерезис заключается в отставании изменений вектора поляризации от изменений напряжённости поляризующего поля.

Поляризуя и деполяризуя сегнетоэлектрик дважды, можно замкнуть **петлю гистерезиса.**



Петля гистерезиса

Петля гистерезиса характеризуется следующими параметрами:

- **остаточной поляризованностью;**
- **коэрцитивной силой;**
- **площадью, занятой петлёй гистерезиса.**

Остаточная поляризованность - **величина вектора поляризации при значении напряжённости внешнего поля E = 0** (на рисунке точка P_r) .

Коэрцитивная сила - **значение напряженности внешнего поля обратного знака, при котором остаточная поляризованность равна нулю** (на рисунке точка E_c) .

Площадь петли гистерезиса равна **удвоенной работе, затраченной на поляризацию и деполяризацию сегнетоэлектрика.**

Сегнетоэлектрики друг от друга отличаются формой петли гистерезиса.

Особые свойства сегнетоэлектриков объясняются их **доменной структурой.**

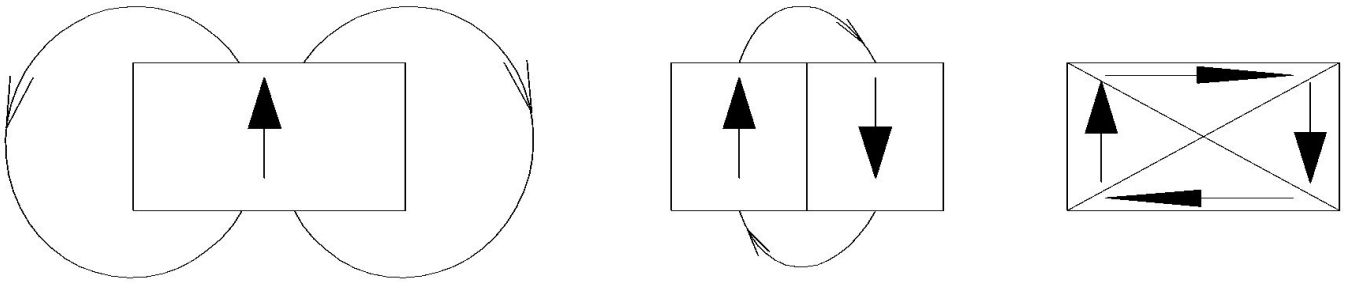
В сегнетоэлектриках между молекулами имеет место весьма **сильное взаимодействие,** благодаря которому наиболее устойчивым и энергетически выгодным оказывается **состояние с параллельной ориентацией молекулярных диполей.**

Домен - **область сегнетоэлектрика, в которой электрические моменты молекулярных диполей выстроены параллельны.**

Размеры доменов сравнительно невелики и **в пределах каждого домена** диэлектрик **поляризован до насыщения**.

1) **Каждый домен создаёт собственное электрическое поле**, поскольку в нём дипольные моменты молекул выстроены параллельно.

Энергия, затрачиваемая на создание собственного поля, существенно уменьшится, если вместе одного домена образуются два или четыре.



2) На границах между двумя соседними доменами происходит «разворот» соседних молекулярных диполей от одной ориентации к другой.

При повороте диполя во внешнем поле совершается работа.

Значит, энергия затрачивается и на образование границ между доменами.

3) Энергия двух доменов одинакового объёма, поляризованных в разных кристаллографических направлениях, оказывается различной.

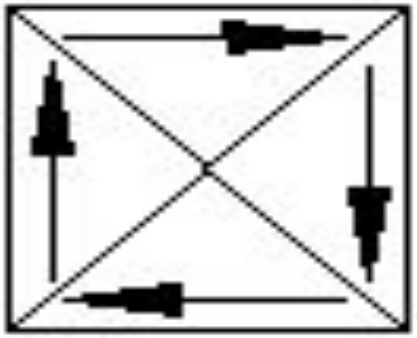
Разность этих энергий называется **энергией анизотропии**.

Размеры доменов и их форма определяются **минимумом энергии**, затрачиваемой на создание собственного поля, энергии границ и энергии анизотропии.

