

# Диэлектрики в электрическом поле

## Лекция 4

- Все известные в природе вещества, в соответствии с их способностью проводить электрический ток, делятся на **три основных класса: диэлектрики, полупроводники и проводники.**
- Если удельное сопротивление у проводников равно,

$$\rho_{\text{пр}} = 10^{-8} - 10^{-6} \text{ Ом/м}$$

- то и диэлектриков

$$\rho_{\text{д}} = 10^8 - 10^{18} \text{ Ом/м}$$

- а полупроводники занимают промежуточную область

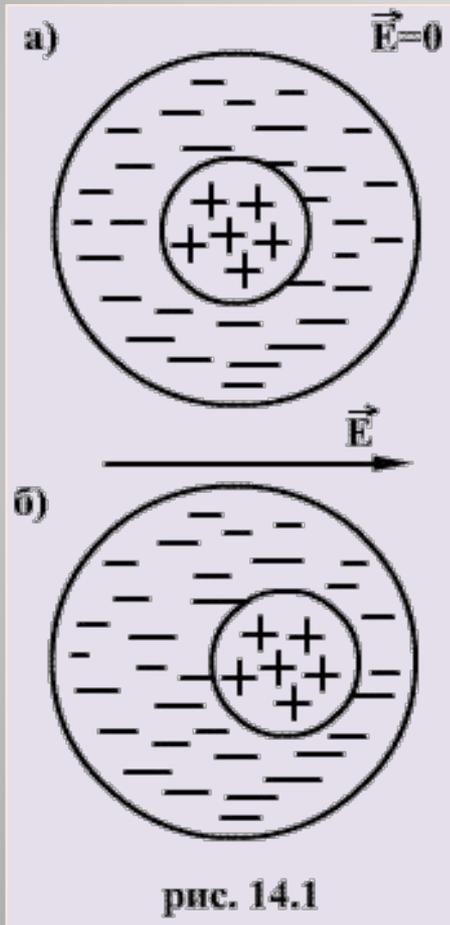
$$\rho_{\text{д}} > \rho_{\text{пл}} > \rho_{\text{пр}}.$$

- Термин “диэлектрики” был введен Фарадеем.
- Диэлектриком является любая среда (газ, жидкость или твердое тело), в которой длительное время может существовать электрическое поле.
- В отличие от проводников в диэлектриках отсутствуют свободные электрические заряды.
- Т.е. диэлектриками называют тела в которых заряды не могут перемещаться из одной части в другую

# Типы диэлектриков

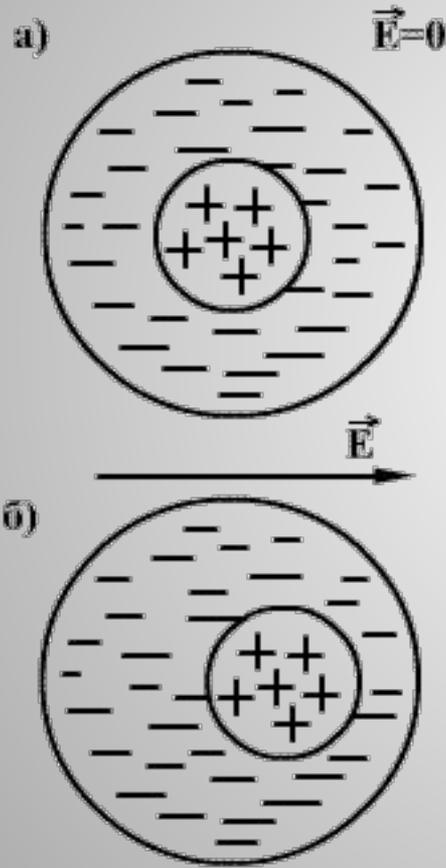
- Атомы и молекулы диэлектрика содержат равные количества положительных и отрицательных микроскопических зарядов и в целом электрически нейтральны.
- В зависимости от строения все диэлектрические вещества можно разделить на три большие группы.

# Типы диэлектриков



- К первой группе принадлежат диэлектрики, состоящие из молекул, у которых “центры тяжести” положительных и отрицательных зарядов совпадают (например, бензол, парафин и др).
- Молекулы таких диэлектриков в отсутствие внешнего электрического поля не обладают дипольным моментом .

# Типы диэлектриков



- Во внешнем электрическом поле “центры тяжести” положительных и отрицательных (электронных оболочек) зарядов молекулы смещаются в противоположные стороны на некоторое расстояние  $L$ , малое по сравнению с размерами молекулы.
- Каждая молекула при этом становится полярной (дипольной), подобной электрическому диполю и приобретает дипольный электрический момент  $\vec{p} = qL$ .
- Такого рода поляризация называется **электронной**.

# Типы диэлектриков

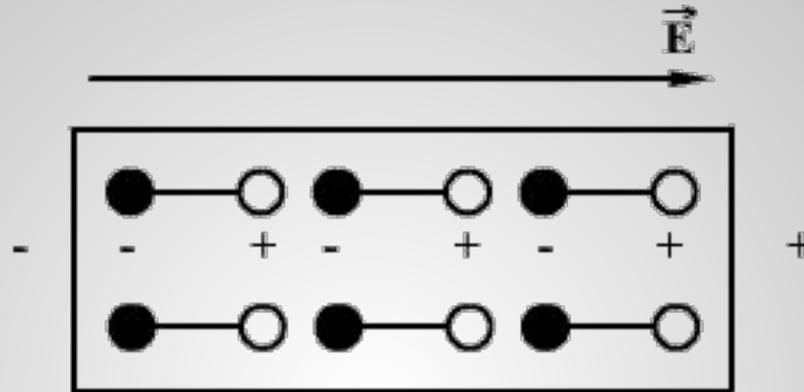


рис. 14.2

- При помещении диэлектрика в электрическое поле все неполярные молекулы превращаются в дипольные, расположенные цепочками вдоль силовых линий поля .
- В результате торцы диэлектрика приобретают разноименные заряды - диэлектрик поляризуется.
- Степень электронной поляризации зависит от его свойств и от величины напряженности поля .

# Типы диэлектриков

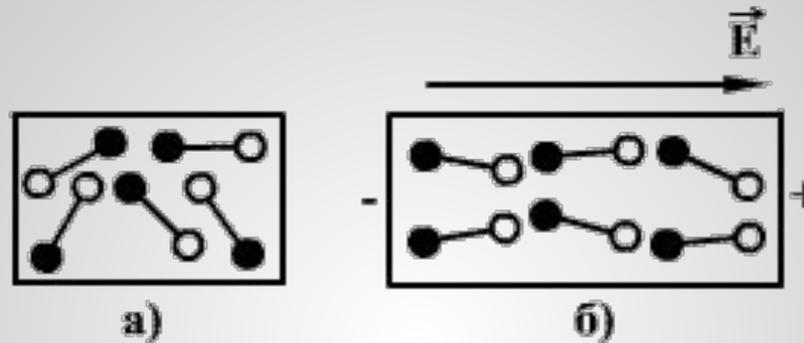


рис. 14.3

- Вторую группу диэлектриков составляют такие вещества, как вода, нитробензол и др.
- В таких веществах молекулы всегда (и в отсутствие внешнего поля) несимметричны, т.е. являются дипольными.
- Благодаря тепловому движению дипольные молекулы расположены в диэлектрике беспорядочно (рис а) .
- Поэтому диэлектрик в целом оказывается не поляризованным.

