

## Лекция 5

### ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Диэлектрики (от греч. *dia* – через, сквозь и англ. *electric* – электрический) – вещества, плохо проводящие электрический ток. Термин «диэлектрик» введен Фарадеем для обозначения веществ, в которые проникает электрическое поле. Электропроводность диэлектриков по сравнению с металлами очень мала. Их удельное электрическое сопротивление  $\rho \sim 10^6\text{--}10^{15}$  Ом·м. Между полупроводниками и диэлектриками нет резкой границы. Вещества с шириной запрещенной зоны  $E_g < 3$  эВ условно относят к полупроводникам, а с  $E_g > 3$  эВ – к диэлектрикам.

#### 5.1 Механизмы проводимости

Теория проводимости диэлектриков основана на фундаментальных уравнениях Максвелла, связывающих характеристики электромагнитного поля и плотности электрических зарядов и токов, которые возникают в веществе под действием этого поля. В дифференциальной форме они имеют вид:

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}, \quad \operatorname{div}\mathbf{D} = \rho, \quad \operatorname{div}\mathbf{B} = 0, \quad (5.1)$$

где  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  – напряженности электрического и магнитных полей;  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{B}$  – векторы электрической и магнитной индукции;  $\mathbf{j}$  – плотность тока проводимости;  $\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} = \varepsilon_0\varepsilon \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j}_m$  – плотность тока смещения;  $\rho$  – плотность заряда в точке среды с координатами  $(x, y, z)$ . Дивергенцией векторного поля  $\mathbf{D}$  (аналогично для  $\mathbf{B}$ ) является скалярная величина  $\operatorname{div}\mathbf{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$ . Ротором (вращательной составляющей) векторного поля  $\mathbf{E}$  (аналогично для  $\mathbf{H}$ ) является вектор:

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = \left( \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \mathbf{k},$$

где  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  – единичные векторы, направленные вдоль координатных осей  $x, y, z$ .

Первое уравнение Максвелла свидетельствует о том, что изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле. Согласно второму уравнению, источниками магнитного поля являются токи проводимости и токи смещения (последние обусловлены поляризацией диэлектрика и возникновением объемного заряда под действием поля  $\mathbf{E}$ ). Третье уравнение показывает, что источником поляризации служат электрические заряды в веществе, а четвертое уравнение свидетельствует об отсутствии в нем источников магнитного поля, т.е. магнитных зарядов.

Величины, входящие в уравнение Максвелла, не являются независимыми, и между ними существует связь в виде так называемых «материальных» уравнений, характеризующих электрические и магнитные свойства веществ:

$$\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \gamma\mathbf{E}, \quad (5.2)$$

где  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные;  $\epsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемость;  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость вещества.

Прохождение электрического тока через диэлектрик обуславливает кинетические изменения объемного заряда и напряженности электрического поля  $E$  в веществе. Поэтому вектор плотности полного тока  $j_{\text{полн}}$  включает плотности тока проводимости и тока смещения:

$$j_{\text{полн}} = j + j_{\text{см}} = \gamma E + \epsilon \epsilon_0 \frac{dE}{dt}. \quad (5.3)$$

Таким образом, прохождение тока через диэлектрик характеризуется системой взаимосвязанных уравнений (5.1 ÷ 5.3), решение которой позволяет при заданных граничных и начальных условиях распределения зарядов и токов определить в любой точке вещества в момент времени  $t$  напряженности электрического и магнитного полей, векторы плотности тока проводимости и тока смещения, векторы электрической и магнитной индукции.

Различают три основных механизма электропроводности диэлектриков: электронный, поляронный и ионный.

При комнатной и более низких температурах концентрация свободных носителей заряда в диэлектрике очень мала, а собственная проводимость диэлектриков в отличие от полупроводников, ничтожна. При наличии в диэлектрике примесных атомов свободные носители заряда могут появиться в результате термической активации примесных уровней. Так же как и в полупроводниках, носителями заряда в этом случае могут быть электроны и дырки. При приложении к диэлектрику электрического поля свободные носители ускоряются, обуславливая электропроводность. Такой механизм электропроводности в диэлектриках называют электронным. Очевидно, что вследствие низкой концентрации электронов (дырок) электронная проводимость диэлектриков незначительна. Для разных веществ она колеблется от  $10^{-8}$  до  $10^{-20}$  См/м. Механизм генерации носителей может быть не только тепловым. Электроны проводимости в диэлектрике могут появиться в результате облучения светом, быстрыми частицами, а также вследствие воздействия сильных электрических полей.

Температурная зависимость электронной проводимости диэлектриков достаточно хорошо описывается выражением

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \quad (5.4)$$

где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны. Вид зависимости  $\gamma(T)$  определяется двумя факторами: концентрация носителей изменяется с температурой по экспоненциальному закону, а их подвижность меняется более медленно. Во многих диэлектриках подвижность электронов и дырок в сотни и даже в тысячи раз ниже, чем в полупроводниках. Это вызвано тем, что электроны находятся в этих веществах в связанном состоянии, образуя квазичастицы – поляроны. Таким образом, кроме электронного механизма проводимости в диэлектриках может существовать иной механизм переноса заряда – поляронный.

Полярон – квазичастица, представляющая собой электрон проводимости (или дырку), движущийся вместе с вызванной им деформацией кристаллической решетки. Поляронная проводимость возникает в диэлектрике, когда под действием

внешнего электрического поля связанный электрон может перемещаться только вместе с поляризованной им областью.

