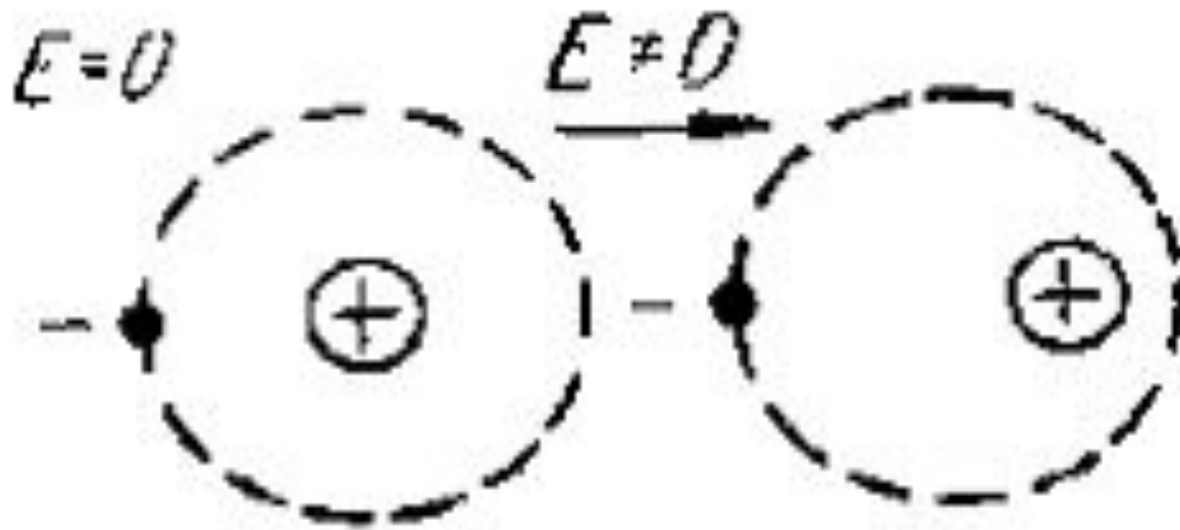


**Поляризацией** называется состояние вещества, при котором элементарный объем диэлектрика приобретает электрический момент.

- **№2. Физические процессы в диэлектриках. электропроводность диэлектриков**
- Содержание лекции: определение явлений поляризации и электропроводности, их количественные характеристики и методы определений.
- 
- Цели лекции: изучить физических явлений в диэлектрике, находящемся в электрическом поле: электропроводность диэлектрика.
- 
- При разработке изделий электропромышленности необходим рациональный выбор ЭТМ. Этот выбор приходится делать из большого количества диэлектрических материалов. Чтобы правильно выбрать нужный материал, надо знать критерии выбора. К ним относятся электрические и физико-химические свойства диэлектриков. К электрическим свойствам относятся относительная диэлектрическая проницаемость, которая является количественной характеристикой явления поляризации, удельное сопротивление, которое определяет электропроводность диэлектриков, тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрические потери и электрическая прочность, пробой диэлектриков.
-

## 2.1 Диэлектрическая проницаемость и ее связь с электрической поляризацией

- 
- Все диэлектрики имеют связанные электрические заряды: электронные оболочки атомов, заряженные отрицательно, и атомные ядра, несущие положительный заряд. При отсутствии электрического поля эти заряды расположены концентрически, поэтому атомы электрически нейтральны. Под действием внешнего электрического поля ( $E$ ), электронные оболочки атомов смещаются в сторону, обратную направлению поля, образуя поляризованные атомы.



- а) нейтральный атом б)  
поляризованный атом.