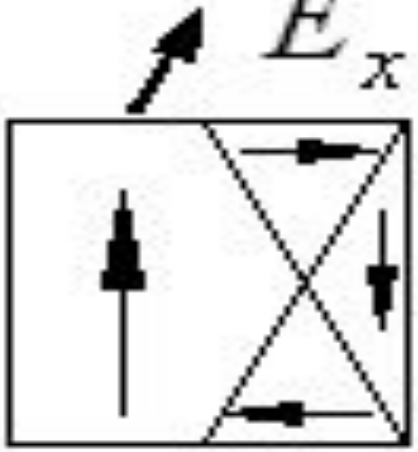
Поляризация сегнетоэлектрика – сложный процесс, сопровождающийся движением и уничтожением границ между доменами.

$E_x = 0$

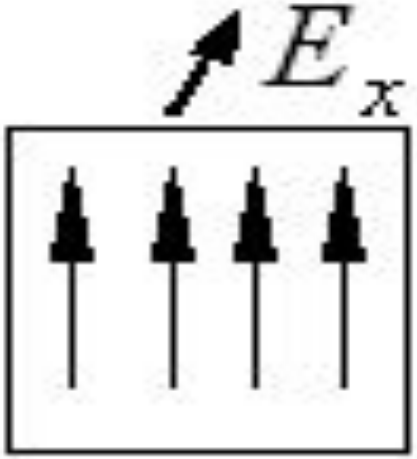
а)



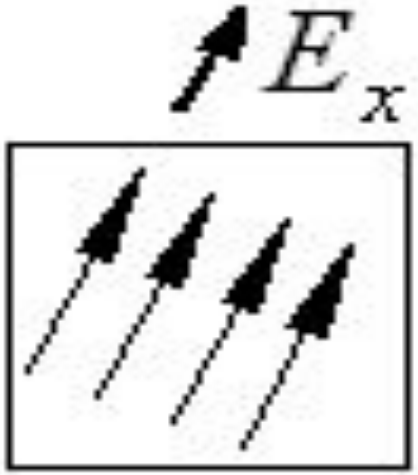
б)



в)



г)



Рассмотрим соответствие основной кривой поляризации с доменной структурой сегнетоэлектрика.

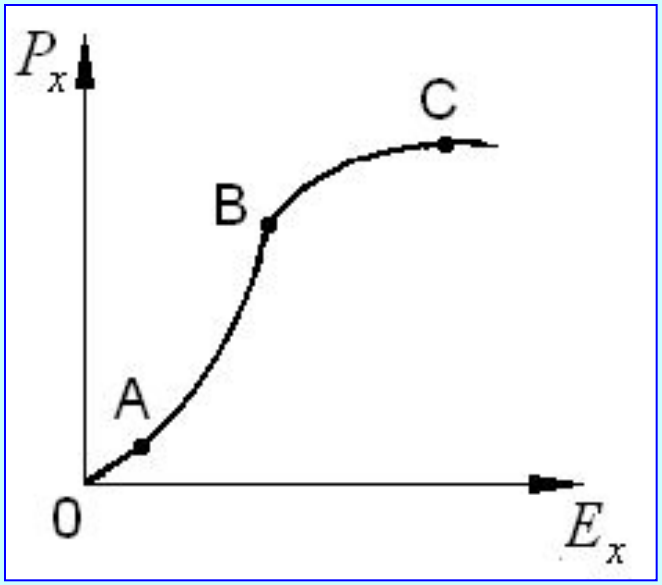
В отсутствии поляризующего поля сегнетоэлектрик разбивается на домены таким образом, что его **результирующий момент практически равен нулю.**