Поляронная проводимость характерна для ионных кристаллов, где кулоновское взаимодействие между электронами и ионами, образующими кристаллическую структуру, особенно велико. Поскольку в поляроне электроны проводимости находятся в связанном состоянии, их эффективная масса в тысячи раз превышает значения, характерные для металлов и полупроводников. Соответственно подвижность носителей заряда в диэлектриках в тысячи раз меньше, чем в металлах и полупроводниках.

В зависимости от силы электрон-фононного взаимодействия различают поляроны большого или малого радиуса. *Поляроны большого радиуса* (ПБР) образуются, когда электрон-фононное взаимодействие слабое. В этом случае область искажения решетки вокруг электрона значительно больше параметра элементарной ячейки кристалла. Тем не менее, при движении электрона вместе с ним движется и вся искаженная область. Это приводит к значительному уменьшению подвижности ПБР, которая определяется выражением

$$u_{\text{ПБР}} = \frac{e\delta}{2m^*\omega_0} \left( \exp \frac{\hbar\omega_0}{kT} - 1 \right), \quad (5.5)$$

где  $\delta$  – константа,  $e$  – заряд электрона,  $m^*$  – эффективная масса электрона,  $\omega_0$  – частота оптических фотонов.

При сильном электрон-фононном взаимодействии область искажений соизмерима с параметром решетки, что соответствует образованию *полярона малого радиуса* (ПМР). Из-за сильного взаимодействия электрона с решеткой ПМР оказывается очень стабильным. За счет тепловых флуктуаций ПМР перемещается в кристалле «прыжками» из одного положения в другое. Если к диэлектрику приложено электрическое поле, то прыжки ПМР становятся направленными, т.е. возникает *прыжковая проводимость*. Подвижность ПМР чрезвычайно мала и зависит от температуры:

$$u_{\text{ПМР}} = \frac{ea^2\omega_0}{kT} \cdot \exp \left( -\frac{\Delta E}{kT} \right), \quad (5.6)$$

где  $a$  – постоянная решетки,  $\Delta E$  – энергия активации «прыжка».

В некоторых диэлектриках доминирующей является ионная проводимость, при которой ток переносится положительными или отрицательными ионами. Если диэлектрик обладает ионной проводимостью, то в постоянном электрическом поле осуществляется не только перенос заряда, но и перенос вещества. Ионная проводимость обусловлена перемещением собственных и примесных ионов. Возможность перемещения ионов по кристаллу связана с наличием структурных дефектов в кристаллической решетке. Если в кристалле есть вакансии, то под действием поля соседний ион может занять ее, во вновь образовавшуюся вакансию может переместиться следующий ион и т.д. Перемещение ионов (собственных или примесных) может происходить также по междоузлиям.

С ростом температуры диэлектрика ионная проводимость возрастает примерно по экспоненциальному закону, т.е. зависимость  $\ln \gamma = f(1/T)$  может быть представлена в виде прямой линии. Часто ионная проводимость диэлектрика реализуется по двум механизмам:

при низких температурах она обусловлена примесями, а при высоких – связана с перемещением основных ионов вещества. Зависимость  $\gamma(T)$  в этом случае имеет вид:

$$\gamma = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right), \quad (5.7)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – коэффициенты, не зависящие от температуры  $T$ ,  $E_1$  и  $E_2$  – энергии активации двух механизмов проводимости. График функции (5.7) в логарифмических координатах состоит из двух отрезков с разными наклонами к оси температур (рис. 5.1). Высокотемпературный участок кривой (второе слагаемое уравнения 5.7) характеризует собственную проводимость кристалла. График в низкотемпературной области имеет более слабый наклон ( $E_1 < E_2$ ), так как проводимость диэлектрика при этих температурах определяется в основном природой и концентрацией примесей в кристалле. Низкотемпературную проводимость характеризуют как «структурно чувствительную», или примесную.

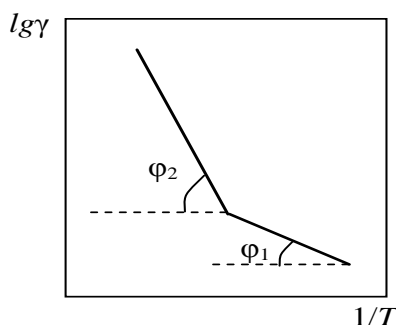


Рис. 5.1 Температурная зависимость ионной электропроводности в диэлектриках:  $\operatorname{tg}\varphi_1=E_1$ ;  $\operatorname{tg}\varphi_2=E_2$

Электрический ток через диэлектрик пропорционален напряженности приложенного электрического поля в соответствии с законом Ома. Однако в достаточно сильных полях ток нарастает быстрее, чем по закону Ома. При некотором (критическом) значении напряженности поля  $E_{\text{пр}}$  происходит резкое увеличение плотности тока через образец.

Каждый диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства изоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название *пробоя диэлектрика*. Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности поля – *электрической прочностью* диэлектрика. Пробивное напряжение обозначается  $U_{\text{пр}}$  и измеряется чаще всего в киловольтах.