- Смещение зарядов тем больше, чем больше вектор  $E$ . При снятии электрического поля заряды возвращаются в прежнее состояние. В полярных диэлектриках происходит ориентация диполей в направлении поля; при отсутствии поля диполи дезориентируются вследствие теплового движения. Большинство диэлектриков имеют линейную зависимость электрического смещения от  $E$  поля. Особую группу составляют диэлектрики, у которых поляризованность ( $P$ ) изменяется нелинейно от изменения напряженности  $E$  поля, такие диэлектрики называются сегнетоэлектриками.
- Любой диэлектрик с нанесенными на него электродами, включенный в электрическую цепь, может рассматриваться как конденсатор определенной емкости. Заряд всякого конденсатора равен

- 

- 

$$Q = CU,$$

- 

- где  $U$  - приложенное напряжение;

- $C$  - емкость конденсатора.

- Количество электричества - заряд  $Q$  складывается из 2-х составляющих:  $Q_0$  которое было бы на электродах, если бы их разделял вакуум, и  $Q_д$  которое обусловлено поляризацией диэлектрика, разделяющего электроды.

- 

- 

$$Q = Q_0 + Q_д .$$

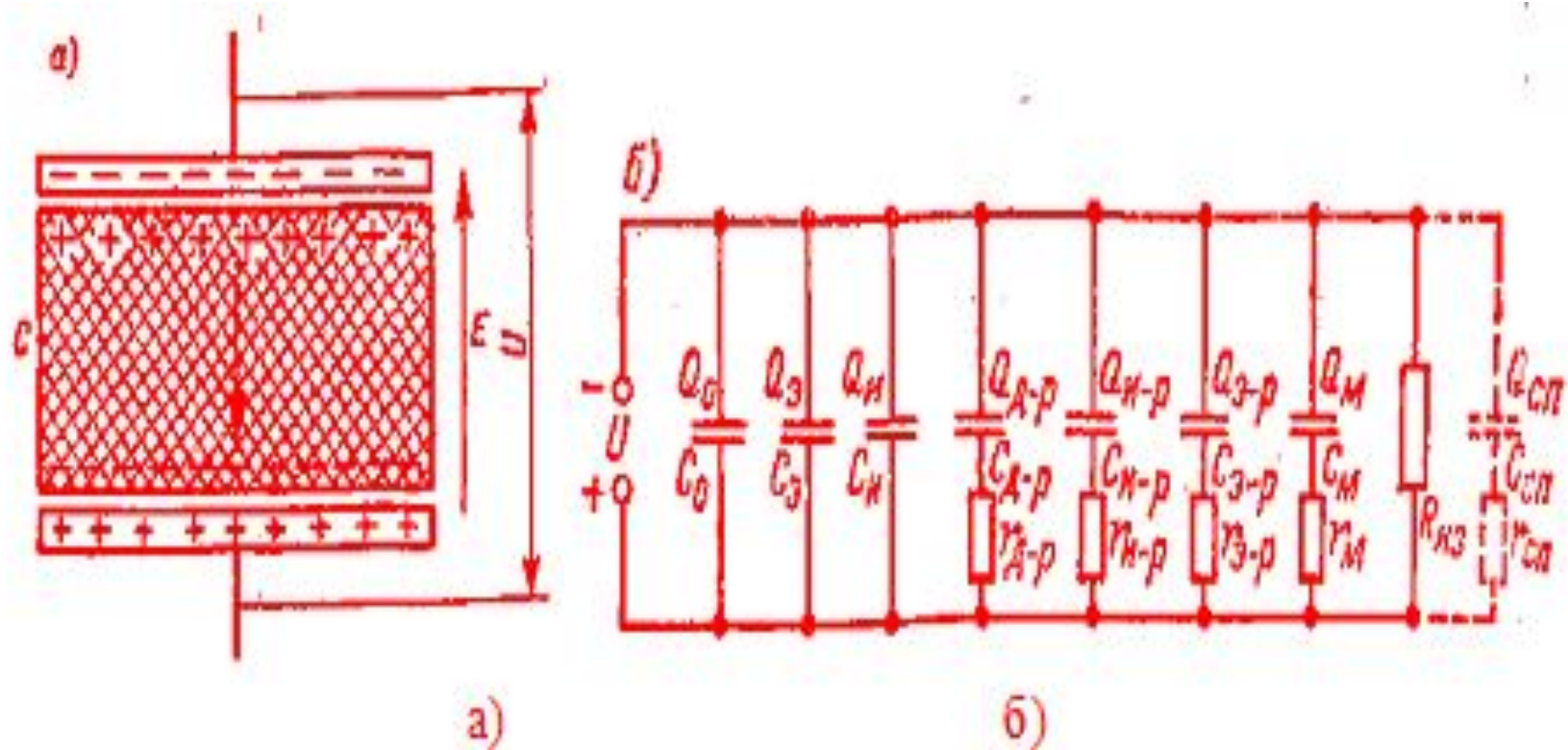


Рисунок 2.2 - Диэлектрик сложного состава с разными механизмами поляризации в электрическом поле (а) и его эквивалентная схема (б)

- На рисунке 2.2:  $U$  - источник напряжения,  $C_0$  и  $Q_0$  - емкость и заряд в вакууме; прочие  $C$  и  $Q$  - соответственно емкости и заряды от электронной, ионной, дипольно-релаксационной, ионно-релаксационной, электронно-релаксационной, миграционной и спонтанной поляризации;  $\Gamma$  - с соответствующими индексами - сопротивления, эквивалентные потерям энергии при этих механизмах поляризации,  $R$  - сопротивление изоляции сквозному току через диэлектрик.
