

1.2 Основные свойства диэлектриков

Электрофизические свойства диэлектрических материалов

Диэлектриками называют материалы, обладающие незначительной электропроводностью. Основным электрическим свойством диэлектриков является их способность к поляризации. Под поляризацией диэлектрика понимают процесс упорядочения его связанных электрических зарядов под действием электрического поля. Различают несколько механизмов поляризации.

Электронная поляризация

Этот вид поляризации представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. В чистом виде проявляется в неполярных диэлектриках, состоящих из электрически нейтральных молекул, у которых центры отрицательных и положительных зарядов совпадают (полистирол, полиэтилен и др.).

Если такой диэлектрик поместить в электрическое поле между обкладками конденсатора, то в каждом из атомов произойдет смещение электронных оболочек относительно своего ядра в сторону положительного электрода (рис. 1.2.1), в результате чего образуются упругие диполи, количественно характеризуемые величиной электрического момента $m = ql$ где l — расстояние между центрами положительного и отрицательного зарядов диполя, Процесс образования упругих диполей протекает практически мгновенно (в течение $10^{-14}.. 10^{-15}$) и наблюдается у всех видов диэлектриков.

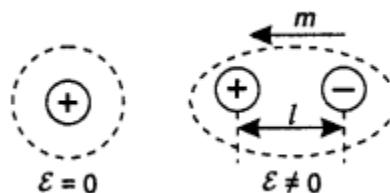


Рис.1.2.1

Величина электрического момента пропорциональна напряженности электрического поля \mathcal{E} :

$$m = \alpha_3 \mathcal{E}, \quad (1.2.1)$$

Здесь α_3 — электронная поляризуемость, зависящая от структуры молекулы

или атома, $\Phi \cdot \text{м}^2$.

Интенсивность процесса поляризации оценивают величиной электрического момента единицы объема материала:

$$P_{\text{др}} = mn. \quad (1.2.2)$$

Здесь n — количество частиц в единице объема. Величину P , называют поляризованностью диэлектрика. О способности диэлектрика поляризоваться судят по увеличению емкости конденсатора при помещении его между обкладками этого диэлектрика.

При отсутствии диэлектрика (рис. 1.2.2, а), емкость конденсатора равна:

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (1.2.3)$$

где ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,84 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

S — площадь обкладок конденсатора; d — расстояние между обкладками.

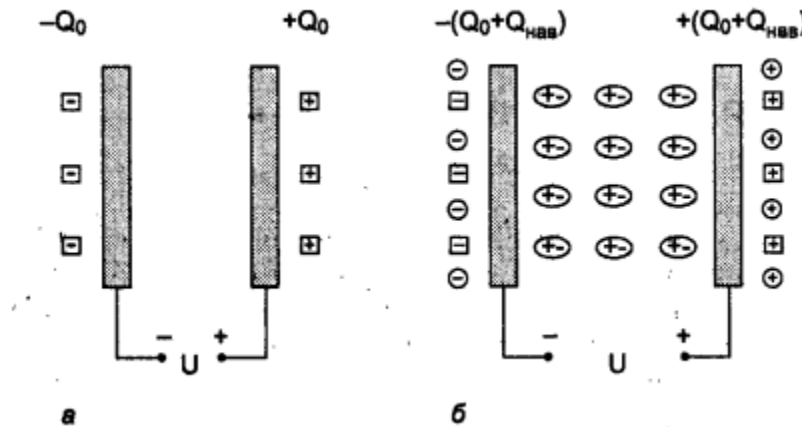


Рис. 1.2.2

При этом на обкладках конденсатора существуют электрические заряды, величина которых равна:

$$Q_0 = C_0 U. \quad (1.2.4)$$

Здесь U — напряжение между обкладками конденсатора.

При наличии диэлектрика (рис. 1.2.2, б) на его поверхности появляются поляризационные заряды, а на обкладках конденсатора — наведенные заряды $Q_{\text{нав.}}$ при этом емкость конденсатора возрастает и становится равной:

$$C_d = \frac{Q_0 + Q_{\text{нав.}}}{U} \quad (1.2.5)$$

Это увеличение емкости учитывают путем введения безразмерного коэффициента ϵ , называемого относительной диэлектрической проницаемостью, который показывает, во сколько раз емкость конденсатора с диэлектриком больше емкости конденсатора без диэлектрика. При наличии диэлектрика емкость конденсатора равна

$$C_d = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d}. \quad (1.2.6)$$

Для неполярных диэлектриков $\epsilon = 2 \dots 2,5$.

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и поляризованность $P_{\text{др}}$, связаны между собой соотношением

$$P_d = \epsilon_0 (\epsilon - 1) E. \quad (1.2.7)$$

Дипольная поляризация

Этот вид поляризации имеет место в полярных диэлектриках, молекулы которых представляют собой твердые диполи (бакелит, целлюлоза, эпоксидная смола), электрические моменты которых ориентированы произвольно (рис. 1.2.3).