Электрическая прочность определяется величиной пробивного напряжения, отнесенного к толщине диэлектрика  $h$  в месте пробоя, т. е. выражается пробивной напряженностью поля:

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / h. \quad (5.8)$$

В системе СИ электрическая прочность выражается в вольтах, деленных на метры (В/м), практически же пользуются другой размерностью – киловольтами, деленными на сантиметр (кВ/см) или мегавольтами, деленными на метр (табл. 5.1).

Пробой диэлектриков может вызываться как чисто электрическими, так и тепловыми, а в некоторых случаях и химическими процессами, возникающими в них под

действием электрического поля. При пробое почти весь ток течет через образец по узкому каналу (так называемое *инурование тока*).

Таблица 5.1 Удельное сопротивление и электрическая прочность диэлектриков

Диэлектрик	$\rho$ , Ом·м	$E_{пр}$ , МВ/м
<i>Твердые</i>		
Кварцевое стекло	$10^{14}$ – $10^{16}$	20–30
Слюда	$10^{12}$ – $10^{14}$	100–200
Электрофарфор	$10^{11}$ – $10^{12}$	30
Мрамор	$10^6$ – $10^7$	20–30
Полиэтилен	$10^{13}$ – $10^{15}$	40
Полистирол (тонкие пленки)	$10^{13}$ – $10^{15}$	80–100
Политетрафторэтилен (тонкие пленки)	$10^{16}$ – $10^{17}$	100–120
Полиэтилентерефталат (лавсан)	$10^{12}$ – $10^{13}$	80–120
Гетинакс	$10^8$ – $10^{11}$	20–35
Текстолит	$10^8$ – $10^{10}$	5–10
<i>Жидкие</i>		
Масло нефтяное	$10^{12}$ – $10^{13}$	15–25
Масло касторовое	$10^{10}$ – $10^{11}$	12–16
Кремнийорганическая жидкость	$10^{10}$ – $10^{12}$	18–20
Вазелин нефтяной	$10^{12}$ – $10^{13}$	20–22

Различают тепловой и электрический пробой твердых диэлектриков. При *тепловом пробое* с ростом плотности тока растет температура образца, что приводит к увеличению числа подвижных носителей заряда и уменьшению удельного электрического сопротивления диэлектрика. При *электрическом пробое* рост поля  $E$  инициирует генерацию носителей заряда. Пробою в диэлектриках способствуют дефекты кристаллической структуры, на которых возникают локальные поля, напряженность которых может существенно превысить напряженность приложенного поля.

Электрическая прочность жидких диэлектриков (нефтяные масла, кремнийорганические жидкости и т.п.) в сильной степени зависит от чистоты жидкости. Наличие примесей и загрязнений существенно понижает электрическую прочность. Электрическая прочность чистых однородных жидких диэлектриков близка к  $E_{пр}$  твердых диэлектриков.

## 5.2 Поляризация

Поляризация – одно из фундаментальных свойств диэлектриков, заключающееся в нарушении статистически равновесного распределения в веществе заряженных частиц и появлении отличного от нуля результирующего электрического момента. Диэлектрик может поляризоваться под воздействием электрического поля или обладать спонтанной (самопроизвольной) поляризацией.

### 5.2.1 Основные понятия

Различают макроскопическую и микроскопическую характеристики поляризации. Микроскопической характеристикой является поляризуемость частицы (например, атома или молекулы), определяющая электрический момент, приобретаемый частицей в электрическом поле. К числу макроскопических параметров, характеризующих совокупность большого числа атомов, относят поляризованность диэлектрика и относительную диэлектрическую проницаемость.

*Поляризованность  $P$*  (поляризация или вектор поляризации или интенсивность поляризации) – это величина, количественно характеризующая явление поляризации, равная пределу отношения электрического дипольного момента некоторого объема вещества к этому объему, когда последний стремится к нулю. Поляризованность в подавляющем большинстве случаев (у так называемых линейных диэлектриков) прямо пропорциональна напряженности электрического поля в данной точке диэлектрика:

$$P = \epsilon_0 \chi E, \quad (5.9)$$

где  $\epsilon_0 = 8,854 \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная;  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость (безразмерный параметр). Произведение  $\epsilon_0 \chi$  (абсолютная диэлектрическая восприимчивость) характеризует способность диэлектрика поляризоваться, является скалярной величиной для изотропного вещества и тензорной для анизотропного. У нелинейных («активных») диэлектриков для которых характерна доменная поляризация (например, у сегнетоэлектриков), пропорциональности между векторами  $P$  и  $E$  нет.

Иногда вместо вектора  $P$  используют вектор *электрической индукции  $D$*  (электрическое смещение):

$$D = \epsilon_0 E + P. \quad (5.10)$$

Количественно способность вещества к поляризации оценивают его *относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$*  (слово «относительная» в названии этого термина для краткости опускают), связывающей векторы электрического смещения и напряженности поля соотношением  $D = \epsilon_0 \epsilon E$ . Сопоставление этого выражения с (5.9) и (5.10) дает связь между диэлектрической проницаемостью и диэлектрической восприимчивостью:  $\epsilon = 1 + \chi$ . Величина  $\chi$  для любого вещества, кроме вакуума, положительна. Для вакуума  $\chi = 0$ , следовательно,  $\epsilon = 1$ . Величины  $\chi$  и  $\epsilon$  – основные характеристики диэлектриков. В табл. 5.2 приведены значения  $\epsilon$  некоторых веществ (при 20 °С или при температуре, указанной в скобках).

