

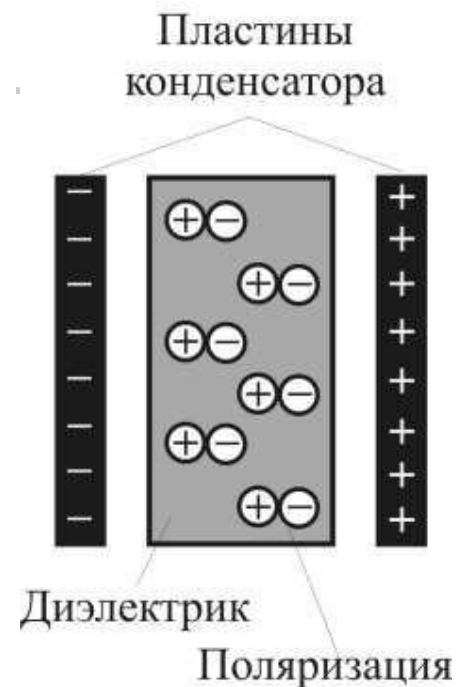
# Поляризация диэлектриков

---

# 1. Относительная

## диэлектрическая проницаемость

- **Поляризация** представляет собой обратимое смещение электрически заряженных частиц, входящих в состав диэлектрика, при приложении к нему электрического поля.
- Емкость конденсатора, имеющего на пластинах заряд  $Q$  и заполненного вакуумом,  $C_0 = Q / U_0$ , где  $U_0$  – разность потенциалов. После того, как в зазор будет вставлен диэлектрик,  $C = Q / U = \epsilon C_0$ .
- Величину  $\epsilon = E_0 / E$  ( $E$  – напряженность электрического поля) называют **относительной диэлектрической проницаемостью**, она зависит от свойств диэлектрика и характеризует **уменьшение силы взаимодействия электрических зарядов в диэлектрике по сравнению с вакуумом.**



# 2. Вектор поляризации

- При наложении электрического поля в диэлектрике возникают элементарные электрические дипольные моменты  $p_j$ .
- **Вектор поляризации** представляет собой объемную плотность электрического дипольного момента диэлектрика:  $P = (\sum p_j) / V$ .
- При поддержании постоянной разности потенциалов и введении в конденсатор изотропного диэлектрика возрастает **электрическая индукция (электрическое смещение)  $D$** :  $D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 \epsilon E = \epsilon D_0$ .
- $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Кл / (В · м) – **электрическая постоянная**.
- Вектора  $E$  и  $D$  направлены от положительного заряда к отрицательному. Вектор  $P$  направлен от отрицательного заряда к положительному. Векторы  $E$ ,  $D$  и  $P$  в изотропных диэлектриках имеют одно и то же направление.
- $P = \chi_e \epsilon_0 E = \alpha E$ ,  $\chi_e = \epsilon - 1$ , где  $\chi_e$  – **диэлектрическая восприимчивость**;  $\alpha$  – **поляризуемость**.
- В анизотропных диэлектриках диэлектрическая проницаемость является симметричным тензором второго ранга  $\epsilon_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ).

# 3. Механизмы поляризации



А.В. Шишкин,  
АЭТУ, НГТУ

08/14/2023

4

# 4. Упругая и тепловая поляризации



- Если частицы в диэлектрике связаны достаточно жестко, то силы, стремящиеся возвратить в исходное положение смещенные электрическим полем заряды, носят квазиупругий характер. Возникающие смещения обычно невелики. Такая поляризация называется **упругой (деформационной)** ( $\tau_r = 10^{-12} \div 10^{-16}$  с).
- В случае слабой связи между частицами на поляризации сказывается их тепловое движение. Под действием электрического поля за счет тепловой энергии при смещении частицы преодолевают потенциальные барьеры. Возникающие смещения достаточно велики:  $\sim 0,5$  нм. После выключения поля вследствие дезориентирующего влияния теплового движения система возвращается (релаксирует) в исходное положение более медленно ( $\tau_r \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$  с), чем при упругой поляризации. Такая поляризация называется **тепловой (прыжковой, релаксационной)**.