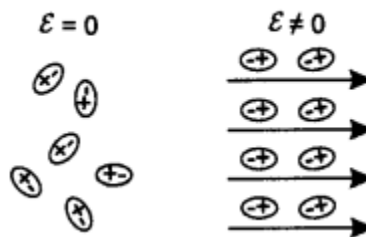


Рис.1.2.3

Под воздействием поля эти молекулы частично ориентируются вдоль силовых линий поля, что и является причиной поляризации. Поворот диполей в направлении поля связан с преодолением межмолекулярных сил, поэтому протекает сравнительно медленно и сопровождается потерями

энергии на нагрев диэлектрика. После прекращения действия поля ориентированность частиц постепенно ослабевает и поляризованность диэлектрика уменьшается, что может быть записано в виде формулы:

$$P_{др}(t) = P_{др}(0) \exp \frac{-(t - t_0)}{\tau_0} \quad (1.2.8)$$

где $P_{др}(0)$ — величина поляризованности в момент времени t_0 , когда прекращается действие поля;

τ_0 — время релаксации, то есть такой промежуток времени, в течение которого поляризованность уменьшается в e раз ($e = 2,71$) от первоначального значения.

Процесс дипольной поляризации сопровождается электронной поляризацией, поэтому степень поляризованности полярного диэлектрика оказывается более высокой и не достигает 6-9.

Ионная поляризация

Этот вид поляризации происходит в кристаллических диэлектриках, имеющих плотную ионную структуру (слюда). Под действием сил внешнего электрического поля в ионных кристаллах происходит упругое смещение ионов относительно своего первоначального положения (рис. 1.2.4) на расстояние, меньшее периода решетки.

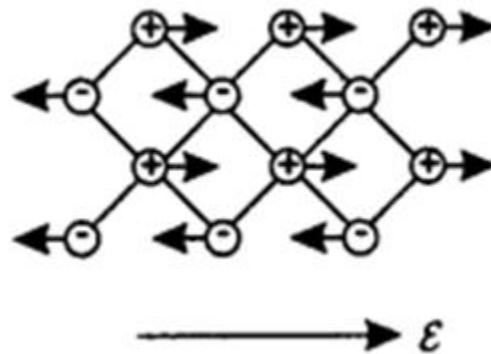


Рис.1.2.4

Смещению ионов препятствуют упругие силы химической связи. В состоянии равновесия действие сил электрического поля уравновешивается действием сил химической связи, то есть:

$$q\mathcal{E} = k_{\text{упр}} \Delta x, \quad (1.2.9)$$

где $k_{\text{упр}}$ — коэффициент упругой связи; Δx — смещение ионов.

Следовательно, величина смещения ионов будет равна:

$$\Delta x = \frac{q\mathcal{E}}{k_{\text{упр}}} \quad (1.2.10)$$

Время установления ионной поляризации — порядка 10^{-13} с. Величина относительной диэлектрической проницаемости \mathcal{E} составляет 5-12. В ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов (органическое стекло и некоторые другие вещества) ионы под воздействием поля смещаются на расстояния, превышающие постоянную решетки. После снятия поля ионы постепенно возвращаются к центру равновесия. Такой вид поляризации называется ионно-релаксационной.

Спонтанная поляризация

Этот вид поляризации имеет место в группе твердых диэлектриков, получивших название сегнетоэлектриков. У таких диэлектриков даже при отсутствии внешнего электрического поля наблюдается самопроизвольная (спонтанная) ориентация твердых диполей в отдельных областях, называемых доменами, линейные размеры которых лежат в пределах от 10^{-4} до 10^{-1} см. В каждом из доменов электрические моменты диполей направлены одинаково, а в разных доменах — по-разному (рис. 1.2.5, а). Поэтому общий электрический момент сегнетоэлектрика равен нулю.

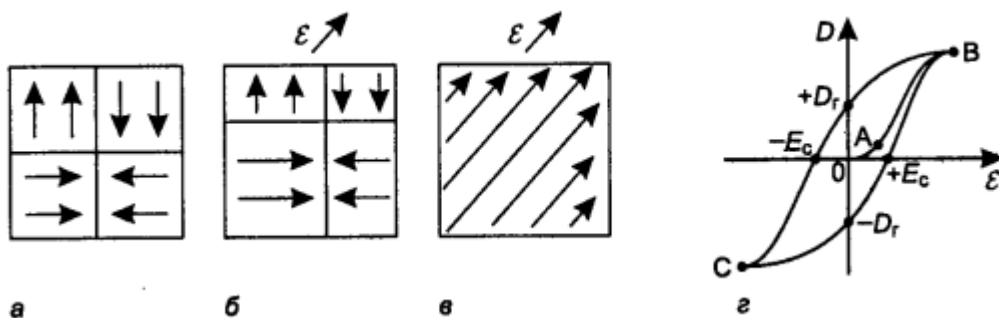


Рис.1.2.5

Механизм возникновения спонтанной поляризации можно проследить на примере титаната бария (BaTiO_3), который по своей научной значимости и

техническому применению занимает ведущее место среди сегнетосолектриков.

При температуре выше 120°C (точка Кюри) титанат бария обладает кристаллической структурой, имеющей форму куба (рис. 1.2.6). Размеры элементарной ячейки больше удвоенной суммы ионных радиусов титана и кислорода. Поэтому ион титана имеет некоторую свободу перемещения в пределах октаэдра, образованного ионами кислорода. Вследствие интенсивного теплового движения ион титана непрерывно перебрасывается от одного кислородного иона к другому, благодаря чему усредненное во времени его положение совпадает с центром элементарной ячейки. Поэтому ячейка не обладает электрическим моментом.