В переменных электрических полях поляризация диэлектрика не успевает следовать за полем и между колебаниями векторов  $P$  и  $E$  появляется разность фаз  $\delta$ . В этом случае диэлектрическую проницаемость представляют комплексной величиной  $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ , где  $i = \sqrt{-1}$ , а  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  зависят от частоты переменного электрического поля. Абсолютная величина  $|\epsilon| = \sqrt{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2}$  определяет амплитуду колебаний вектора индукции  $D$ , а отношение  $\epsilon''/\epsilon'$  – диэлектрические потери. *Диэлектрические потери* характеризуют рассеяние (диссипацию) энергии, которая выделяется в диэлектрике в виде теплоты при приложении к нему переменного электрического поля. Мерой диэлектрических потерь

служит  $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ . Так же как и  $\varepsilon$ ,  $\operatorname{tg} \delta$  является макроскопической характеристикой диэлектрика.

Таблица 5.2 Диэлектрическая проницаемость веществ

Жидкости	$\varepsilon$	Твердые тела	$\varepsilon$	Твердые тела	$\varepsilon$
Гелий жидкий (-269 °С)	1,05	Парафин	1,9–2,2	Стекло- текстолит	4,0–5,5
Водород жидкий (-252,9 °С)	1,2	Полиэтилен	2,2–2,4	Целлулоид	4,1
Азот жидкий (-198,4 °С)	1,4	Древесина сухая	2,2–3,7	Фосфор	4,4–6,8
Кислород жидкий (-192,4 °С)	1,5	Полистирол	2,4–2,6	Гетинакс	4,5–8,0
Бензин	1,9–2,0	Эбонит	2,7–3,5	Алмаз	5,7
Масло трансформаторное	2,25	Янтарь	2,8	Слюда	5,7–7,2
Эфир	4,3	Лавсан	3,0–3,5	Текстолит	6,0–8,0
Спирт этиловый	26	Резина	3,0–6,0	Стекло	6,0– 10,0
Глицерин	43	Поливинилхлорид	3,2–4,0	Лед (-10 °С)	70
Вода	81	Оргстекло	3,5–3,9	Двуокись титана	86–170
		Капрон	3,6–5,0	Титанат бария	1200

Микроскопическая характеристика поляризации – *поляризуемость* – связывает электрический момент частицы  $\mu$ , индуцированный действующим на нее электрическим полем, и напряженность этого поля:

$$\mu = \alpha E', \quad (5.11)$$

где  $\alpha$  – поляризуемость,  $\text{Ф} \cdot \text{м}^2$ ;  $E'$  – напряженность внутреннего поля в образце, которая, вообще говоря, не равна напряженности  $E$  внешнего поля, зависящей от приложенного напряжения, толщины диэлектрического образца и формы поля.

### 5.2.2 Механизмы поляризации

Совокупность частиц диэлектрика, способных смещаться или ориентироваться под действием внешнего электрического поля, можно разделить на два вида: упруго (сильно) связанные и слабо связанные. Смещению упруго связанной частицы из положения равновесия, около которых она совершает тепловые колебания, препятствует квазиупругая сила. Последняя возникает под действием внешнего электрического поля, обуславливающего смещение электронной оболочки и ядра в атомах, атомов в молекулах, заряженных ионов в кристаллах, дипольных молекул в молекулярных кристаллах.

Слабо связанные частицы имеют несколько положений равновесия, в каждом из которых они могут находиться с определенной вероятностью. Частота перехода частицы из одного положения в другое определяется высотой потенциального барьера между равновесными состояниями и температурой диэлектрика. При наложении внешнего электрического поля изменяются энергия частиц и вероятность их пребывания в

равновесных состояниях. В результате появляется асимметрия в распределении заряженных частиц, т.е. диэлектрик поляризуется. Основную роль в этом процессе играет тепловое движение структурных единиц вещества, которое с одной стороны, способствует перемещению (ориентации) заряженных частиц, с другой – препятствует их полному разделению или локальной ориентации.

В соответствии с этими представлениями поляризацию разделяют на два типа – упругую и релаксационную (в зависимости от того, на какое расстояние смещаются частицы) и на несколько видов (в зависимости от того, какие частицы смещаются), см. табл. 9.2.

Упругая (деформационная) поляризация характерна для неполярных диэлектриков и вызвана сдвигом носителей заряда относительно друг друга в направлении поля. Наиболее распространенный вид упругой поляризации – *электронная поляризация*, возникающая вследствие упругого смещения и деформации электронных оболочек относительно ядер в атомах диэлектрика (рис. 5.2, *а*). Электронную поляризацию можно назвать универсальной, поскольку она наблюдается у всех без исключения диэлектриков, независимо от их состава, строения, агрегатного состояния и от возможности появления в диэлектрике других видов поляризации.

Особенностью электронной поляризации является чрезвычайно короткое время ее установления ( $10^{-15}$ – $10^{-14}$  с). Поэтому диэлектрическая проницаемость диэлектриков, обладающих только электронной поляризацией, при переменном напряжении практически не зависит от частоты внешнего поля. При электронной поляризации в диэлектрике не происходит необратимого поглощения энергии.