# Типы диэлектриков

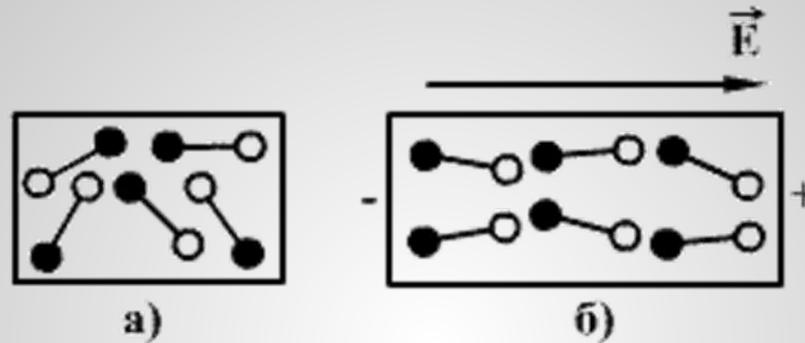
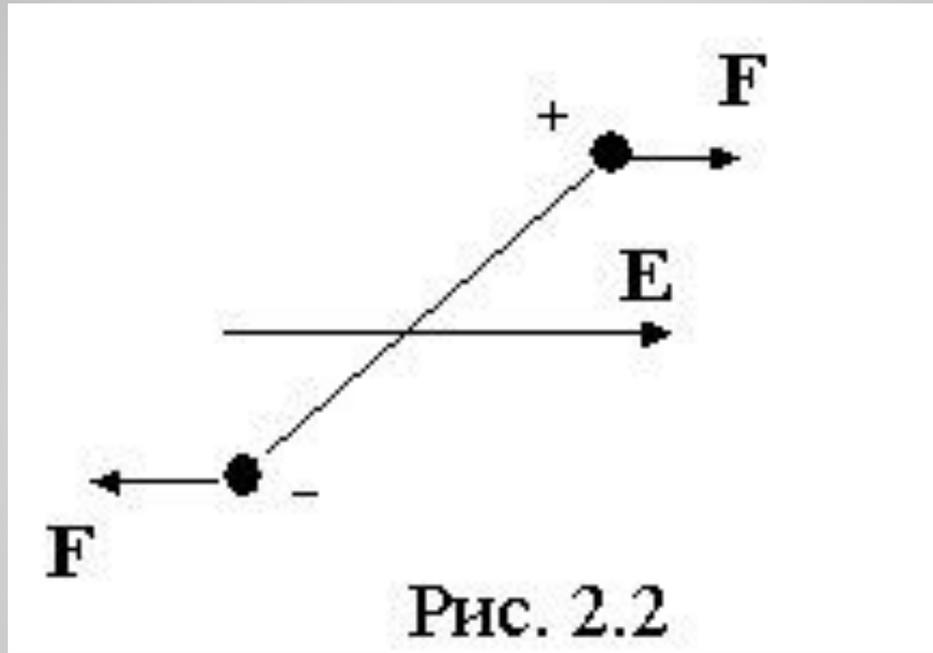


рис. 14.3

- Под влиянием электрического поля все дипольные молекулы диэлектрика повернутся так, что их оси расположатся приблизительно вдоль силовых линий поля (рис.14.3 б).
- Такого рода поляризация называется **ориентационной** или **дипольной поляризацией**.
- Полной ориентации препятствует тепловое движение.

# Типы диэлектриков



- Если поместить диэлектрик во внешнее электрическое поле, то на молекулу-диполь будет действовать момент сил (рис. 2.2), стремящийся ориентировать ее дипольный момент в направлении напряженности поля. Однако полной ориентации не происходит, поскольку тепловое движение стремится разрушить действие внешнего электрического поля.

# Типы диэлектриков

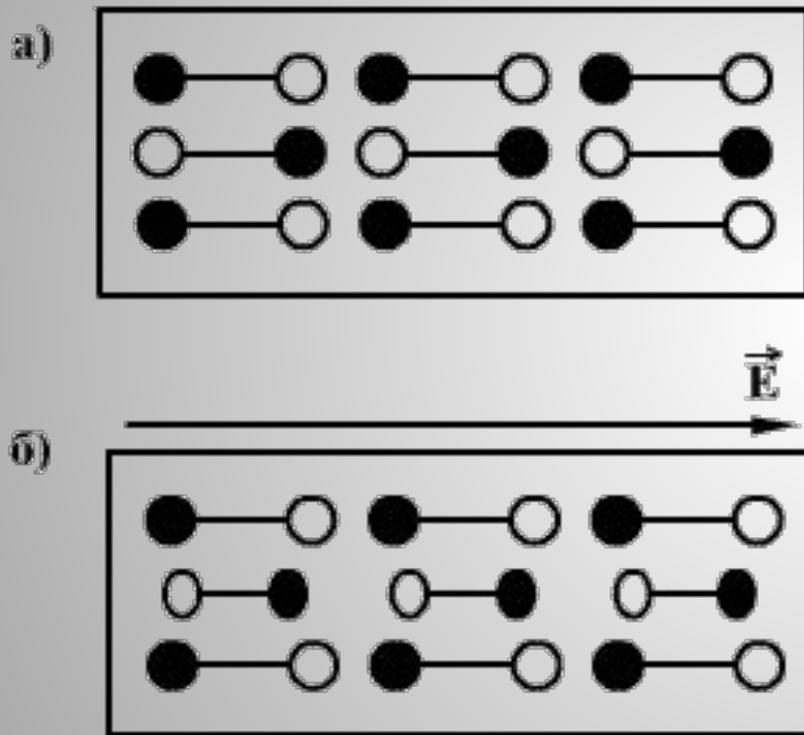


рис. 14.4

- К третьей группе относятся кристаллические диэлектрики, имеющие ионное строение (хлористый натрий, хлористый калий и др).
- У кристаллических диэлектриков с ионной решеткой каждая пара соседних разноименных ионов подобна диполью (рис. 14.4.а)

# Типы диэлектриков

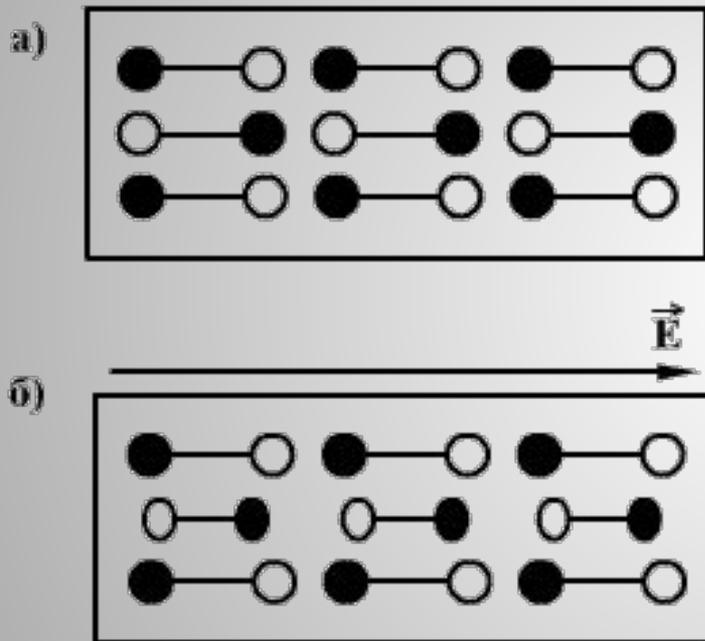


рис. 14.4

- В электрическом поле эти диполи деформируются: удлинятся, если их оси направлены по полю, и укорачиваются, если оси направлены против поля.
- В результате диэлектрик поляризуется.