# 5. Спонтанная поляризация

---

- В некоторых диэлектриках происходит самопроизвольная ориентация диполей (**спонтанная поляризация**), наблюдаемая внутри отдельных областей (**доменов**) в отсутствие электрического поля. Спонтанная поляризация имеет место у материалов, называемых **сегнетоэлектриками**. В отсутствие электрического поля электрические моменты доменов направлены беспорядочно и компенсируют друг друга. При наложении внешнего поля моменты ориентируются по полю, приводя к аномально большим значениям диэлектрической проницаемости.

- **При релаксационной и спонтанной поляризациях имеют место затраты энергии, рассеиваемой в диэлектриках в виде тепла.**

08/14/2023

А.В. ШИШКИН,  
АЭТУ, НГТУ

6

# 6. Миграционная поляризация

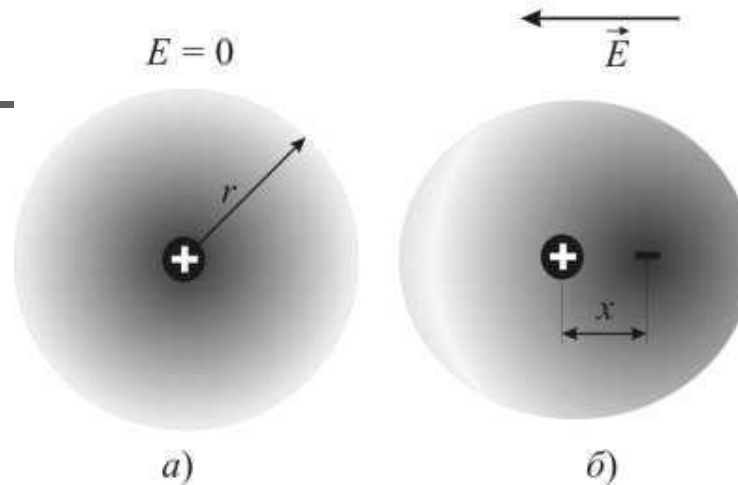
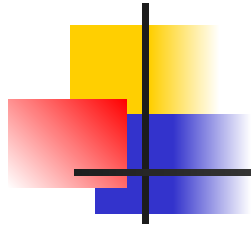
К макроскопической поляризации относят **миграционную**, или **объемно-зарядную**, **поляризацию**. Она характерна для неоднородных диэлектриков. Накопление электрических зарядов на границах неоднородностей (слоев, пор, включений) приводит к объемно-зарядной поляризации. Эта поляризация существенно повышает электрическую емкость конденсатора, содержащего неоднородный диэлектрик. Величина смещения зарядов при миграционной поляризации может составлять макроскопическую величину: примерно 1 мкм.

$\tau_r = 10^{-5} - 10^{-4} \text{ с}$

А.В. Шишкин,  
АЭТУ, НГТУ

# 7. Виды упругой поляризации

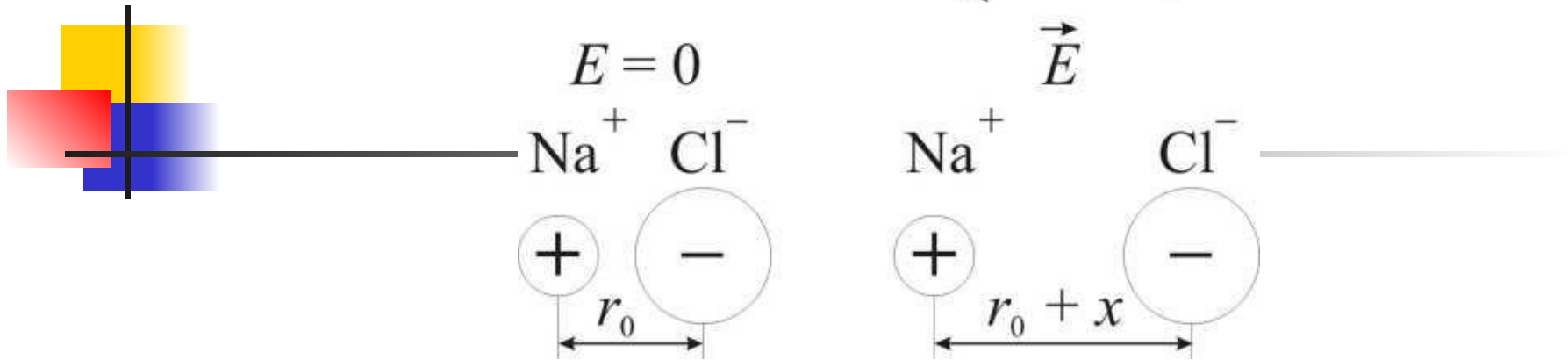
## 7.1. Электронная



- **Электронная упругая поляризация** наблюдается во всех диэлектриках независимо от их агрегатного состояния. Под действием электрического поля ядра атомов и электронные оболочки смещаются друг относительно друга.
- Время установления электронной упругой поляризации очень мало:  $10^{-17} \div 10^{-16}$  с, поэтому она успевает устанавливаться в высокочастотных полях вплоть до оптических частот.