- Важнейшей характеристикой диэлектрика, имеющей особое значение для техники, является относительная диэлектрическая проницаемость-  $\epsilon$ , которая представляет отношение заряда на конденсаторе, содержащем данный диэлектрик к заряду, который был на конденсаторе тех же размеров, если бы между электродами был вакуум или воздух

- $$\epsilon = Q / Q_0 = (Q_0 + Q_d) / Q_0 = 1 + Q_d / Q_0,$$

- из (2.3) следует, что  $\varepsilon$  для любого вещества больше единицы.
- Соотношение (2.2) может быть представлено
- 
- $$Q = Q_0 \varepsilon = CU = C_0 U \varepsilon,$$
- 
- где  $C$  - емкость конденсатора, если бы его электроды разделял вакуум.
- Относительная диэлектрическая проницаемость зависит от структуры диэлектрика, от агрегатного состояния, частоты и напряженности поля, температуры, давления и др.
- Диэлектрическая проницаемость твердых сложных диэлектриков (смесь компонентов) может быть определена на основании логарифмического закона смешения (в общем случае применим для расчета самых различных свойств - теплопроводности, показателя преломления и др.)



- $$\varepsilon^X = \theta_1 \varepsilon_1^X + \theta_2 \varepsilon_2^X,$$

- где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – диэлектрическая проницаемость отдельных компонентов;

- $\theta_1, \theta_2$  - объемные концентрации компонентов;