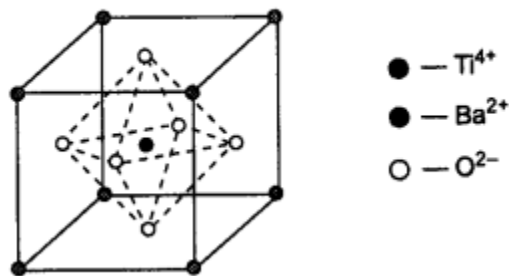


Рис.1.2.6

При температуре ниже 120°C энергия теплового движения недостаточна для переброса иона титана из одного равновесного положения в другое, ион локализуется вблизи одного из кислородных ионов, вследствие чего нарушается кубическая симметрия в расположении заряженных частиц и элементарная ячейка приобретает электрический момент, Одновременно с этим искажается форма ячейки — она вытягивается по направлению оси, проходящей через центры ионов кислорода и титана, сблизившихся между собой. Взаимодействие между заряженными частицами соседних ячеек приводит к тому, что смещение ионов титана происходит в них согласованно, в одном направлении, в результате чего образуются домены.

Если сегнетоэлектрик поместить в электрическое поле, то по мере роста напряженности поля будет происходить обратимое смещение границ доменов в направлении поля (рис, 1.2.6, б) и линейное возрастание электрической индукции D (участок ОА на рис, 1.2.6, г). В сильных электрических полях смещение доменных границ принимает необратимый характер, при этом разрастаются те домены, у которых вектор спонтанной

поляризации имеет наименьший угол с направлением вектора напряженности электрического поля. Одновременно с этим происходит поворот диполей по направлению поля. Этому процессу соответствует участок АВ на рис 1.26, г. При некоторой напряженности поля, соответствующей точке В, все домены сегнетоэлектрика оказываются сориентированными вдоль силовых линий поля (рис. 1.2.6, в), наступает техническое насыщение. Кривую ОАВ называют основной кривой поляризации диэлектрика. В области насыщения наблюдается некоторое увеличение индукции, что объясняется электронной и ионной поляризацией. Если после насыщения напряженность поля уменьшить до нуля, то сохранится вызванная полем ориентация доменов и будет наблюдаться некоторая остаточная индукция D_r . При изменении направления поля происходит переориентация векторов спонтанной поляризации, индукция быстро уменьшается, и при напряженности $-E_0$, называемой коэрцитивной силой, она становится равной нулю. Дальнейшее увеличение напряженности поля вновь переводит сегнетоэлектрик в состояние технического насыщения (точка С).

Таким образом, при поляризации сегнетозлектриков изменение индукции отстает от изменения напряженности поля. Это явление называется гистерезисом. Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, затрачиваемой за один период изменения напряженности электрического поля.

Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика определяется по основной кривой поляризации:

$$\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 \mathcal{E}}. \quad (1.2.11)$$

На рис. 1.2.7 представлена зависимость индукции и относительной диэлектрической проницаемости от напряженности поля. Относительная диэлектрическая проницаемость, измеренная в слабых полях, называется начальной. В сильных полях относительная диэлектрическая проницаемость достигает значения $10^4 - 10^6$.

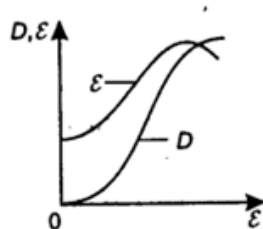


Рис.1.2.7

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и частоты

Влияние температуры на величину диэлектрической проницаемости оценивают *температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости*:

$$\alpha_{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT}. \quad (1.2.12)$$

Этот коэффициент равен относительному изменению диэлектрической проницаемости при увеличении температуры на 1 °С.

У неполярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость слабо уменьшается с ростом температуры (рис. 1.2.8, кривая 1), так как уменьшается плотность диэлектрика, а следовательно, количество поляризуемых частиц. Величина α , отрицательна, примерно равна коэффициенту линейного расширения диэлектрика и составляет около $-100 \cdot 10^{-6}$ 1/К.

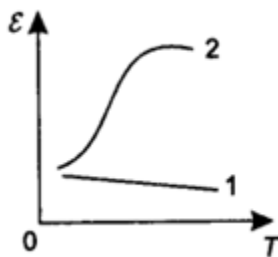


Рис. 1.2.8

У полярных диэлектриков зависимость ε от температуры имеет характерный максимум (рис. 1.2.8, кривая 2). В области низких температур повышение температуры ведет к ослаблению межмолекулярных сил, что облегчает поворот диполей под действием сил поля. В области высоких

температур ϵ уменьшается из-за возрастания беспорядочных тепловых колебаний. В ионных кристаллах с плотной упаковкой наряду с уменьшением плотности вещества наблюдается возрастание поляризуемости ионов вследствие ослабления упругих связей между ними при тепловом расширении, поэтому диэлектрическая проницаемость с ростом температуры возрастает ($a_\epsilon = +100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$). У некоторых кристаллов, содержащих ион титана (рутил TiO_2 , перовскит CaTiO_3), преобладает электронная поляризация, поэтому с ростом температуры диэлектрическая проницаемость уменьшается ($a_\epsilon = -1500 \cdot 10^{-8} \text{ 1/K}$ для перовскита, $a_\epsilon = -750 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ для рутила). Эти диэлектрики применяют в термокомпенсирующих конденсаторах.