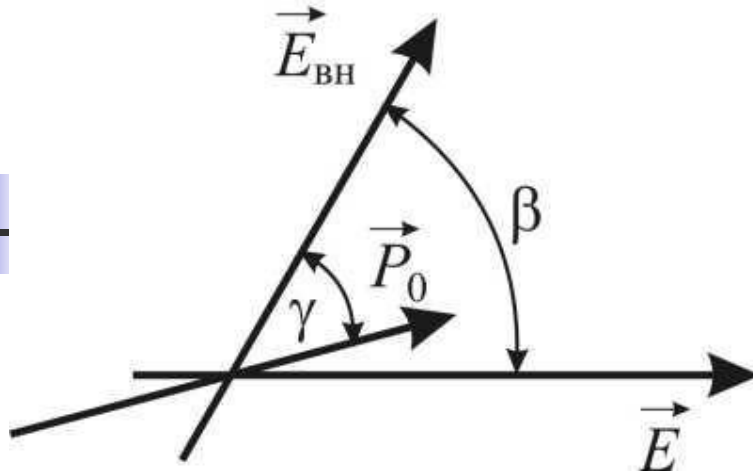
## 7.2. Ионная упругая поляризация



- **Ионная упругая поляризация** имеет место в диэлектриках с **ионным типом химической связи**, например, в кристаллах поваренной соли.
- Время установления ионной поляризации составляет  $\sim 10^{-15} \div 10^{-14}$  с, т. е. такая поляризация успевает устанавливаться и в сверхвысокочастотных полях ( $10^{10} \div 10^{11}$  Гц). Однако в инфракрасной области спектра наблюдается запаздывание в установлении ионной поляризации.

А.В. Шишкин,  
АЭТУ, НГТУ

# 7.3. Дипольная упругая поляризация

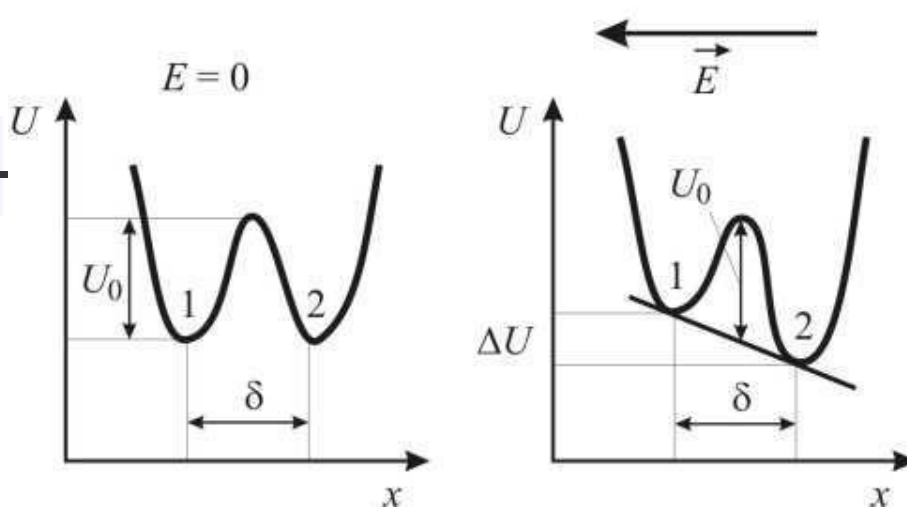


Упругий поворот диполя на угол  $\gamma$  во внешнем электрическом поле  $E$ , образующем угол  $\beta$  с внутренним полем кристалла  $E_{\text{вн}}$ .