# Поляризация

- Введем величину, характеризующую степень поляризации диэлектрика. Если просуммировать все дипольные моменты диэлектрика в единице объема, то получим вектор поляризации

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{P}_i}{\Delta V}.$$

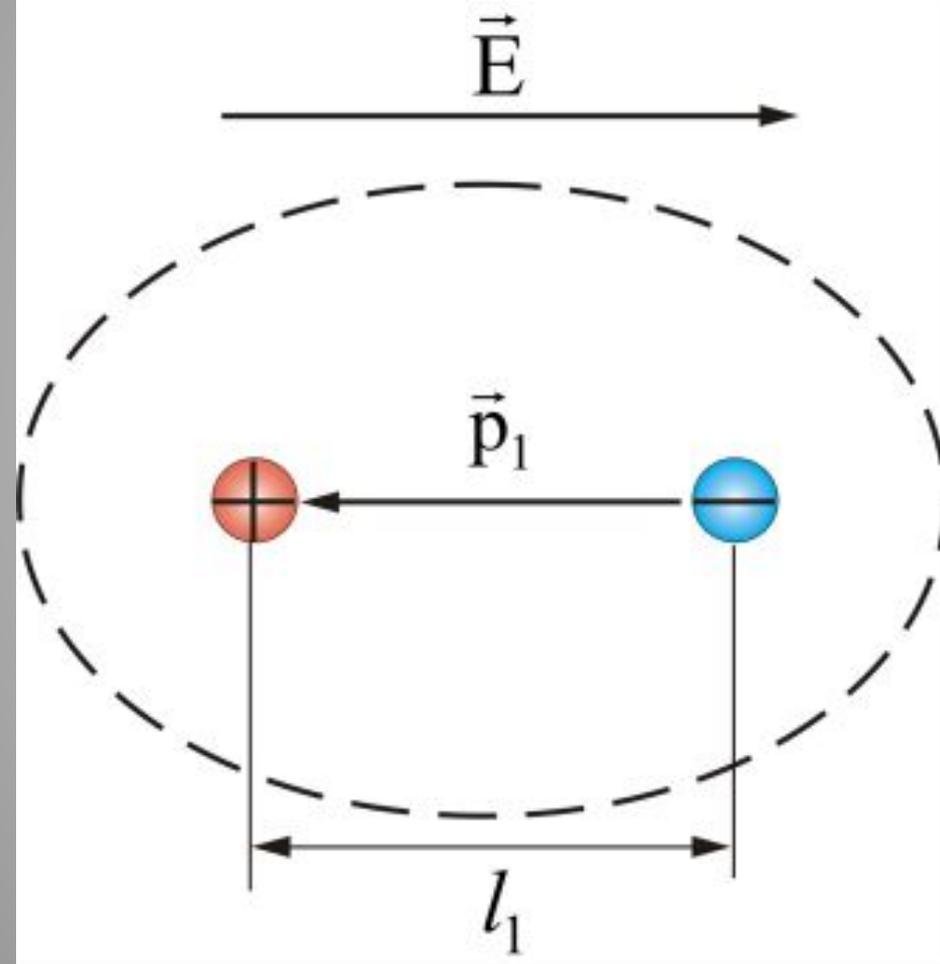
# Поляризация

- Для определения степени поляризации в точке необходимо  $\Delta V$  устремить к нулю.
- Вектор направлен вдоль электрического поля, в котором находится диэлектрик.
- Для не слишком сильных полей можно принять, что величина вектора поляризации пропорциональна величине напряженности поля, т.е.  $P \sim E$ .
- В системе СИ: 
$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E},$$
- где  $\chi$  (хи) - называется диэлектрической восприимчивостью вещества и зависит от его строения.

# Поляризация

- *Смещение электрических зарядов вещества под действием электрического поля называется **поляризацией**.*
- *Способность к поляризации является основным свойством диэлектриков.*
- *Главное в поляризации – смещение зарядов в электростатическом поле.*

# Поляризация

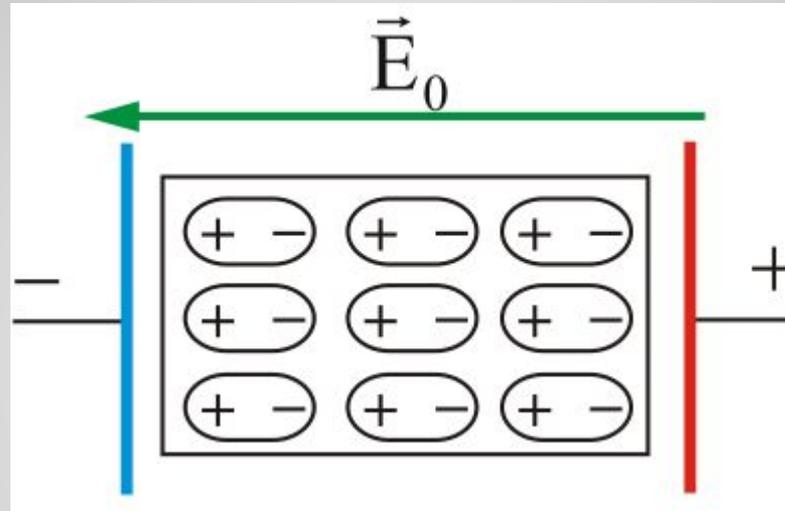


- В результате, каждая молекула или атом образует электрический момент  $p$  (рис.)