- $$(\theta_1 + \theta_2) = 1;$$

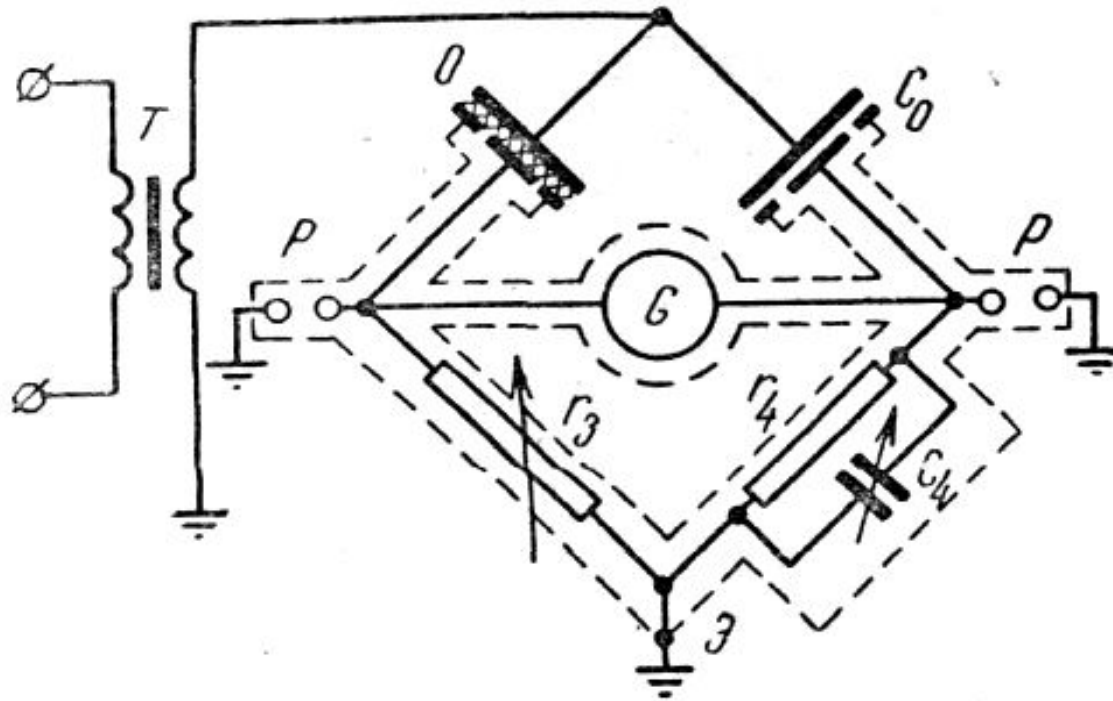
- X - константа, характеризующая распределение компонентов и принимает значение от +1 до -1.

# Методы экспериментального определения и расчета $\epsilon$

- $\epsilon$  является важнейшей характеристикой диэлектрика. Для определения  $\epsilon$  находят емкость  $C_x$  конденсатора с диэлектриком из испытуемого материала. В случае плоской формы образца расчет  $\epsilon$  производят по формуле:

- $$\epsilon = C_x 4\pi d / S \epsilon_0,$$

- где  $\delta$  - толщина образца, м;
- $S$  - его площадь,  $\text{м}^2$  ;
- $\epsilon_0$  - электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.
- Для определения  $C_x$  применяется мостовой метод. Измерения производятся на переменном напряжении низкой частоты по схеме в соответствии с рисунком 2.3



- Переменное напряжение низкой частоты
- $C_x$  считается определенным, если сопротивления цепей  $C_x \cdot r_3 = C_3 \cdot (r_4 + C_4)$  будут равны; в этом случае ток через гальванометр  $G$  будет минимальным или равным 0.
- Равенство сопротивлений в цепях достигается регулированием сопротивления  $r_3$  и емкости  $C_4$ .