- Когда диполи связаны достаточно жестко (полярные кристаллы), при наложении внешнего электрического поля происходят упругие изменения в их направлении ( $\tau_r = 10^{-12} \div 10^{-14}$  с).
- Поляризуемость зависит от электрического момента каждой молекулы, энергии межмолекулярных связей и направления электрического поля. Она максимальна при  $\beta = 90^\circ$  и  $270^\circ$ . **Когда внутреннее и внешнее поля параллельны, поляризуемость равна нулю. Поэтому вклад упругой дипольной поляризации может обуславливать анизотропию диэлектрической проницаемости.**

# 8. Виды тепловой поляризации

## 8.1. Ионная

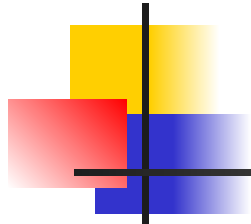


Слабосвязанные ионы в результате тепловых флуктуаций могут переходить из одного положения равновесия в другое, преодолевая потенциальные барьеры.

- **Ионная тепловая поляризация** возможна только в твердых диэлектриках и преобладает в веществах с выраженной нерегулярностью структуры и слабосвязанными ионами: стеклах, **ситаллах** и диэлектрической керамике, из-за высокой концентрации структурных дефектов.

- В зависимости от особенностей структуры диэлектрика и типа дефектов время релаксации ионной тепловой поляризации при комнатной температуре составляет  $\sim 10^{-8} \div 10^{-4}$  с. Поэтому ионная тепловая поляризация может быть основной причиной **диэлектрических потерь** на радиочастотах.

## 8.2. Дипольная тепловая поляризация

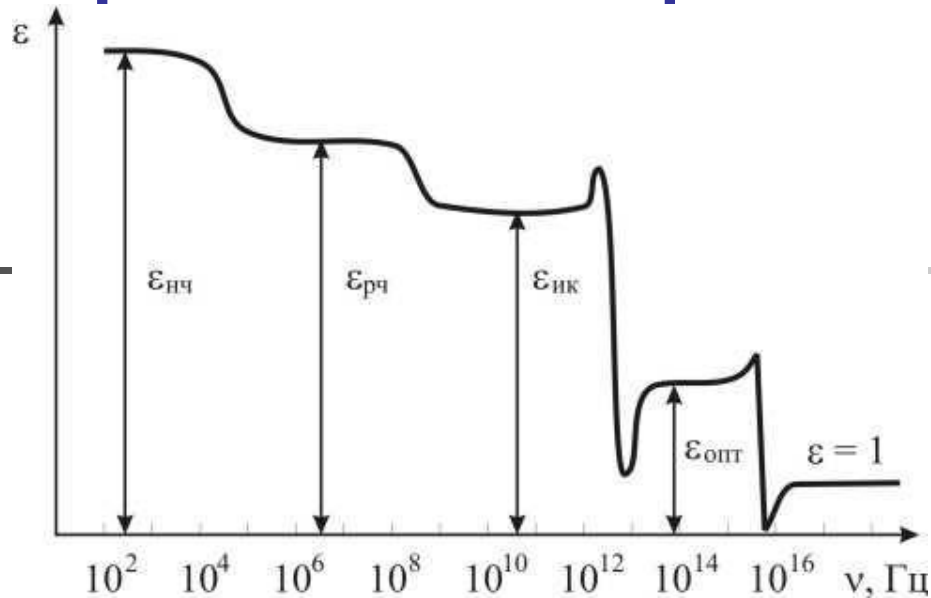


- Слабосвязанные диполи в полярных диэлектриках под действием внешнего электрического поля могут относительно легко поворачиваться. В отсутствие поля в результате теплового движения диполи ориентированы хаотично, и поляризация равна нулю. При наличии поля в процессе хаотического теплового движения часть диполей ориентируется по полю. Вследствие этого возникает новое равновесное состояние – поляризованное. С одной стороны, тепловое движение способствует ориентации диполей по полю, а с другой – препятствует ориентации по полю всех диполей.
- Время релаксации **дипольной тепловой поляризации** экспоненциально зависит от температуры, уменьшаясь при нагревании диэлектрика. При комнатной температуре для различных диэлектриков **А.В. Шлишкин**, пределах  $\sim 10^{-10} \div 10^{-4}$  с.