$$p_1 = ql_1 \text{ или } \vec{p}_1 = q\vec{l}_1.$$

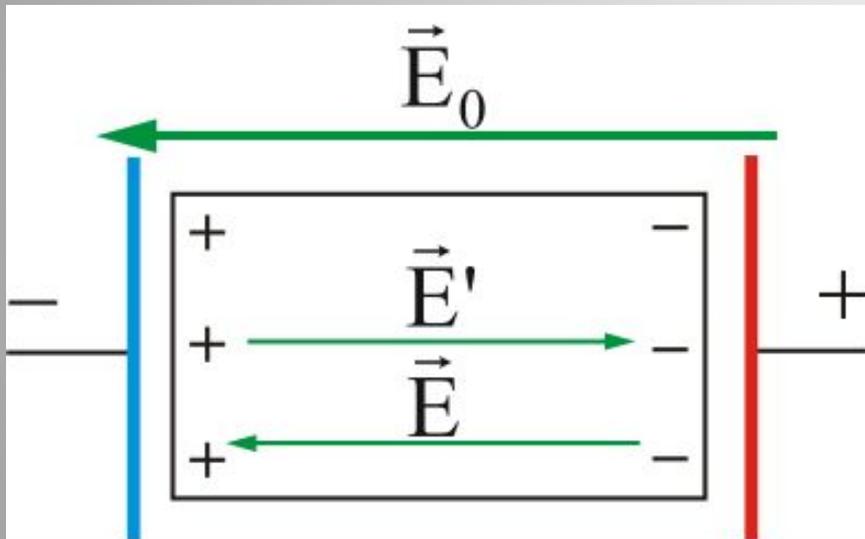
- :

# Поляризация



- *Внутри диэлектрика электрические заряды диполей компенсируют друг друга.*
- *Но на внешних поверхностях диэлектрика, прилегающих к электродам, появляются заряды противоположного знака (поверхностно связанные заряды).*

# Поляризация



- Обозначим  $E'$  - электростатическое поле связанных зарядов. Оно направлено всегда против внешнего поля.
- Следовательно,  $E_0$  - результирующее электростатическое поле внутри диэлектрика
- $$E = E_0 - E'. \quad (1)$$
- Электростатическое поле внутри диэлектрика всегда меньше внешнего поля.

# Поляризация

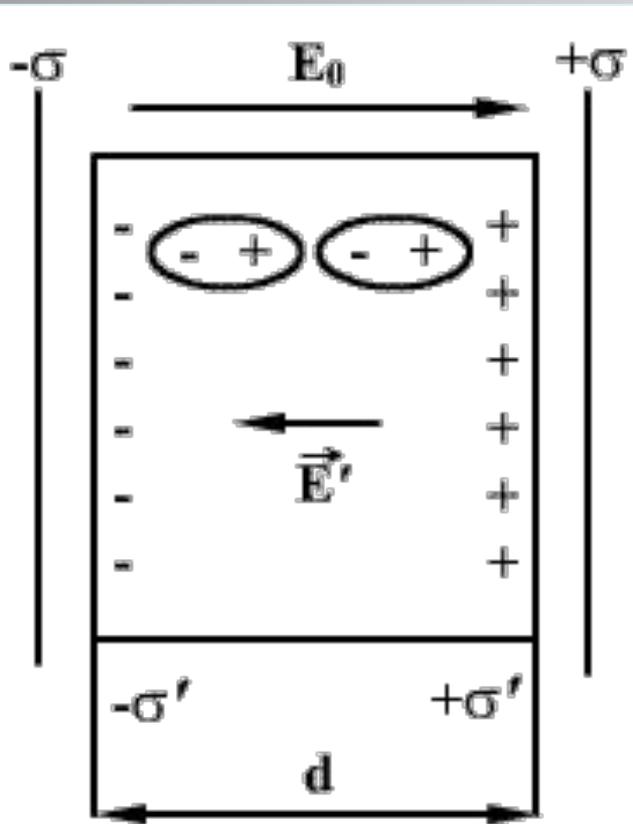


рис. 14.5

- В результате поляризации на гранях диэлектрика, обращенных к пластинам конденсатора, концы молекулярных диполей окажутся нескомпенсированными соседними диполями.
- Поэтому на правой грани, обращенной к отрицательной пластине конденсатора, окажется избыток положительного заряда с некоторой поверхностной плотностью  $+\sigma'$ .
- На противоположной стороне диэлектрика  $\sigma'$  Эти так называемые поляризационные, или связанные заряды не могут быть переданы соприкосновением другому телу без разрушения молекул диэлектрика, т.к. они обусловлены самими поляризованными молекулами.

# Поляризация

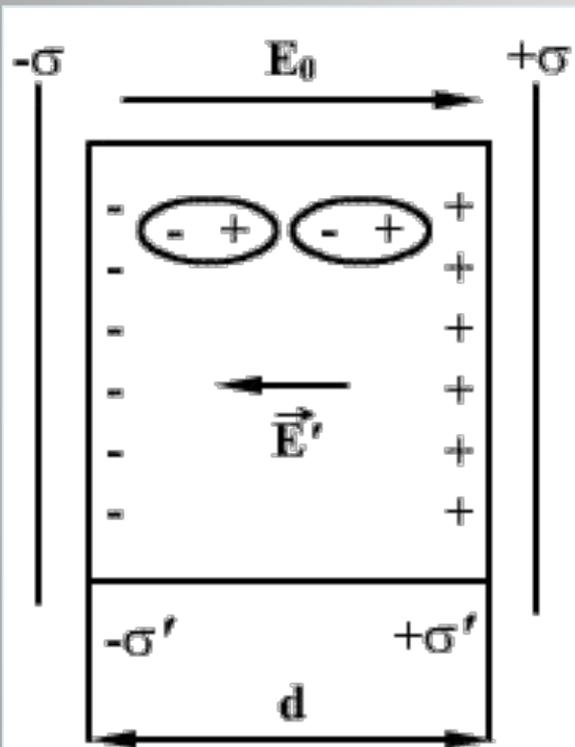


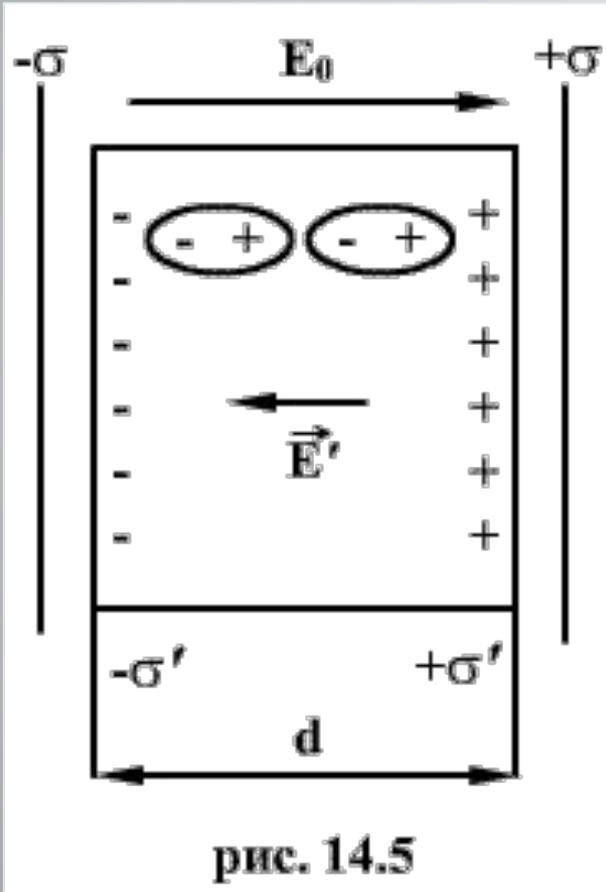
рис. 14.5

- Для определения  $E'$  применим формулу вычисления напряженности ( $E'$ ) конденсатора

$$E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0} \quad (2)$$

- Свяжем  $\sigma'$  с вектором поляризации  $P$ .
- Для этого определим полный дипольный момент (во всем объеме) диэлектрика.
- Осуществим это двумя способами:

# Поляризация



- Осуществим это двумя способами:
- С одной стороны  $P$  по определению дипольный момент единицы объема и если умножим на  $V$ , получим полный дипольный момент
- $$P_V = PV = PSd, \quad (3)$$
- где  $S$  - площадь пластины конденсатора.