В ионных кристаллах с неплотной упаковкой с увеличением температуры возрастает число слабо связанных ионов, поэтому диэлектрическая проницаемость возрастет. Температурный коэффициент таких диэлектриков достигает величины $+100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$.

Наиболее сильная зависимость от температуры наблюдается у сегнетоэлектриков (рис. 1.2.9), у которых увеличение температуры приводит к ослаблению сил, препятствующих ориентации доменов. Поэтому поляризованность доменов с ростом температуры возрастает, что ведет к увеличению диэлектрической проницаемости. Рост диэлектрической проницаемости происходит до температуры T_k , называемой *температурой Кюри*. За пределами этой температуры происходит распад доменных структур и резкое уменьшение диэлектрической проницаемости.

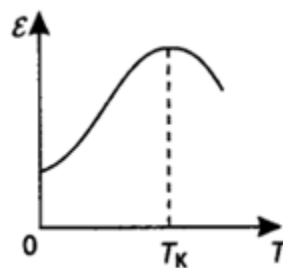


Рис.1.2.9

Частотная зависимость проницаемости обусловлена инерционностью процессов поляризации. У неполярных диэлектриков, характеризующихся электронной поляризацией, процесс образования упругих диполей протекает

практически мгновенно, поэтому диэлектрическая проницаемость не зависит от частоты (рис. 1.2.10, кривая 1).

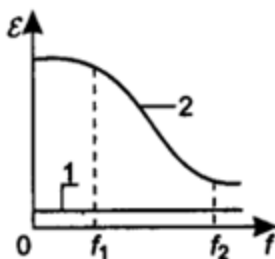


Рис.1.2.10

У полярных диэлектриков в области низких частот вплоть до частоты f_1 твердые диполи успевают поворачиваться за половину периода колебаний, поэтому диэлектрическая проницаемость не зависит от частоты (рис. 1.2.10, кривая 2). На частотах выше f_1 диполи не успевают следовать за изменениями электрического поля, вследствие чего снижается интенсивность дипольной поляризации и резко уменьшается диэлектрическая проницаемость. На частотах выше f_2 процесс дипольной поляризации полностью отсутствует и сохраняется только электронная поляризация.

Электропроводность диэлектриков

У диэлектриков очень широкая запрещенная зона, поэтому свободные носители заряда практически отсутствуют. Основной причиной электропроводности является наличие в объеме и на поверхности ионов различных примесей. При высоких температурах проводимость также может быть обусловлена ионами самого материала. Различают объемную и поверхностную электропроводность.

Объемная электропроводность создается ионами примесей или ионами диэлектрика, которые, находясь в состоянии первоначального закрепления и совершая тепловые колебания, способны преодолеть силы взаимодействия с другими молекулами и перейти в новое положение временного закрепления. В отсутствие электрического поля направления перемещения ионов равновероятны, и ток равен нулю. При наличии поля движение ионов создает ток, плотность которого равна:

$$j = qN_T v_T, \quad (1.2.13)$$

где N_T — концентрация диссоциированных ионов;

v_T — средняя скорость движения ионов.

Скорость v_T пропорциональна напряженности поля;

$$v_T = \mu_T \mathcal{E}. \quad (1.2.14)$$

Здесь μ_T — подвижность ионов.

Следовательно, можно записать:

$$j = qN_T\mu_T\mathcal{E} = \sigma_d\mathcal{E}. \quad (1.2.15)$$

Здесь $\sigma_d = qN_T\mu_T$ - удельная объемная проводимость диэлектрика.

Величины N_T и μ_T зависят от температуры:

$$N_T = N \exp\left(\frac{-E_d}{kT}\right), \quad (1.2.16)$$

$$\mu_T = \mu_{max} \exp\left(\frac{-E_{пер}}{kT}\right), \quad (1.2.17)$$

где N_T — концентрация диссоциированных ионов;

N — общая концентрация ионов;

μ_{max} — предельная подвижность ионов;

E_d — энергия диссоциации, необходимая для того, чтобы преодолеть действие сил молекулярного взаимодействия;

$E_{пер}$ — энергия перемещения диссоциированного иона, необходимая для перемещения иона из одного состояния закрепления в другое.

Подставляя N_T и μ_T формулу для σ_d получаем:

$$\sigma_d = A \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right), \quad (1.2.18)$$

где A — коэффициент пропорциональности, включающий в себя N_T и μ_T ;

E_a — суммарная энергия активизации ($E_a = E_d + E_{пер}$).