## 8.3. Электронная тепловая поляризация

- **Электронная тепловая поляризация** характерна для твердых диэлектриков, имеющих определенного рода дефекты. Она играет существенную роль в таких технически важных диэлектриках, как рутил  $\text{TiO}_2$ , перовскит  $\text{CaTiO}_3$ , подобных им сложных оксидах титана, циркония, ниобия, тантала, свинца, церия, висмута. Для этих поликристаллических веществ характерна высокая концентрация дефектов кристаллической структуры.
- Пример: в стехиометрическом  $\text{TiO}_2$  атомы Ti имеют валентность 4. При наличии вакансий кислорода, возникают слабосвязанные электроны, и часть атомов Ti становится трехвалентной. В результате теплового движения такие электроны хаотически переходят от одного близко лежащего к вакансии атома Ti к другому, преодолевая определенный потенциальный барьер. При наложении внешнего электрического поля возникает преимущественная направленность перескоков электронов и результирующий дипольный момент.
- Для электронной тепловой поляризации  $\tau_r \sim 10^{-7} \div 10^2$  с.

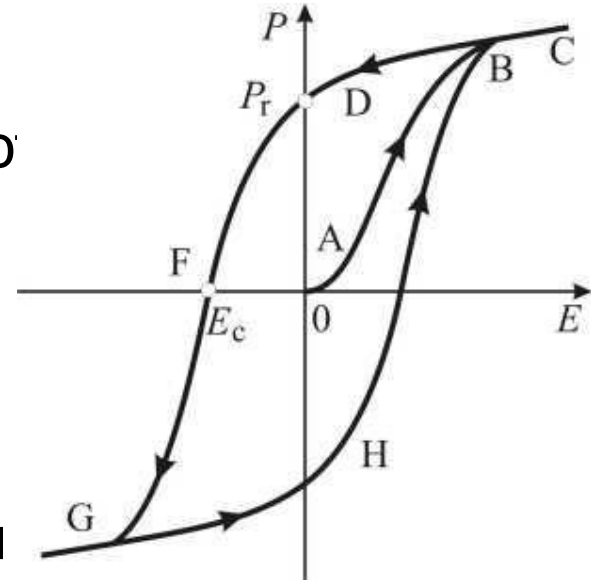
# 9. Диэлектрическая проницаемость



- Для газов, неполярных жидкостей и кубических кристаллов связь между диэлектрической проницаемостью и поляризуемостью описывается уравнением Клаузиуса–Мосотти:  $3\varepsilon_0(\varepsilon - 1) = a(\varepsilon + 1)$ .
- В постоянном электрическом поле все виды поляризации, присущие данному веществу, успевают установиться. В переменном электрическом поле с ростом частоты  $\nu$  начинают запаздывать наиболее медленные виды поляризации, а затем и другие виды. Это приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости с ростом частоты, вплоть до  $\varepsilon = 1$  в полях с частотой  $\nu = 10^{17} \div 10^{18}$  Гц.

# 10. Сегнетоэлектрики

- Сегнетоэлектрики обладают спонтанной поляризацией до определенной температуры  $T_C$ , нелинейной зависимостью поляризации от напряженности электрического поля и способностью к переполяризации.
- Сегнетоэлектрики получили свое название от сегнетоэлектрической соли  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  – минерала, для которого впервые наблюдалась нелинейность зависимости  $P(T)$ .
- Характерной особенностью сегнетоэлектриков является наличие **петли гистерезиса** на зависимости  $P(T)$ .
- Существование **сегнетоэлектрического гистерезиса** связано с наличием **сегнетоэлектрических доменов** – объемных областей, в каждой из которых дипольные моменты ориентированы одинаково.



# 11. Пьезоэлектрики

- **Пьезоэлектрики** – вещества (диэлектрики и полупроводники), в которых при определенных упругих деформациях (напряжениях) возникает вынужденная электрическая поляризация даже в отсутствие электрического поля – **прямой пьезоэффект**.
- Следствие прямого пьезоэффекта – **обратный пьезоэффект** – появление механических деформаций под действием электрического поля.
- При упругой деформации происходит смещение положительных и отрицательных ионов друг относительно друга, что приводит к возникновению электрического момента. Пьезоэффекты наблюдаются только в кристаллах, не имеющих центра симметрии. Смещение частиц в кристаллах, обладающих центром симметрии, не приводит к появлению поляризованного состояния, а происходит электрическая компенсация моментов.
- К пьезоэлектрикам относятся, например, кварц, кристаллы дигидрофосфата калия  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , различные виды пьезокерамики и др. Пьезоэлектрики находят применение в качестве мощных излучателей, приемников и источников ультразвука, стабилизаторов частоты, электрических фильтров высоких и низких частот, трансформаторов напряжения и тока.