# Поляризация

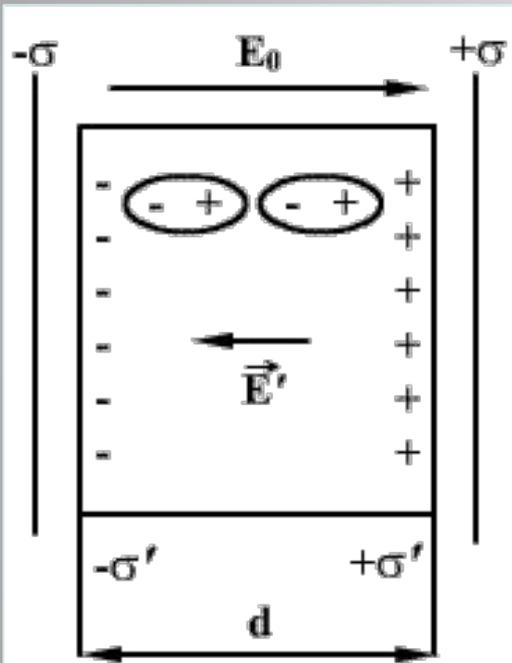


рис. 14.5

- С другой стороны рассмотрим диэлектрик как большой диполь, у которого с одной стороны заряд  $\sigma'$ , а с другой  $-\sigma'$  и расстояние  $d$ .

Отсюда 
$$P_V = \sigma' S d, \quad (4)$$

- Приравнявая (3) и (4), получим

$$\sigma' = P.$$

- Подставляя в (2), и затем результат в (1), получим 
$$E = E_0 - \frac{P}{\epsilon_0}.$$

# Поляризация

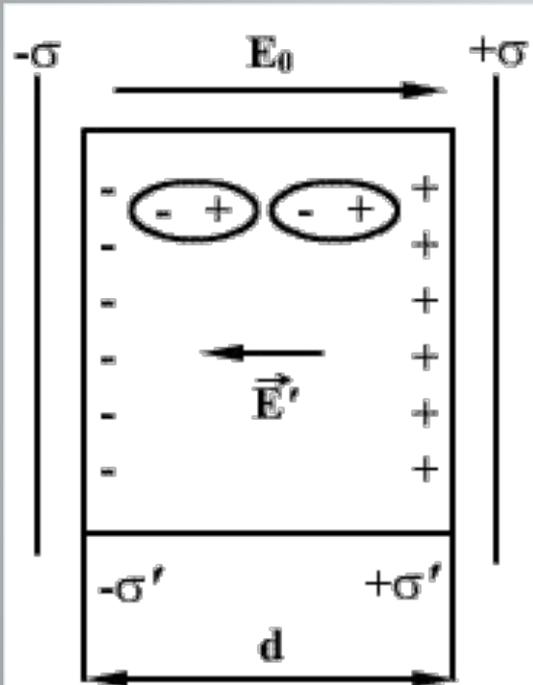


рис. 14.5

- Учитывая, что

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E},$$

$$E = \frac{E_0}{1 + \chi}.$$

Величина

$$\epsilon = 1 + \chi$$

называется диэлектрической проницаемостью или относительной диэлектрической проницаемостью.

Диэлектрическая проницаемость показывает во сколько раз уменьшается напряженность в диэлектрике по сравнению с напряженностью в вакууме.

# Поляризация

- Диэлектрическая восприимчивость  $\chi$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ ,
- т.е. с ростом температуры диэлектрические свойства ухудшаются.
- Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха и большинства других газов в нормальных условиях близка к единице (в силу их низкой плотности).
- Для большинства твёрдых или жидких диэлектриков относительная диэлектрическая проницаемость лежит в диапазоне от 2 до 8 (для статического поля).
- Диэлектрическая постоянная воды в статическом поле достаточно высока — около 80. Велики её значения для веществ с молекулами, обладающими большим электрическим диполем.
- Относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков составляет десятки и сотни тысяч.

# Электрическое смещение

- *Основной прикладной задачей электростатики является расчет электрических полей, создаваемых заряженными телами.*
- В частном случае такой расчет можно произвести с помощью закона Кулона и принципа суперпозиции электрического поля.
- Но в ряде случаев эта задача сильно усложняется. Например: 1) большое число точечных зарядов, создающих электростатическое поле или распределенный заряд на теле сложной формы;
- 2) электрическое поле создается в среде с неоднородным диэлектриком.

# Электрическое смещение

- Во втором случае вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$  зависит от диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon$ , в которой создано поле

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

- где  $E_0$  – напряженность электрического поля в вакууме;
- $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

# Электрическое смещение



- В связи с этим при переходе через границу раздела сред напряженность электрического поля и характеризующая его плотность силовых линий будут скачкообразно меняться (рис. 2.1).
- Картина будет еще сложнее в случае неоднородного электрического поля и диэлектрика произвольной формы.

# Электрическое смещение

- Для облегчения расчета электрических полей в неоднородных диэлектриках вводится понятие **вектора электрического смещения** или **вектора электрической индукции**  $\vec{D}$
- $$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$$
- Направление вектора электрического смещения  $\vec{D}$
- совпадает с направлением вектора напряженности  $\vec{E}$ .  
Согласно определению вектора электрического смещения