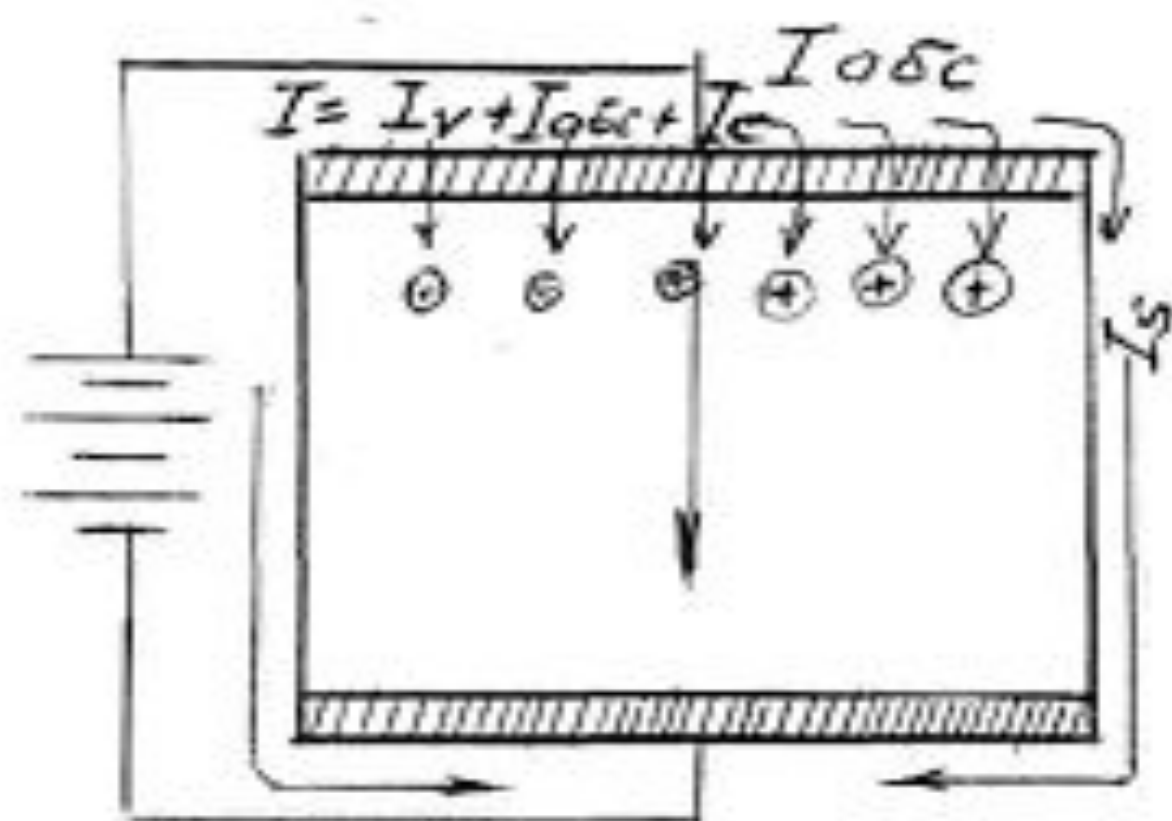
# Электропроводность диэлектрика

- 
- Все диэлектрические материалы под воздействием постоянного напряжения пропускают некоторый весьма незначительный ток, называемый “током утечки”. Общий ток утечки через изоляцию составит
- 

$$I = I_v + I_s,$$

- 
- где  $I_v$  - объемный ток;
- $I_s$  - поверхностный ток.
- Следовательно, проводимость складывается из объемной проводимости и поверхностной проводимости, отсюда
- 

$$G = G_v + G_s.$$



Виды электрического тока в диэлектрике

Величины, обратные проводимостям, называются сопротивлениями изоляции – объемным, поверхностным и результирующим

$$R = \frac{1}{G} = \frac{R_v + R_s}{R_v \cdot R_s}$$

Для сравнительной оценки объемной и поверхностной проводимости пользуются значениями

удельного объемного сопротивления -  $\rho_v$  и удельного поверхностного сопротивления-  $\rho_s$ .

В системе СИ  $\rho_v$  [Ом·м] рассчитывается по формуле:

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot S}{h}$$

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot S}{h},$$

где  $R_v$  - объемное сопротивление образца, Ом;

$S$  - площадь электрода, м<sup>2</sup>;

$h$  - толщина образца, м.

$\rho_v$  [Ом] определяется из выражение.

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{l},$$

где  $R_s$  - поверхностное сопротивление образца, Ом;

$d$  - ширина электродов на поверхности образца, м;

$l$  - расстояние между электродами, м.

Удельная электропроводность диэлектриков зависит от агрегатного состояния, химического состава и структуры, от воздействия внешних факторов: температуры,  $E$ , влажности и др.



# Зависимость удельной электропроводности диэлектриков различных агрегатных состояний, химического состава и структуры от воздействия внешних факторов: температуры, $E$ , влажности и др.