# 12. Пироэлектрики

- **Пироэлектрики** – кристаллические диэлектрики, у которых при нагревании или охлаждении происходит изменение поляризации. Пироэлектрики обладают спонтанной поляризацией вдоль полярной оси. При наличии полярной оси отсутствует центр симметрии. Поэтому любой пироэлектрик является пьезоэлектриком, но не наоборот.
- Повышение температуры приводит к разупорядочению диполей за счет теплового движения, а следовательно, к изменению спонтанной поляризации – **первичный пироэффект**. С увеличением температуры изменяются линейные размеры кристалла (тепловое расширение), что также приводит к изменению спонтанной поляризации – **вторичный (ложный) пироэффект**.
- Примеры пироэлектриков: турмалин  $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$ ; керамические:  $\text{BaTiO}_3$ , титанат-цирконат свинца; полимеры: поливинилфторид  $[-\text{CH}_2-\text{CHF}-]_n$ , полиакрилонитрил  $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{CN})-]_n$ . На основе пироэлектриков изготавливают высокочувствительные теплодатчики, термоэлектрические преобразователи, детекторы инфракрасного излучения малой мощности.

# 13. Фотополяризация

- **Фотополяризация** – изменение поляризации под действием интенсивных световых потоков. Фотополяризация наблюдается, например, в кристаллах ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$ .
- Ниобат лития обладает широкой запрещенной зоной  $\sim 3,6$  эВ. В этом случае носители заряда могут генерироваться в запрещенной зоне только за счет фотоионизации примесей. Неравномерное освещение образца приводит к тому, что в освещенной области генерируются носители, которые под действием внутреннего электрического поля перемещаются в неосвещенные области, где захватываются ловушками. В результате возникает перераспределение заряда, приводящее к электрическому полю объемного заряда. Конфигурация такого поля определяется распределением интенсивности светового потока.
- Явление фотополяризации может быть использовано при записи голограмм.

# 14. Электреты

- **Электреты** – диэлектрики, длительное время сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, вызвавшего поляризацию. Они являются источниками электрического поля (аналоги постоянных магнитов).
- Электреты могут быть получены практически из любых полярных диэлектриков: органических полимерных (политетрафторэтилен, он же фторопласт-4, фторлон-4, тефлон  $[-CF_2-CF_2-]_{n'}$ , полипропилен  $[-CH_2CH(CH_3)-]_{n'}$ , поликарбонаты  $[-ORO-C(O)-]_{n'}$ , где R – ароматический или алифатический остаток; полиметилметакрилат, он же плексиглас  $[-CH_2-CH_3(COOCCH_3)-]_n$  и др.); неорганических монокристаллических (кварц, корунд и др.), поликристаллических (керамики, ситаллы и др.), стекол. Наиболее стабильны электреты из пленочных фторосодержащих полимеров.

# 14.1. Получение и применение электретов

■ Стабильные электреты получают:

- нагревая, а затем охлаждая диэлектрик в сильном электрическом поле (**термоэлектреты**);
- освещая в сильном электрическом поле (**фотоэлектреты**);
- подвергая радиоактивному облучению (**радиоэлектреты**);
- поляризацией в сильном электрополе без нагревания (**электроэлектреты**);
- поляризацией в магнитном поле (**магнитэлектреты**);
- при застывании органических растворов в электрическом поле (**криоэлектреты**);
- механической деформацией полимеров (**механоэлектреты**);
- трением (**трибоэлектреты**);
- действием поля коронного разряда (**короноэлектреты**).

■ Со временем у электретов наблюдается уменьшение заряда. Например, у электрета из политетрафторэтилена время жизни  $\sim 10^2 \div 10^4$  лет.

■ Применение: источники электрического поля (электретные телефоны и микрофоны, вибродатчики, генераторы слабых переменных сигналов, электрометры, электростатические вольтметры и др.); чувствительные датчики в дозиметрах, устройствах электрической памяти, для изготовления барометров, пирометров, лазерных фиделитов, пьезостатических