$$\epsilon_0 \epsilon_1 E_1 = \epsilon_0 \epsilon_2 E_2 = D$$

# Электрическое смещение

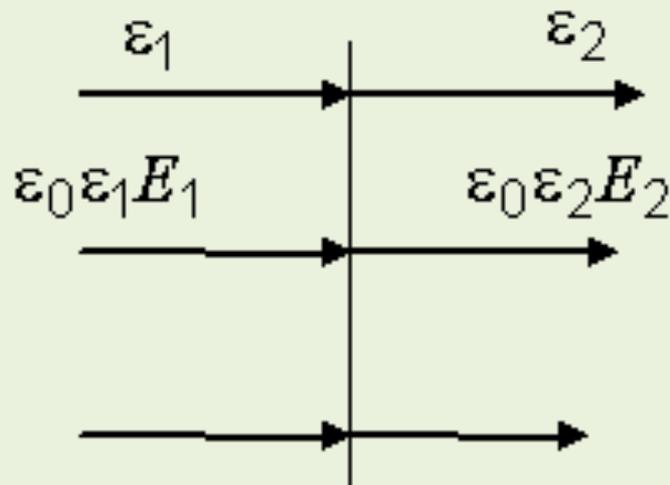
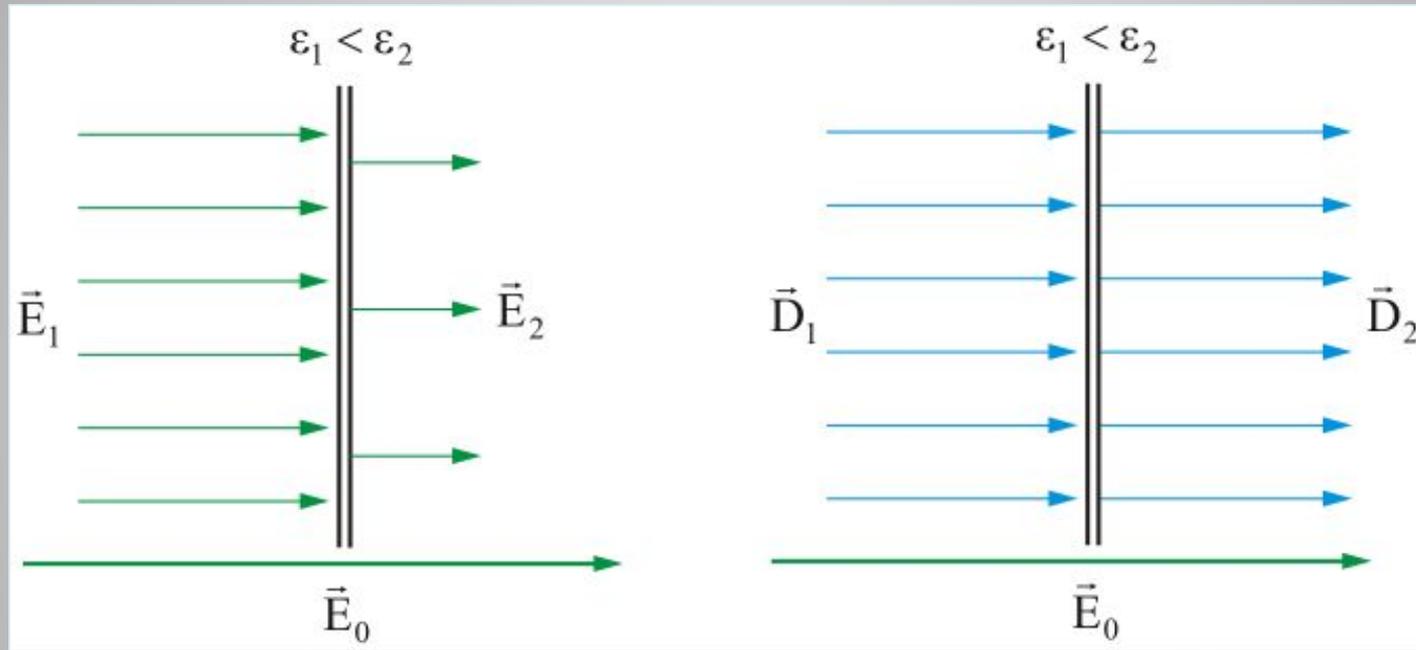


Рис. 2.2. Силовые линии вектора электрического смещения  
( $\epsilon_1 < \epsilon_2$ ,  $\epsilon_0\epsilon_1 E_1 = \epsilon_0\epsilon_2 E_2$ )

- Вектор электрического смещения не зависит от среды, в которой создается электрическое поле, и определяется только зарядами, создающими это поле.
- Графически такое поле представлено на рис. 2.2.
- Как видно из рисунка, силовые линии вектора электрического смещения непрерывны на границе раздела диэлектрика.

# Электрическое смещение



- Линии  $\vec{E}$  могут начинаться и заканчиваться на любых зарядах – свободных и связанных, линии  $\vec{D}$  - только на свободных зарядах.

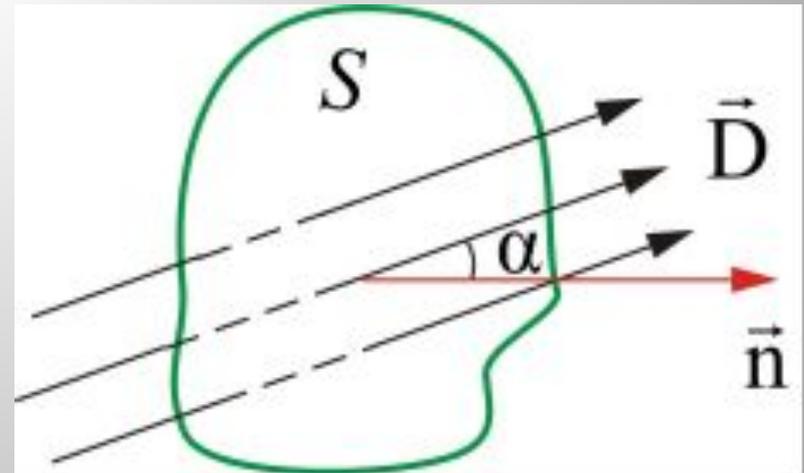
# Поток вектора электрического смещения

## Теорема Гаусса для вектора электрического смещения

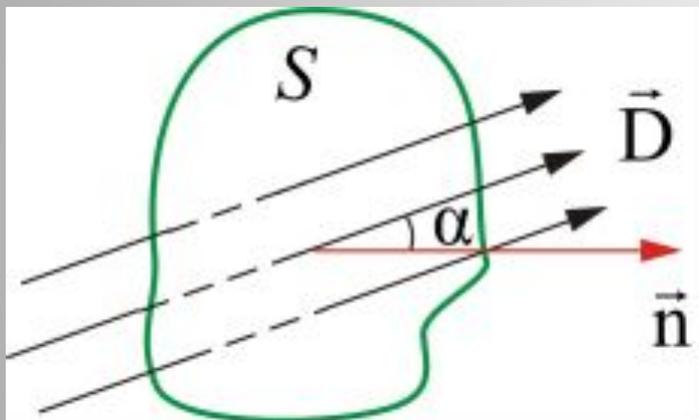
• Аналогично потоку для  $\vec{E}_0$   $\Phi_E = \int_S E_x dS$

• Можно ввести понятие для вектора  $\vec{D}$   $\Phi_D$

Пусть произвольную площадку  $S$  пересекают линии вектора электрического смещения  $\vec{D}$  под углом  $\alpha$  к нормали  $\vec{n}$



# Поток вектора электрического смещения Теорема Гаусса для вектора электрического смещения



- Поток вектора электрического смещения

$$\Phi_D = \int_S D_n dS.$$

- В однородном электростатическом

$$\Phi_D = DS \cos \alpha = D_n S.$$

# Поток вектора электрического смещения

## Теорема Гаусса для вектора электрического смещения

- Теорему Гаусса для вектора электрического смещения  $\vec{D}$  получим из теоремы Гаусса для вектора  $\vec{E}$ .