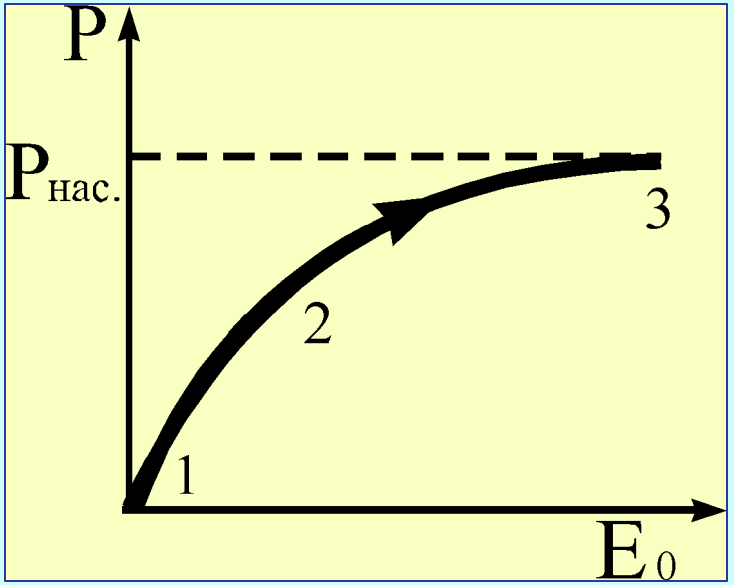
При наличии внешнего электрического поля удельная энергия доменов оказывается неодинаковой.

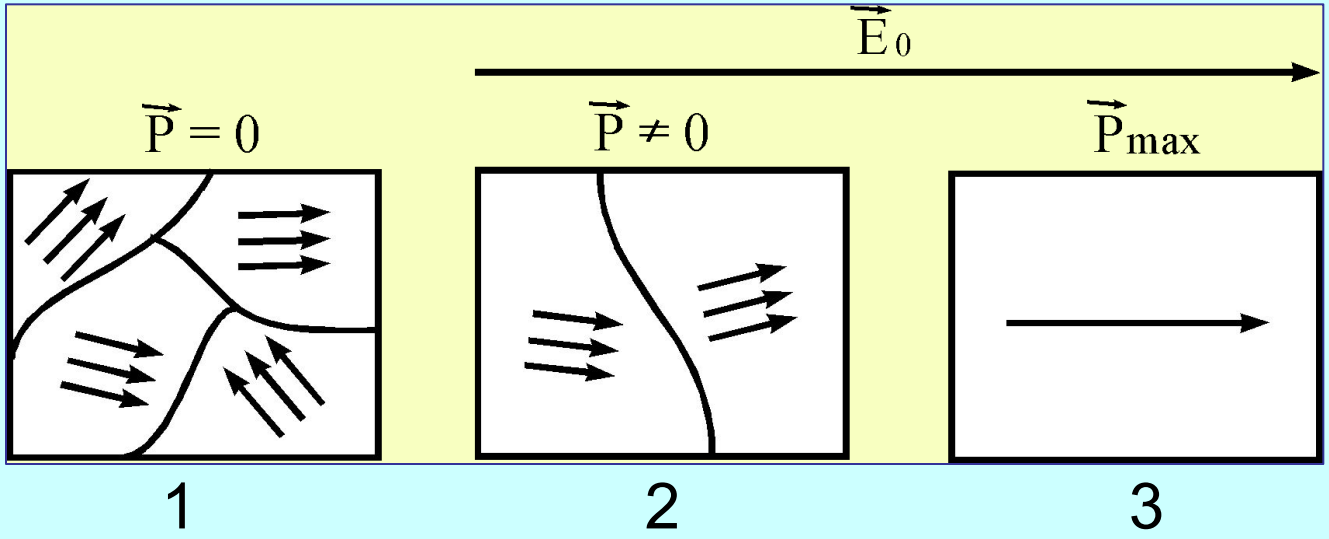
Смещение границ доменов происходит так, что **объём доменов с благоприятной ориентацией вектора** (с меньшей энергией) **увеличивается** за счёт доменов, ориентированных неблагоприятно.

Начальное смещение границ (в слабых полях) обратимо, поэтому **величина вектора поляризации изменяется прямо пропорционально напряжённости поляризующего поля** (участок ОА).