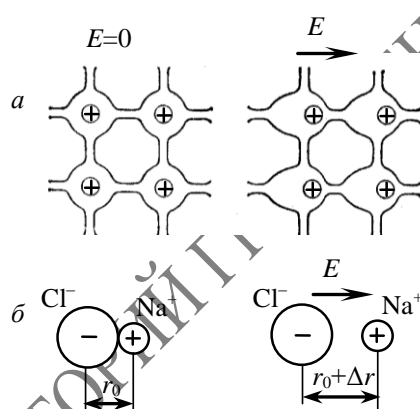


Рис. 5.2 Электронная (*а*) и ионная (*б*) упругая поляризация диэлектриков

Диэлектрическая проницаемость неполярных диэлектриков с одним только электронным видом поляризации

$$\varepsilon = n^2, \quad (5.12)$$

где  $n$  – показатель преломления диэлектрика. То, что равенство (5.12) действительно соблюдается для диэлектриков, которые практически можно считать неполярными, видно из табл. 5.3, в которой приведены параметры некоторых неполярных диэлектриков, находящихся в разных агрегатных состояниях (при нормальных давлении и температуре).

Другим видом упругой поляризации является *ионная поляризация*, обусловленная упругим смещением в электрическом поле разноименно заряженных ионов относительно положения равновесия. Время установления ионной поляризации больше, чем электронной и составляет  $10^{-13}$ – $10^{-11}$  с. Ионная поляризация характерна для ионных кристаллов, например для каменной соли (рис. 5.2, *б*). При сильно выраженной ионной



поляризации в диэлектрике не соблюдается закономерность (5.12), присущая электронной поляризации. В этом случае  $\varepsilon > n^2$ , например, у хлористого натрия  $\varepsilon = 6,0$ , а  $n^2 = 2,37$ . Ионная поляризация диэлектриков обуславливает зависимость диэлектрической проницаемости от температуры. В большинстве случаев при интенсивной ионной поляризации диэлектрики имеют положительный температурный коэффициент  $TK\varepsilon = d\varepsilon/(\varepsilon dT)$ . Это объясняется тем, что при повышении температуры ослабляется связь между ионами и облегчается смещение ионов в электрическом поле. В результате диэлектрическая проницаемость ионных кристаллов увеличивается с ростом температуры.

Таблица 5.3 Значения  $n^2$  и  $\varepsilon$  для неполярных диэлектриков

Диэлектрик	Агрегатное состояние	$n^2$	$\varepsilon$
Водород $H_2$	Газообразное	1,00028	1,00027
Кислород $O_2$		1,00054	1,00055
Азот $N_2$		1,00060	1,00060
Этилен $C_2H_4$		1,00130	1,00138
Бензол $C_6H_6$	Жидкое	2,25	2,28
Толуол $C_7H_8$		2,25	2,39
Масло трансформаторное		2,25	2,25
Парафин	Твердое	2,10	2,2
Полистирол		2,40	2,6
Сера		3,69	3,8
Алмаз		5,76	5,7

В целом процессы электронной и ионной упругой поляризации сходны, поскольку имеют деформационную природу. Оба процесса характеризуются уже отмеченной высокой скоростью установления поляризации и тем, что упругая поляризация не обуславливает необратимое рассеяние энергии на низких частотах, т.е. не вызывает диэлектрических потерь.

Релаксационная (тепловая) поляризация объединяет несколько видов поляризации, связанных с неупругими перемещениями зарядов в диэлектриках. Если слабо связанными частицами являются дипольные молекулы вещества, способные ориентироваться под действием внешнего электрического поля, то в диэлектрике возникает *дипольная (ориентационная) поляризация*. Перемещение в диэлектрике слабо связанных ионов (электронов) вызывает *ионную (электронную) тепловую поляризацию*, которая не идентична ионной или электронной упругой поляризации.

Дипольная поляризация возникает из-за преимущественной ориентации электрических моментов диполей в направлении внешнего поля, что характерно для большого класса дипольных (полярных) диэлектриков, молекулы которых и без внешнего поля обладают дипольным моментом. Ориентация диполей сопровождается преодолением сил взаимодействия между молекулами, на что расходуется энергия и время. Время  $t$  установления дипольной поляризации (время релаксации) зависит от размеров молекул, вязкости вещества, электрического взаимодействия частиц и может составлять от долей секунды до сотен часов.

В отличие от полярных молекул квазидиполи, образуемые слабо связанными ионами или электронами, меняют свою ориентацию в результате перескоков ионов (электронов) из одного равновесного положения в другое. Время между перескоками и есть время релаксации частиц диэлектрика. В электрическом поле на каждую заряженную частицу диэлектрика, хаотически меняющую свое положение, будет действовать дополнительная сила, «перебрасывающая» частицы в определенном направлении. В результате диэлектрик поляризуется.

Релаксационная поляризация диэлектрика, содержащего релаксирующие частицы любого вида (диполи, ионы, электроны), происходит во времени по экспоненциальному закону:

$$P(t) = P_0(1 - e^{-t/\tau}), \quad (5.13)$$

где  $P_0$  – стационарное (установившееся) значение поляризации,  $\tau$  – время релаксации. После удаления из поля поляризованность диэлектрика уменьшается по закону:

$$P(t) = P_0 e^{-t/\tau}, \quad (5.14)$$

Время релаксации  $\tau$  этого процесса равно промежутку времени, в течение которого поляризованность уменьшается в  $e$  раз, т.е.  $P(t) = P_0/e \approx P_0/3$ .