Так как в объеме имеются как ионы примеси, так и собственные ионы, то:

$$\sigma_d = A_1 \exp\left(\frac{-E_1}{kT}\right) + A_2 \exp\left(\frac{-E_2}{kT}\right) \quad (1.2.19)$$

Здесь A_1 и E_1 характеризуют примесную ионную электропроводность, A_2 и E_2 — собственную. При низких температурах преобладает первое слагаемое, а при высоких — второе. Ток, создаваемый движением ионов, называют током сквозной проводимости — $I_{ск}$.

Поверхностная электропроводность обусловлена наличием влаги, загрязнениями, различными дефектами на поверхности диэлектрика. По способности реагировать на влагу различают гидрофобные и гидрофильные материалы. Гидрофобные материалы практически не смачиваются, и их удельное поверхностное сопротивление велико. Гидрофильные материалы смачиваются, поэтому на поверхности диэлектрика образуется непрерывный токопроводящий слой. Способность материала поглощать влагу называется адсорбцией. Такой способностью обладают полярные и ионные диэлектрики. Для уменьшения поверхностной электропроводности создают защитные гидрофобные покрытия.

Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют мощность, расходуемую электрическим полем на поляризацию диэлектрика. Эта мощность выделяется в виде тепла. Поглощение мощности диэлектриком обусловлено медленными поляризациями и электропроводностью диэлектрика.

Если между обкладками конденсатора помещен неполярный диэлектрик, то пропорционально изменению напряженности электрического поля изменяются электрические моменты диполей и, соответственно, электрические заряды, наводимые на обкладках конденсатора, вследствие чего в диэлектрике возникает ток смещения (емкостный ток), пропорциональный скорости изменения напряженности поля:

$$I_{см} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (1.2.20)$$

Если напряженность поля изменяется по синусоидальному закону, то:

$$I_{см} = UC\omega \quad (1.2.21)$$

При этом $I_{см}$ опережает приложенное напряжение на угол $\pi/2$ (рис. 1.2.11). Если между обкладками конденсатора помещен полярный диэлектрик, то поворот неупругих диполей запаздывает относительно изменения напряжения на величину временной релаксации $\tau_0 = 10^{-8}$ с, в

результате чего возникающий ток опережает напряжение на угол $\varphi < 90^\circ$. Этот ток называется током абсорбции. Таким образом, ток смещения ($I_{см}$) обусловлен электронной поляризацией, а ток абсорбции ($I_{аб}$) — дипольной. Кроме того, в диэлектрике существует сквозной ток $I_{ск}$, совпадающий по фазе с приложенным напряжением. Следовательно, полный ток равен $I = I_{ск} + I_{см} + I_{аб}$. Активная составляющая такого тока равна $I_a = I_{ск} + I_{a.аб}$, а реактивная — $I_p = I_{см} + I_{p.аб}$.

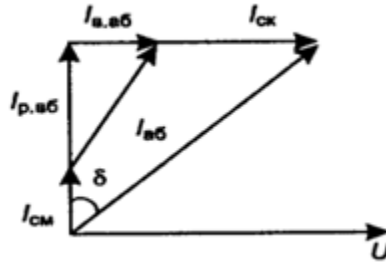


Рис.1.2.11

Угол δ , дополняющий до 90° угол фазового сдвига между током и напряжением, называют *углом диэлектрических потерь*. Тангенс угла диэлектрических потерь, как это следует из векторной диаграммы, можно рассчитать по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p}. \quad (1.2.22)$$

Из-за наличия тока I_a в диэлектрике выделяется мощность

$$P_a = UI_a = UI_p \operatorname{tg} \delta. \quad (1.2.23)$$

Поскольку

$$I_p = UC\omega, \text{ то } P_a = U^2 C \omega \operatorname{tg} \delta. \quad (1.2.24)$$

Таким образом, потери энергии в диэлектрике определяются величиной $\operatorname{tg} \delta$. У широко применяемых диэлектриков $\operatorname{tg} \delta = (2..5) \cdot 10^{-3}$, у высококачественных диэлектриков $\operatorname{tg} \delta = (2..5) \cdot 10^{-4}$.

У неполярных диэлектриков при возрастании температуры $\operatorname{tg} \delta$ увеличивается (рис. 1.2.12, кривая 1), так как потери растут из-за возрастания тока $I_{ск}$.

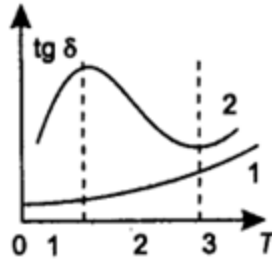


Рис.1.2.12

У полярных диэлектриков (рис. 1.2.12, кривая 2) возможности поворота молекул при низких температурах ограничены из-за сил трения между ними. Поэтому количество молекул, участвующих в процессе дипольной поляризации, и время установления поляризации τ невелики, вследствие чего $\text{tg} \delta$ имеет небольшую величину. По мере роста температуры облегчается поворот молекул, возрастает их количество и уменьшается время τ_0 , что ведет к увеличению $\text{tg} \delta$ (участок 1). Так происходит до тех пор, пока время τ не окажется равным длительности периода изменения поля. При этом условии дипольная поляризация получает наибольшее развитие и $\text{tg} \delta$ достигает максимума. При еще более высоких температурах время τ становится существенно меньше периода изменения напряженности поля, поэтому запаздывание дипольной поляризации относительно изменений поля практически исчезает и $\text{tg} \delta$ уменьшается (участок 2). С повышением частоты максимум $\text{tg} \delta$ смещается в область более высокой температуры. При дальнейшем повышении температуры $\text{tg} \delta$ начинает увеличиваться, что связано с возрастанием сквозного тока (участок 3).