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{\sum q_k}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$

- Так как  $E_n = \frac{D_n}{\varepsilon_0 \varepsilon}$  ,

- то  $\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \oint_S D_n dS = \frac{\sum q_k}{\varepsilon_0 \varepsilon}$

# Теорема Гаусса для вектора электрического смещения

- Поток вектора  $\vec{D}$  через любую замкнутую поверхность определяется только свободными зарядами, а не всеми зарядами внутри объема, ограниченного данной поверхностью.

$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = \sum q_k.$$

- Это позволяет не рассматривать связанные (поляризованные) заряды, влияющие на  $\vec{E}$  и упрощает решение многих задач.
- В этом смысл введения вектора  $\vec{D}$ .

# Теорема Гаусса для вектора электрического смещения

- Если обозначить объемную плотность свободных зарядов  $\rho$ , а связанных зарядов  $\rho'$ , то присутствие связанных зарядов отразится в теореме Гаусса следующим образом

$$\text{div } \vec{E} = (\rho + \rho') / \epsilon_0$$

- В

дифференциальной

либо  $\text{div } (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \rho$  ме

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V (\rho + \rho') dV$$

или  $\text{div } \vec{D} = \rho$

# Сегнетоэлектрики

- В 1920 г. была открыта *спонтанная* (самопроизвольная) *поляризация*.
- Сначала её обнаружили у кристаллов сегнетовой соли ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), а затем и у других кристаллов.
- Всю эту группу веществ называли *сегнетоэлектрики* (или *ферроэлектрики*).
- Детальное исследование диэлектрических свойств этих веществ было проведено в 1930 – 1934 гг. И.В. Курчатовым в ленинградском физическом техникуме.

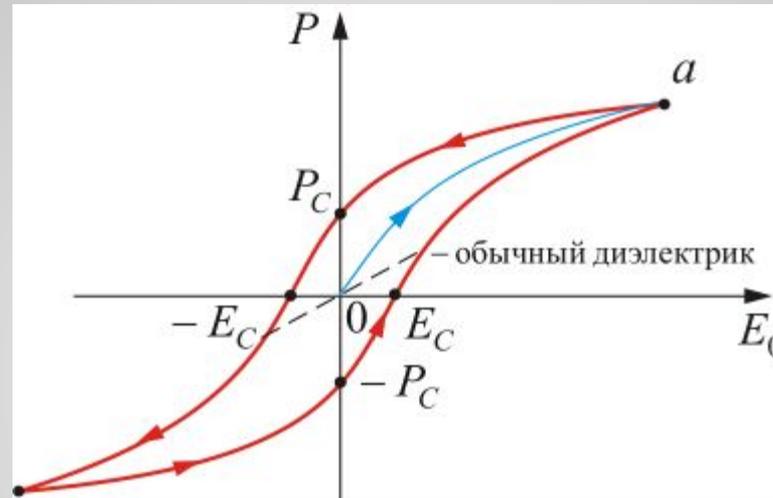
# Сегнетоэлектрики

- Все сегнетоэлектрики обнаруживают резкую анизотропию свойств (сегнетоэлектрические свойства могут наблюдаться только вдоль одной из осей кристалла).
- У изотропных диэлектриков поляризация всех молекул одинакова, у анизотропных – поляризация, и следовательно, вектор поляризации в разных направлениях разные.
- В настоящее время известно несколько сотен сегнетоэлектриков.

# Сегнетоэлектрики

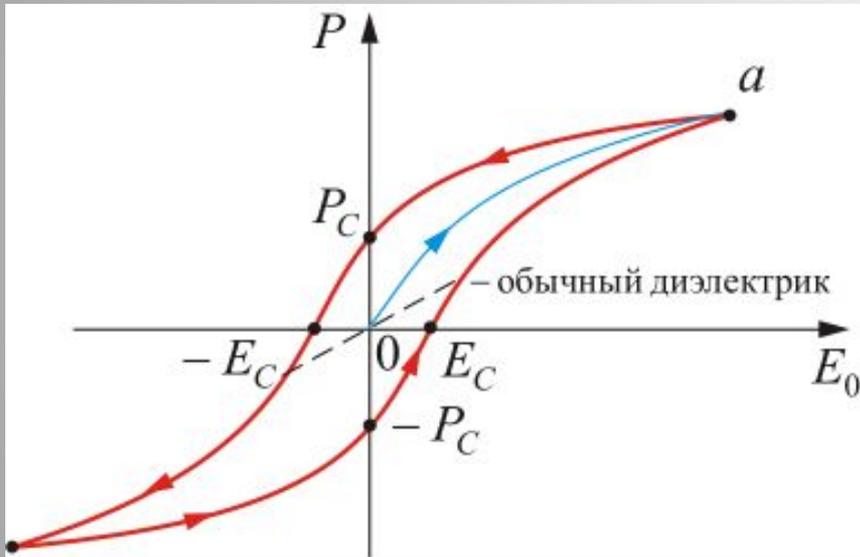
- Рассмотрим **основные свойства сегнетоэлектриков**:
- 1. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  в некотором температурном интервале велика (  $\epsilon \sim 10^4$  ).
- 2. Значение  $\epsilon$  зависит не только от внешнего поля  $E_0$ , но и от предыстории образца.
- 3. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  (а следовательно, и  $P$ ) – нелинейно зависит от напряженности внешнего электростатического поля (*нелинейные диэлектрики*).

# Сегнетоэлектрики



- Это свойство называется *диэлектрическим гистерезисом*.
- На рисунке изображена кривая поляризации сегнетоэлектрика – петля гистерезиса.

# Сегнетоэлектрики



Здесь точка  $a$  – **состояние насыщения**.

При  $E_0 = 0$ ,  $P \neq 0$ , это говорит о том, что в кристаллах имеется **остаточная поляризованность  $P_C$** ,

чтобы ее уничтожить, необходимо приложить  $E_C$  – **коэрцитивную силу** противоположного направления.

# Сегнетоэлектрики

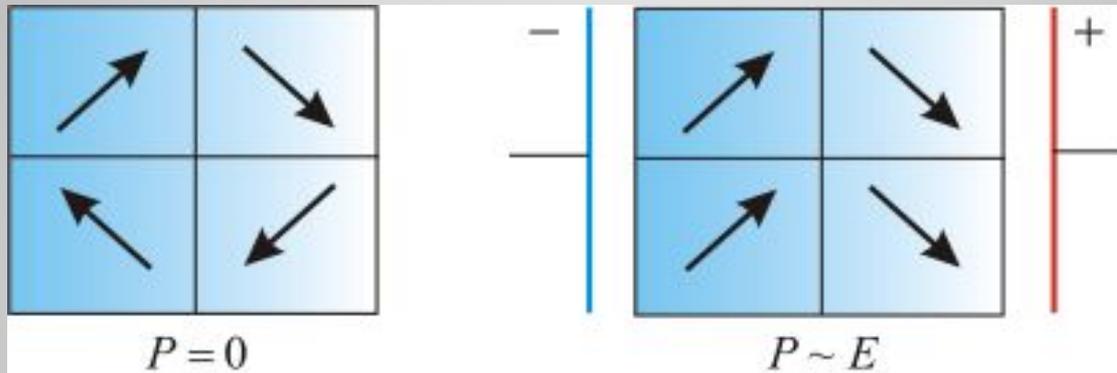
4. Наличие точки Кюри – температуры, при которой (и выше) сегнетоэлектрические свойства пропадают.