Энергетическая модель релаксационной поляризации слабо связанного иона дает следующую формулу для времени релаксации:

$$\tau = \frac{1}{2\nu_0} \exp\left(\frac{U_0}{kT}\right), \quad (5.15)$$

где  $\nu_0$  – частота собственных (тепловых) колебаний иона в положении равновесия;  $U_0$  – высота потенциального барьера между положениями равновесия. Таким образом, чем выше потенциальный барьер и ниже температура диэлектрика, тем больше время релаксации.

В отличие от большинства низкомолекулярных соединений, где возможен только один процесс электрической релаксации, полярные полимеры характеризуются как минимум двумя областями максимумов диэлектрических потерь. Связано это с тем, что в полимерах в тепловом движении самостоятельно участвуют две структурные единицы: цепная молекула и звено – отдельная характерная группа атомов, входящая в состав цепи. Низкотемпературный процесс электрической релаксации (дипольно-групповой или  $\beta$ -процесс) связан с движением групп малого размера и характеризуется энергией активации 42–84 кДж/моль. Высокотемпературная область релаксации (дипольно-сегментальный или  $\alpha$ -процесс) соответствует специфической форме подвижности структурных единиц, присущей только высокомолекулярным веществам, а именно взаимообусловленному движению сегментов цепи без нарушения их внутренней конформации. Энергия активации дипольно-сегментального процесса релаксации лежит в пределах 126–420 кДж/моль.

В некоторых неорганических диэлектриках, в частности в керамических материалах и стеклах, наблюдается *миграционная поляризация*, обусловленная перераспределением свободных зарядов в объеме диэлектрика под действием внешнего поля. Слабо связанные ионы, перемещаясь в диэлектрике под действием поля, не доходят до электродов и закрепляются на некотором расстоянии от исходного центра теплового колебания.

Возникающий в процессе поляризации ток (так называемый абсорбционный ток) спадает со временем, поскольку образующийся в диэлектрике объемный заряд создает поляризационное электрическое поле, направленное противоположно приложенному. Время установления миграционной поляризации может быть значительно больше, чем при поляризации ионного смещения, и неодинаково для разных диэлектриков.

При воздействии электрического поля на сегнетоэлектрики наблюдается *доменная поляризация*. Сегнетоэлектрики характеризуются наличием однородно поляризованных областей – доменов, дипольные моменты которых в отсутствие электрического поля имеют неоднородную направленность (см. 8.3). Сами домены обладают *спонтанной поляризацией*, возникающей самопроизвольно, без внешних воздействий. При наложении поля происходит преимущественная ориентация доменов в одном направлении, что приводит к поляризации сегнетоэлектрика.

Все сегнетоэлектрики обладают пьезоэлектрическими свойствами. Пьезоэффект обусловлен возникновением электрической поляризации в некоторых кристаллах при их деформировании (так называемая *пьезоэлектрическая поляризация*). Пьезоэлектрическими свойствами обладают некоторые природные кристаллические минералы (кварц, турмалин) и керамики.

При длительном действии постоянного электрического поля все виды поляризации, присущие данному диэлектрику, успевают установиться. Тогда вклад в диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  вносят как «быстрые», так и «медленные» механизмы поляризации. В переменном электрическом поле с увеличением частоты  $\nu$  начинают запаздывать сначала самые медленные, а затем другие виды поляризации. Это приводит к зависимости диэлектрической проницаемости от частоты поля (так называемая *дисперсия  $\epsilon$* ).

Общий вид зависимости  $\epsilon(\nu)$  показан на рис. 5.3. В области низких частот ( $\nu < \nu_1$ ) вклад в диэлектрическую проницаемость вносят все виды поляризации. В диапазоне радиочастот ( $\nu_1 - \nu_2$ ) перестают вносить вклад в  $\epsilon$  тепловые механизмы поляризации (электронная, ионная и дипольная). При частотах, соответствующих инфракрасной области спектра ( $\nu_2 - \nu_3$ ), происходит запаздывание ионной упругой поляризации. В области оптических частот ( $\nu_3 - \nu_4$ ) диэлектрическая проницаемость обусловлена только электронной упругой поляризацией. При столь высоких частотах из-за инерционности никакие другие виды поляризации не успевают установиться. В полях с частотами выше  $\nu_4$  поляризация уже невозможна и  $\epsilon = 1$ .

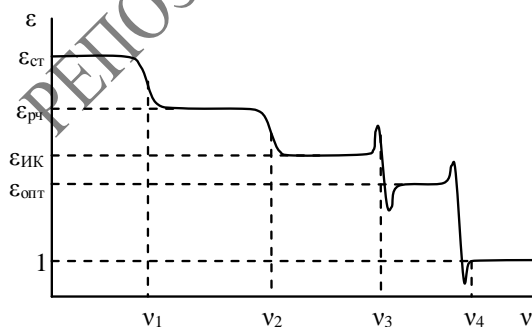


Рис. 5.3 Зависимость диэлектрической проницаемости диэлектрика от частоты приложенного поля:  $\epsilon_{ст}$  – в постоянном поле,  $\epsilon_{рч}$  – в диапазоне радиочастот,  $\epsilon_{ИК}$  – в инфракрасной области,  $\epsilon_{опт}$  – в области оптических частот;  $\nu_1 \sim 10^4$  Гц,  $\nu_2 \sim 10^{11}$  Гц,  $\nu_3 \sim 10^{15}$  Гц,  $\nu_4 \sim 10^{17}$  Гц.