- Электропроводность газов. При малых напряженностях  $E$  в области слабых полей газы обладают малой электропроводностью  $\rightarrow 0$ . Количество свободных ионов и электронов не превышает  $10^4$  1/см. Плотность тока при этом  $\rightarrow 10^{-10}$  А/см т.е. близка к 0. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает либо под действиям внешних факторов, либо вследствие соударений заряженных частиц с молекулами. Электропроводность газа, обусловленная действием внешних ионизаторов, называется несамостоятельной. В сильных полях проводимость становится самостоятельной с образованием лавины электронов за счет ударной ионизации в объеме газа. В слабых полях ударная ионизация отсутствует и самостоятельной электропроводности не обнаруживается. При ионизации газа, обусловленной внешними факторами, происходит расщепление молекулы на положительные и отрицательные ионы. Одновременно часть положительных ионов, соединяясь с отрицательными частицами, образует нейтральные молекулы. Этот процесс, как известно, называется рекомбинацией.

# Электропроводность жидких диэлектриков.

- Электропроводность жидких диэлектриков подразделяется на *собственную и примесную*. Собственная электропроводность жидких диэлектриков определяется сквозным перемещением ионов, получаемых в результате диссоциации молекул и перемещением заряженных частиц примесей – молионов.
- Электропроводность неполярных жидкостей (нефтяные масла, кремнийорганические и др.) очень мала и возрастает лишь при увеличении полярных или диссоциированных примесей, включая воду. Электропроводность полярных жидкостей определяется диссоциацией молекул самой жидкости и наличия в ней примесей. Проводимость полярных жидкостей больше чем у неполярных.
- Температурная зависимость удельной проводимости ( $\gamma$ ) жидких диэлектриков имеет экспоненциальной положительный характер

$$\gamma) = A e^{-\frac{a}{T}}$$

где  $A$  – коэффициент, характеризующей данную жидкость;  
 $a = W/k$  – коэффициент, равный отношению энергии активации к постоянной Больцмана или

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \dot{a}^\alpha$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент.  
 Зависимость  $\gamma$  жидкости от вязкости  $\eta$  выражена:

$$\gamma = \frac{n_0 \cdot q^2}{L \cdot \eta}$$

$\eta$  – коэффициент вязкости;  
 $l$  – расстояние между частицами;  
 $q$  – заряд иона;  
 $n_0$  – число ионов в единице объема.  
 Удельное сопротивление жидких диэлектриков

$$\rho = B e^{\frac{a}{T}}$$

Из этой зависимости видно, что область насыщения плотности тока, как у газов – отсутствует.

# Электропроводность твердых диэлектриков

- Электропроводность твердых диэлектриков чаще носит ионный характер. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны в диэлектрике  $\Delta W \gg kT$  и лишь ничтожное количество электронов может отрываться от своих атомов за счет теплового движения. Ионы же часто слабо связаны в узлах решетки, и энергия  $W$  для их срыва сравнима с  $kT$ .
- Например, для NaCl  $\Delta W = 6$  эВ, а энергия отрыва положительного иона (+Na)  $W = 0.85$  эВ, поэтому, несмотря на меньшую подвижность ионов ( $\mu_{\text{ион}}$ ) по сравнению с подвижностью электронов ( $\mu_{\text{эл}}$ ), ионная электропроводность  $\gamma$  оказывается больше электронной.
- Удельное сопротивление диэлектриков не зависит от направления приложенного напряжения, а зависит от химического состава и структуры. Сохранение пропорциональности между током и напряжением в твердых диэлектриках наблюдается до  $E = 10 \cdot 10^{-2}$  В/м. При  $E$ , превышающих этот предел, зависимость носит экспоненциальный характер и выражается формулой Пуля:

- 
- 
- 

$$\gamma = \gamma_0 e^{\beta E},$$

- 
- где  $E$  – напряженность поля;
- $\gamma_0$  – удельная электропроводность в области независимости от  $E$ ;
- $\beta$  – коэффициент, характеризующий материал.
- Зависимость удельного сопротивления твердых диэлектриков от температуры выражается:
- $$\rho_v = V e^{b/T} \text{ или } \rho = \rho_0 e^{-\alpha t}$$
- 
- где  $V$  или  $v$  коэффициенты для данного материала;
- $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ;
- $\alpha$  – температурный коэффициент;
- $b$  – для твердых диэлектриков находится в пределах от 10000 до 22000.