В неполярных диэлектриках с увеличением частоты возрастает ток I_p , а ток I , сохраняется неизменным, поэтому $\text{tg} \delta$ уменьшается (рис. 1.2.13, кривая 1).

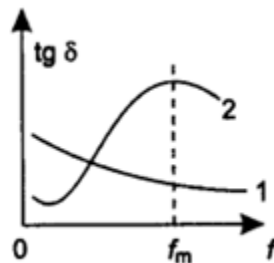


Рис.1.2.13

В полярных диэлектриках в области низких частот ток $I_{аб}$, не велик, поэтому при повышении частоты $\text{tg}\delta$ уменьшается за счет роста тока $I_{см}$. Затем с ростом частоты возрастает число переориентаций полярных молекул в единицу времени и увеличивается ток $I_{аб}$, вследствие чего растет $\text{tg}\delta$. На частоте f_m время установления дипольной поляризации становится равным длительности периода изменения напряженности поля и $\text{tg}\delta$ достигает максимума. При дальнейшем повышении частоты не хватает времени для переориентации полярных молекул, поэтому увеличивается ток $I_{а.аб}$, что ведет к уменьшению $\text{tg}\delta$ (рис. 1.2.13, кривая 2).

Электрическая прочность диэлектриков

В нормальных (рабочих) условиях проводимость диэлектриков крайне низка, поэтому их используют как электроизоляционные материалы. Но, находясь в сильных электрических полях, при превышении напряжением некоторого критического значения они могут потерять свои электроизоляционные свойства. Это явление называется пробоем диэлектрика. Напряжение, приложенное к диэлектрику и приводящее к его пробое, называют пробивным напряжением ($U_{пр}$), а минимальную напряженность однородного электрического поля, приводящую к пробое диэлектрика, называют электрической прочностью ($\mathcal{E}_{пр}$):

$$\mathcal{E}_{пр} = \frac{U_{пр}}{d_d}$$

где d_d — толщина диэлектрика.

Существует несколько разновидностей пробоя:

- Электрический пробой возникает тогда, когда некоторое количество носителей зарядов, ускоренных электрическим полем, приобретает энергию, достаточную для ударной ионизации атомов. Это приводит к появлению новых носителей заряда, которые также ускоряются полем, и в итоге возникает лавинообразный процесс увеличения тока, который развивается в течение 10^{-7} - 10^{-5} с. Этот процесс обычно локализован в узкой области диэлектрика, поэтому следствием его является появление разрядного канала, внутри которого повышается давление, что приводит к появлению трещин или к полному разрушению диэлектрика. Как правило, этот вид пробоя возникает при $\mathcal{E}_{пр} = 10^3$ МВ/м.

- Тепловой пробой возникает тогда, когда количество теплоты, выделяемой в диэлектрике, будет больше количества теплоты, отводимой от него в окружающую среду. В результате происходит нагрев диэлектрика, приводящий к его расплавлению или обугливанию.
- Электрохимический пробой обусловлен медленными изменениями химического состава и структуры диэлектрика, которые развиваются под действием поля или разрядов в окружающей среде.
- При поверхностном пробое пробивается воздух вблизи поверхности твердого диэлектрика, в результате на поверхности образуется проводящий канал. Напряжение поверхностного пробоя зависит от давления, температуры и влажности воздуха. Для предотвращения поверхностного пробоя поверхность изолятора делают ребристой. Эффективной мерой борьбы с данным видом пробоя является замена воздуха жидким диэлектриком.

Классификация диэлектрических материалов

В РЭА применяют большое количество различных диэлектриков. По функциям, выполняемым в аппаратуре, их подразделяют на электроизоляционные и конденсаторные. Электроизоляционные диэлектрики предназначены для отделения друг от друга элементов схемы и для электрической изоляции токоведущих частей электрических устройств. Они обладают невысокой относительной диэлектрической проницаемостью и большим удельным сопротивлением. Конденсаторные диэлектрики применяют для увеличения емкости конденсаторов. Эти диэлектрики имеют повышенное значение ϵ и малое значение $\text{tg}\delta$. Большое разнообразие диэлектриков целесообразно классифицировать на основе особенностей их строения.

Полимерные материалы представляют собой высокомолекулярные соединения, молекулы которых состоят из большого числа многократно повторяющихся звеньев (мономеров). В зависимости от пространственной структуры макромолекул различают линейные и пространственные полимеры. Макромолекулы линейных полимеров образуют цепочечную последовательность повторяющихся звеньев. Такие полимеры способны размягчаться при нагревании, то есть являются термопластичными материалами. Макромолекулы пространственных полимеров развиты по всем

трем направлениям, образуя пространственную сетку. Такие полимеры относительно хрупки и при нагревании не размягчаются, то есть являются терморезистивными материалами.