В области высоких частот диэлектрики обладают особым видом поляризации – *резонансной поляризацией*. Ей соответствуют диэлектрические потери, связанные с

резонансом между частотой действующего на диэлектрик внешнего электрического поля и частотой собственных колебаний электронов или ионов.

### 5.2.3 Линейные и нелинейные диэлектрики

*Линейные диэлектрики.* К ним относятся все диэлектрики, имеющие линейную зависимость заряда конденсатора от напряжения:

– неполярные диэлектрики – газы, жидкости и твердые вещества, обладающие в основном только электронной поляризацией. К ним относятся водород, бензол, сера, полиэтилен.

– Полярные диэлектрики – органические жидкие, полужидкие и твердые вещества, имеющие одновременно электронную и дипольно-релаксационную поляризацию. К ним относятся кремнийорганические соединения, капрон, фенолформальдегидные смолы.

– Ионные диэлектрики. В этой группе целесообразно выделить две подгруппы материалов:

\* диэлектрики с ионной и электронной поляризациями (кварц, слюда, корунд,  $TiO_2$ );

\* диэлектрики с ионной, электронной и релаксационной поляризацией (неорганические стекла, керамика).

*Нелинейные диэлектрики* (зависимость заряда от напряжения принимает форму петли гистерезиса). К этому классу диэлектриков относятся только сегнетоэлектрики (вещества, обладающие спонтанной поляризацией).

### 5.3 Диэлектрические потери

*Диэлектрическими потерями* называют электрическую мощность, затрачиваемую на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле. Для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле используют угол диэлектрических потерь и тангенс этого угла.

*Углом диэлектрических потерь* называют угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз  $\varphi$  между напряжением, приложенным к диэлектрику, и протекающим в нем током. В идеальном диэлектрике угол равен нулю. Чем больше рассеивается мощность в диэлектрике, тем меньше угол сдвига фаз  $\varphi$  и тем больше угол диэлектрических потерь  $\varphi$ .

*Тангенс угла диэлектрических потерь*  $\operatorname{tg}\delta$  характеризует отношение активной составляющей к емкостной составляющей проводимости.

Рассмотрим механизм диэлектрических потерь. Диэлектрические потери – это часть энергии переменного электрического поля в диэлектрической среде, которая переходит в тепло. При изменении значения и направления напряженности электрического поля диэлектрическая поляризация также меняет величину и направление; за время одного периода переменного поля поляризация дважды устанавливается и дважды исчезает.

Если диэлектрик построен из молекул, которые представляют собой диполи (полярные молекулы) или содержит слабо связанные ионы, то ориентация таких частиц или смещение в электрическом поле (ориентационная поляризация) требуют определённого времени (время релаксации). В результате максимум поляризации не совпадает во времени с максимумом напряженности поля, т. е. имеется сдвиг фаз между напряженностью поля и поляризацией. Благодаря этому имеется также сдвиг фаз между

напряжённостью электрического поля и электрической индукцией, который и обуславливает *потери энергии*  $\underline{W}_e$ . Переходя к векторному изображению величин, можно сказать, что вектор электрической индукции  $\underline{D}$  отстаёт от вектора электрического поля  $\underline{E}$  на некоторый угол  $\delta$ , который носит название *угла диэлектрических потерь*. Когда молекулы или ионы ориентируются полем, они испытывают соударения с другими частицами, при этом рассеивается энергия. Если время релаксации  $\tau_0$  во много раз больше, чем период  $T$  изменения приложенного поля, то поляризация почти не успевает развиваться и диэлектрические потери очень малы. При малых частотах, когда время релаксации  $\tau$  значительно меньше периода  $T$ , поляризация следует за полем и диэлектрические потери также малы, т.к. мало число переориентаций в единицу времени. Диэлектрические потери имеют максимальное значение, когда выполняется равенство  $\omega = 1/\tau_0$ , где  $\omega$  – круговая частота электрического поля:  $\omega = 2\pi/T$ .

Описанный механизм релаксационных диэлектрических потерь имеет место в твёрдых и жидких диэлектриках, содержащих полярные молекулы или слабо связанные ионы. Величина релаксационных диэлектрических потерь в жидкости зависит от её вязкости, от температуры и от частоты приложенного поля. Для невязких жидкостей (вода, спирт) эти потери проявляются в сантиметровом диапазоне длин волн. В полимерах, содержащих полярные группы, возможна ориентация как отдельных полярных радикалов, так и более или менее длинных цепочек молекул.

В диэлектриках с ионной и электронной поляризацией вещество можно рассматривать как совокупность осцилляторов, которые в переменном электрическом поле испытывают вынужденные колебания, сопровождающиеся рассеянием энергии (рис. 5.4).