При этой температуре происходит фазовый переход 2-го рода.

(Например, титанат бария:  $133^{\circ}\text{C}$ ; сегнетова соль:  $-18 + 24^{\circ}\text{C}$ ; дигидрофосфат калия:  $-150^{\circ}\text{C}$ ; ниобат лития  $1210^{\circ}\text{C}$ ).

Причиной сегнетоэлектрических свойств является самопроизвольная (спонтанная) поляризация, возникающая под действием особо сильного взаимодействия между частицами, образующими вещество.

# Сегнетоэлектрики



- Стремление к минимальной потенциальной энергии и наличие дефектов структуры приводит к тому, что сегнетоэлектрик разбит на **домены**.
- Без внешнего поля  $P$  – электрический импульс кристалла равен нулю (рис. а).
- Во внешнем электростатическом поле домены ориентируются вдоль поля (рис. б).

# Сегнетоэлектрики

- Сегнетоэлектрики используются для изготовления многих радиотехнических приборов, например, варикондов – конденсаторов с изменяемой емкостью.
- Среди диэлектриков есть вещества, называемые **электреты** – это диэлектрики, длительно сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего электростатического поля.

# Сегнетоэлектрики

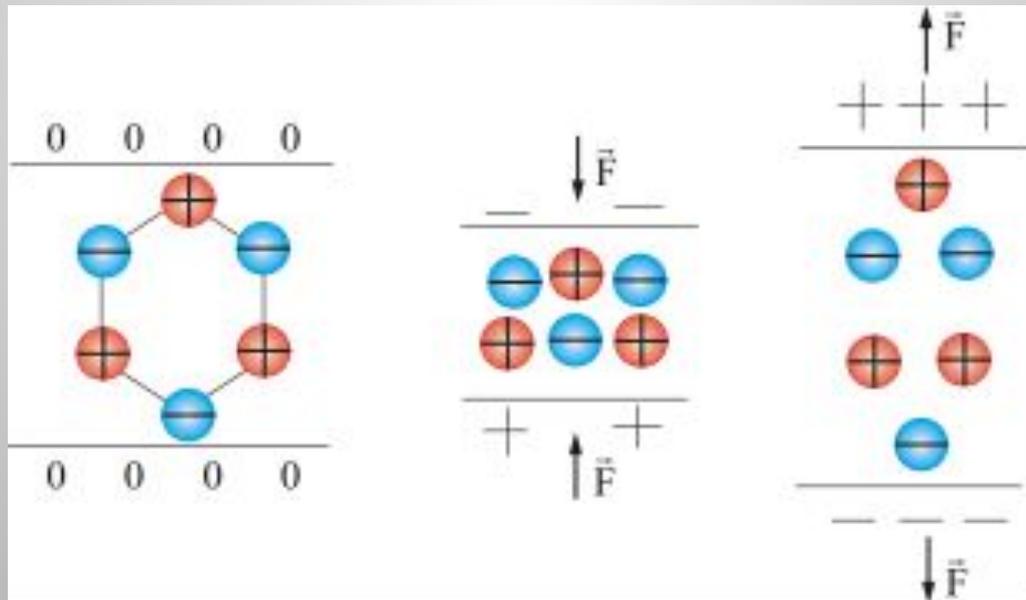
- Электреты являются формальными аналогами постоянных магнитов, создающих вокруг себя магнитное поле. Принципиальная возможность получения таких материалов была предсказана Фарадеем.
- Термин «электрет» был предложен Хевисайдом в 1896 году по аналогии с английским «magnet» – постоянный магнит, а первые электреты получены японским исследователем Егучи в 1922 году. Егучи охладил в сильном электрическом поле расплав карнаубского воска и канифоли. Электрическое поле сориентировало полярные молекулы, и после охлаждения материал остался в поляризованном состоянии. Для уточнения технологии такие материалы

# Пьезоэлектрики

- Некоторые диэлектрики поляризуются не только под действием электростатического поля, но и под действием механической деформации. Это явление называется *пьезоэлектрическим эффектом*.
- Явление открыто братьями Пьером и Жаком Кюри в 1880 году.
- Если на грани кристалла наложить металлические электроды (обкладки), то при деформации кристалла с помощью силы на обкладках возникнет разность потенциалов. Если замкнуть обкладки, то потечет ток.

# Пьезоэлектрики

- Продемонстрировать пьезоэффект можно рисунком 4.8.
- Сейчас известно более 1800 пьезокристаллов.
- Все сегнетоэлектрики обладают пьезоэлектрическими свойствами.



# Сегнетоэлектрики

- Возможен и обратный пьезоэлектрический эффект. Возникновение поляризации сопровождается механическими деформациями.
- Если на пьезоэлектрический кристалл подать напряжение, то возникнут механические деформации кристалла, причем, деформации будут пропорциональны приложенному электростатическому полю  $E_0$ .

# Пироэлектрики

- Кроме сегнетоэлектриков, спонтанно поляризованными диэлектриками являются *пироэлектрики* (от греч. *pur* – огонь).
- Пироэлектрики – это кристаллические диэлектрики, обладающие спонтанной электрической поляризацией во всей температурной области, вплоть до температуры плавления.
- В отличие от сегнетоэлектриков в пироэлектриках поляризация  $P$  линейно зависит от величины внешнего электрического поля, т.е. пироэлектрики являются линейными диэлектриками.

# Пироэлектрики

- *Пироэлектричество* – появление электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов при их нагревании или охлаждении.
- При нагревании один конец диэлектрика заряжается положительно, а при охлаждении он же – отрицательно. Появление зарядов связано с изменением существующей поляризации при изменении температуры кристаллов. Типичный пироэлектрик – турмалин

# Пироэлектрики

- Все пироэлектрики являются пьезоэлектриками, но не наоборот.
- Некоторые пироэлектрики обладают сегнетоэлектрическими свойствами.
- Из сказанного следует, что понятие «пироэлектрик» является более общим, чем «сегнетоэлектрик».
- Можно сказать, что сегнетоэлектрики есть пироэлектрики с реориентируемой внешним полем поляризацией.

# Применение диэлектриков

- В пьезоэлектриках *поляризация  $P$  линейно зависит* от величины внешнего электростатического поля , т.е. пьезоэлектрики являются *линейными диэлектриками*.
- В качестве примеров использования различных диэлектриков можно привести следующие:
- сегнетоэлектрики – электрические конденсаторы, ограничители предельно допустимого тока, позисторы, запоминающие устройства;
- пьезоэлектрики – генераторы ВЧ и пошаговые моторы, микрофоны, наушники, датчики давления, частотные фильтры, пьезоэлектрические адаптеры;
- пьезоэлектрики – позисторы, детекторы ИК-излучения, болометры (датчики инфракрасного излучения), электрооптические модуляторы.