Различают неполярные и полярные полимеры. В неполярных полимерах мономерные звенья не обладают дипольным моментом. К таким полимерам относятся полиэтилен, полистирол и фторопласт-4, характеризующиеся следующими параметрами; $\epsilon = 2..2,5$; $\text{tg}\delta = (2..5) \cdot 10^{-4}$ $\epsilon_{\text{пр}} = 20..40$ МВ/м; $\rho = 10^{14}..10^{16}$ Ом·м. Из полиэтилена изготавливают главным образом гибкую изоляцию высокочастотных проводов и кабелей. Из полистирола изготавливают изоляционные платы и другие радиодетали. Тонкие пленки полистирола толщиной 10-100 мкм, называемые стирофлексом, используют в качестве диэлектрика конденсаторов. Фторопласт-4 обладает высокой нагревостойкостью (до +250 °С) и высокой химической стойкостью.

Полярные полимеры обладают сильно выраженной дипольной поляризацией и, следовательно, пониженными электроизоляционными свойствами по сравнению с неполярными полимерами. Они характеризуются следующими параметрами: $\epsilon = 3..6$; $\text{tg}\delta = 0,01..0,06$; $\epsilon_{\text{пр}} = 15.50$ МВ/м; $\rho = 10^{11}..10^{14}$ Ом·м. Наиболее распространенными материалами этой группы являются поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилентерефталат (лавсан) и полиамидные смолы. ПВХ представляет собой жесткий негибкий материал. Для придания эластичности в ПВХ добавляют пластификаторы. Такой материал называется пластиком. Он находит применение в производстве монтажных проводов. Пленки из лавсана толщиной около 6,5 мкм применяют в качестве несущей основы при изготовлении лент для магнитной записи, а также для межслойной изоляции в обмотках трансформаторов и в качестве диэлектрика низкочастотных конденсаторов. Полиамидные смолы отличаются высокой механической прочностью и эластичностью. Применяют их для изготовления искусственных волокон (например, капрона) и пластических масс. На основе полиамидов изготавливают эмальлаки, образующие прочные эластичные диэлектрические покрытия на металлических проводах.

Пластмассы представляют собой многокомпозиционные материалы, состоящие из связующего вещества и наполнителей. Их изготавливают методом горячего прессования или литья под давлением. В качестве связующего вещества наиболее часто, используют полимерные материалы, способные деформироваться под давлением. Назначение связующих веществ

в пластмассах состоит в пропитке и обволакивании наполнителей и в монолитном соединении всех компонентов в пластмассовом изделии. Состав и свойства связующего вещества определяют свойства пластмассы. Наполнители используются для улучшения свойств пластмассы. Волокнистые наполнители (стеклянные, асбестовые и хлопковые волокна) повышают механическую прочность пластмасс. Неорганические наполнители (кварцевый и слюдяной порошок, стеклянное волокно) повышают коэффициент теплопроводности пластмасс. В пластмассах содержится 40-60 % наполнителей. В состав пластмасс входят также различного рода красители. Из композиционных пластмасс изготавливают корпуса РЭА, ламповые панельки, штепсельные разъемы и т. д.

Разновидностью композиционных пластмасс являются слоистые пластики, в которых в качестве наполнителя используют волокнистые материалы. Они состоят из чередующихся слоев листовых наполнителей и связующего вещества. В *гетинаксе* наполнителем являются листы специальной бумаги толщиной 0,1 мкм, пропитанные термореактивной смолой. В процессе горячего прессования отдельные листы бумаги соединяются связующим веществом, образуя монолитный материал в виде листов толщиной от 0,2 до 4 мм. Характеристики гетинакса: $\epsilon = 5..7$; $\text{tg}\delta = 0,03..0,05$; $\epsilon_{\text{пр}} = 30 \text{ МВ/м}$; $\rho = 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. В текстолите в качестве наполнителя используется хлопчатобумажная ткань, а в качестве связующего звена — бакелитовая смола. Электрические характеристики текстолита несколько хуже, чем гетинакса. В стеклотекстолите наполнителем является бесщелочная стеклоткань толщиной 0,06 мм, а в качестве связующего вещества применяют кремнийорганические смолы. Стеклотекстолит отличается от гетинакса и текстолита повышенной механической прочностью и лучшими электрическими характеристиками.

Для изготовления печатных плат РЭА применяют слоистые пластики, облицованные с одной или двух сторон электрической красномедной фольгой толщиной 0,035-0,05 мм. Требуемый рисунок печатной схемы получают путем избирательного травления.

Электроизоляционные лаки, эмали и компаунды применяют для изоляции и защиты элементов РЭА от внешних воздействий. Электроизоляционные лаки являются растворами пленкообразующих веществ в органических растворителях. Слой лака, нанесенный на твердую

поверхность, постепенно отвердевает, образуя лаковую пленку. Пропиточные лаки применяют в РЭА для пропитки обмоток трансформаторов, дросселей и др. Покровные лаки служат для создания на поверхности пропитанных обмоток или печатных плат электроизоляционных защитных покрытий. Эмальлаки применяют для тонкопленочной изоляции обмоточных проводов. Клеящие лаки применяют для склеивания различных материалов.