Рис. 5.4 Модель диэлектрика, состоящего из осцилляторов – упруго связанных электрических зарядов

Однако если частота электрического поля гораздо больше или меньше собственной частоты осцилляторов, то рассеяние энергии и, следовательно, диэлектрические потери незначительны. При частотах, сравнимых с собственной частотой осцилляторов, рассеяние энергии и диэлектрические потери  $\underline{W}_e$  велики и имеют максимум при равенстве этих частот  $\omega = \omega_0$  (рис. 5.5). При электронной поляризации максимум потерь соответствует оптическому диапазону частот. В диэлектриках, построенных из ионов (например, щёлочно-галогидные кристаллы), поляризация обусловлена упругим смещением ионов и максимум потерь имеет место в инфракрасном диапазоне частот ( $10^{12} \div 10^{13}$  Гц). Так как реальные диэлектрики обладают некоторой электропроводностью, то имеются потери энергии, связанные с протеканием в них электрического тока (джоулевы потери), величина которых не зависит от частоты.

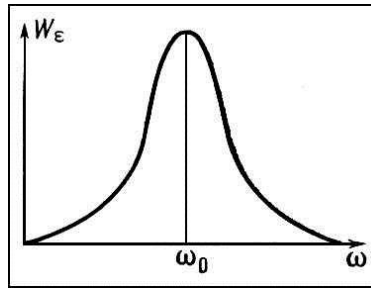


Рис. 5.5 Зависимость  $W_\epsilon(\omega)$  для диэлектрика, состоящего из одинаковых осцилляторов, изображённых на рис. 5.4

Величина диэлектрических потерь в диэлектрике, находящемся между обкладками конденсатора, определяется соотношением:

$$W_\epsilon = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (5.16)$$

где  $U$  – напряжение на обкладках конденсатора,  $C$  – ёмкость конденсатора. Диэлектрические потери в  $1 \text{ см}^3$  диэлектрика в однородном поле  $E$  равны:

$$W_\epsilon = E^2 \omega \epsilon \operatorname{tg} \delta, \quad (5.17)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость.

Произведение  $\epsilon \operatorname{tg} \delta$  называется коэффициентом диэлектрических потерь. Уменьшение величины диэлектрических потерь имеет большое значение в производстве конденсаторов и электроизоляционной технике. Большие диэлектрические потери используются для *диэлектрического нагрева* диэлектриков в электрическом поле высокой частоты.

Диэлектрические потери подразделяют на несколько видов.

*Потери на электропроводность.* Потери этого вида свойственны диэлектрикам, обладающим заметной электропроводностью. Значение тангенса угла диэлектрических потерь может быть найдено по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = 1,8 \cdot 10^{10} / (\epsilon f \rho),$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $f$  – частота,  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление диэлектрика.

*Релаксационные потери.* Такой вид потерь характерен для диэлектриков с замедленными видами поляризации, проявляются при высоких частотах электрического поля, когда сказывается отставание поляризации от изменения поля. Релаксационные потери зависят от времени релаксации  $\tau_0$  и периода изменения поля:

- при  $\tau_0 \ll 1/\omega$  происходит полная поляризация, потерь практически нет;
- при  $\tau_0 \gg 1/\omega$  происходит незначительная поляризация, потери низки;
- при  $\tau_0 \approx 1/\omega$  время поляризации сравнимо с периодом изменения поля, потери максимальны.

*Ионизационные потери.* Данный вид потерь наблюдается в газах и пористых твердых диэлектриках. Активные ионизационные потери в порах можно приближенно рассчитать по формуле:

$$P_{\text{а.и.}} = A_1 f (U - U_{\text{и}})^3,$$

где  $A_1$  – эмпирическая константа,  $U_{\text{и}}$  – пороговое напряжение ионизации. Ионизационные потери приводят к разогреву диэлектрика.

*Резонансные потери.* Резонансные потери связаны с резонансной поляризацией, проявляются при совпадении частоты электрического поля с собственной частотой колебания осцилляторов. Фактически в этих условиях конденсатор ведет себя как активное сопротивление.

*Потери на гистерезис.* Характерны только для сегнетоэлектриков, которым свойственна доменная поляризация, сопровождающаяся в переменных полях диэлектрическим гистерезисом. Потери на гистерезис существуют при температурах ниже точки Кюри.

Диэлектрические потери имеют важное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре (особенно в высоковольтных высокочастотных устройствах), поскольку значение диэлектрических потерь пропорционально квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте. Материалы, предназначенные для применения в этих условиях, должны отличаться малыми значениями угла потерь и диэлектрической проницаемости. Большие диэлектрические потери в электроизоляционных материалах вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению.

#### 5.4 Классификация диэлектрических материалов

По области применения (т.е. по функциям, выполняемым в аппаратуре и приборах) все диэлектрические материалы можно разделить на *электроизоляционные* и *конденсаторные*. Первые используются для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга части, находящиеся под различными электрическими потенциалами. Вторые применяются для создания определенного значения электрической емкости конденсатора, а в некоторых случаях для обеспечения определенного вида зависимости этой емкости от температуры и других факторов.

По возможности управления электрическими свойствами диэлектрические материалы разделяют на *пассивные* (с постоянными свойствами) и *активные*, свойствами которых можно управлять (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электреты и др.).

По химической природе все диэлектрики делятся на *органические* и *неорганические*. Под органическими веществами подразумеваются соединения углерода; обычно они содержат также водород, кислород, азот, галогены или иные элементы. Прочие вещества считаются неорганическими; многие из них содержат кремний, алюминий и другие металлы, кислород и т.п.

Количество диэлектрических материалов исчисляется многими тысячами. Поэтому здесь будут даны лишь общие представления об особенностях строения и свойств основных классов диэлектриков.