При последующем увеличении напряжённости поляризующего поля **смещение границ делается необратимым.**

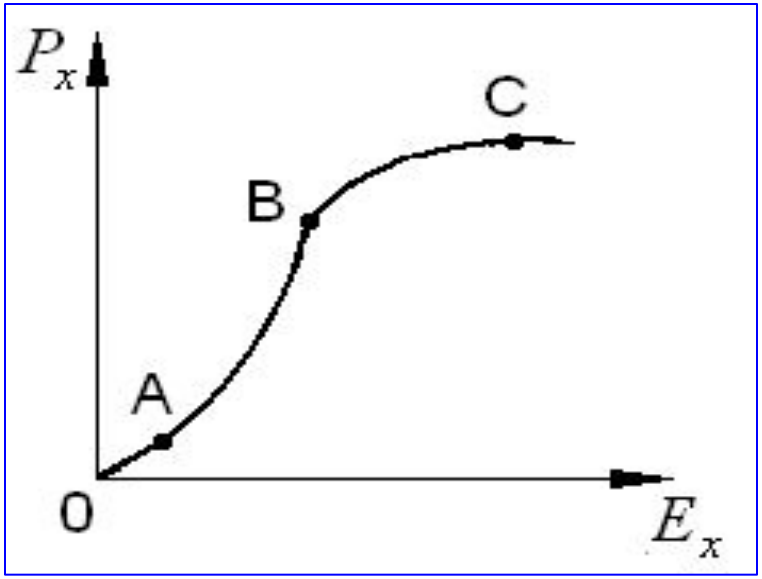

P_x
C
B
A
0
E_x


P
$P_{нас.}$
3
2
1
E_0


$\vec{E}_0$
$\vec{P} = 0$
$\vec{P} \neq 0$
$\vec{P}_{max}$
1
2
3

При последующем увеличении поля смещение границ делается необратимым (участок АВ).

Наконец, границы исчезают вовсе.



При дальнейшем увеличении поля происходит поворот (вслед за полем) электрических моментов доменов (участок ВС).

Домены в конце концов при некотором значении поляризующей напряженности устанавливаются параллельно полю.

Сегнетоэлектрик превращается в один гигантский домен, **поляризованный до насыщения** (состояние С на основной кривой поляризации).

Разрушить доменную структуру сегнетоэлектрика не просто, для этого нужно затратить работу (площадь гистерезисной петли).

7. Пьезоэлектрический эффект. Электрострикция

Прямой пьезоэлектрический эффект – появление на гранях некоторых кристаллов при их деформации связанных электрических зарядов.

Пьезоэлектрический эффект наблюдается у кварца, в сегнетовой соли, метатитанате бария, турмалине.

Пространственную решетку кристаллов, у которых наблюдается пьезоэффект, можно представить в виде двух или нескольких простых решеток, состоящих из ионов разных знаков.

При механической деформации эти решетки сдвигаются, в результате чего возникает поляризованное состояние.

Обратный пьезоэлектрический эффект – **деформация диэлектрика при его поляризации**.

Деформация при обратном пьезоэффекте:

- **зависит от напряженности поля по линейному закону;**
- **при изменении направления поля меняется её знак (растяжение-сжатие).**

Прямой пьезоэффект используется в звукоснимателях, микрофонах и т. д.

Обратный пьезоэффект используется в генераторах ультразвука.

Прикладывая к кристаллу переменное напряжение, частота которого совпадает с собственной частотой кристалла, можно получить достаточно интенсивные колебания.

Если кристалл колеблется в какой-либо среде, то он генерирует в ней звуковые колебания.

Электрострикция - **это увеличение или уменьшение одних размеров диэлектрика за счёт других.**

Электрострикция объясняется действием поля на отдельные молекулярные диполи.

Деформация при электрострикции:

- **зависит от поля по квадратичному закону;**
- **не изменяет знака при изменении направления поля.**

Изучение электрических свойств диэлектриков имеет важное теоретическое значение.

Знание дипольных моментов молекул различных веществ помогает установлению структурных формул молекул и выяснению типа связей между атомами и группами атомов в молекулах.

Диэлектрики широко используются в электро- и радиотехнике в качестве изоляционных материалов и диэлектрических заполнителей конденсаторов.