Электроизоляционные эмали представляют собой лаки, в состав которых входят неорганические вещества, повышающие твердость и механическую прочность лаковой пленки. Компаунды в основном состоят из тех же веществ, которые входят в состав лаковой основы электроизоляционных лаков, но в отличие от них не содержат растворителей. По своему назначению они делятся на две основные группы: пропиточные и заливочные. Пропиточные компаунды служат для заполнения пор, капилляров и воздушных включений в электроизоляционных материалах, используемых для изоляции обмоток трансформаторов, вследствие чего повышается электрическая прочность материала. Заливочные компаунды служат для герметизации радиокомпонентов и узлов РЭА. По отношению к нагреву различают термопластические и термореактивные компаунды. Термопластические компаунды размягчаются при нагревании и отвердевают при охлаждении. Термореактивные компаунды в момент применения находятся в жидком состоянии, а затем под действием отвердителя или катализатора происходит их затверждение.

Стекла и ситаллы представляют собой сплавы специально подобранных оксидов и имеют аморфную структуру. Наилучшими электрическими и физико-химическими характеристиками обладает кварцевое стекло ($\mathcal{E} = 3,2..3,5$; $\text{tg}\delta = 0,0002$; $\mathcal{E}_{\text{пр}} = 35..40$ МВ/м; $\rho = 10^{14}..10^{15}$ Ом·м). Помимо обычных стекол в радиоэлектронике находят применение ситаллы — закристаллизованные стекла, имеющие микрокристаллическую структуру, обусловленную соответствующим составом стекла. Основные характеристики ситаллов: $\mathcal{E} = 7,5..8,5$; $\text{tg}\delta = (1..80) \cdot 10^{-3}$; $\mathcal{E}_{\text{пр}} = 40..60$ МВ/м; $\rho = 10^8..10^{12}$ Ом·м. Ситаллы хорошо шлифуются, благодаря чему они находят применение в качестве подложек гибридных интегральных микросхем.

Радиокерамические материалы характеризуются наличием в своем составе глины или каких-либо других неорганических материалов, обладающих сходными свойствами. Они состоят из частиц, имеющих

кристаллическую структуру, частиц аморфного вещества и некоторого количества закрытых пор, заполненных газом. Изменяя процентный состав этих компонентов, можно получить керамические материалы с необходимыми характеристиками. Материалы обладают достаточной механической прочностью, высокой нагревостойкостью и хорошими электрическими характеристиками. Различают установочные и конденсаторные керамические материалы. Установочная керамика применяется для изготовления разного рода изоляторов и конструкционных деталей: ламповых панелек, подложек толстопленочных интегральных микросхем и т. д. Конденсаторная керамика используется в качестве диэлектрика конденсаторов. Она обладает высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 10...230$) и малым углом диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta = 0,0001...0,0006$).

Резины — это многокомпонентные смеси на основе каучуков и близких к ним по свойствам веществ, называемых эластомерами. Для получения необходимых свойств резина подвергается так называемой вулканизации. Резины имеют сравнительно невысокую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 3..7$) и большие диэлектрические потери ($\text{tg}\delta = 0,02...0,1$). Они применяются в основном для изоляции проводов и кабелей.

Волокнистые материалы состоят в основном из частиц удлиненной формы — волокон, промежутки между которыми заполнены воздухом или какими-либо смолами. К ним относят дерево, состоящее в основном из целлюлозы ($\epsilon = 7$, $\text{tg}\delta = 0,01$), бумагу, картон, лакоткани. Они применяются в качестве изоляционных материалов, а специальная конденсаторная бумага — в качестве диэлектрика низкочастотных конденсаторов.

Слюды представляют собой группу материалов, относящихся к водным алюмосиликатам с ярко выраженной слоистой структурой. В радиоэлектронике находят применение два вида минеральных слюд: мусковит и флогопит. В состав мусковита входят K_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , H_2O . Он является высокочастотным диэлектриком ($\epsilon = 6..7$, $\text{tg}\delta = 0,0003$) и способен работать при температурах до $500-600$ °С. В состав флогопита помимо перечисленных компонентов входит MgO . Этот диэлектрик является низкочастотным ($\epsilon = 7$, $\text{tg}\delta = 0,0015$) и способен работать при температурах до $800-900$ °С. Помимо природных слюдяных материалов в радиоэлектронике находит применение синтетическая слюда—

фторофлогопит ($\epsilon = 8$, $\text{tg}\delta = 0,0002$), способная работать при температурах до 1100°C .

Активные диэлектрики характеризуются сильной зависимостью их свойств от внешних энергетических воздействий, что позволяет осуществлять генерацию, усиление, модуляцию и другие преобразования электрических и оптических сигналов. Они находят применение в устройствах функциональной электроники (УФЭ), отличительной чертой которых являются не схемотехнические принципы их построения. Функции схемотехники выполняют непосредственно те или иные процессы в диэлектриках. К активным диэлектрикам относятся сегнето-, пьезо- и пироэлектрики, а также электреты.

Сегнетоэлектрики имеют доменную структуру и характеризуются спонтанной поляризацией, направление которой можно изменять с помощью внешнего электрического поля. Следствием доменного строения сегнетоэлектриков является нелинейная зависимость их электрической индукции от напряженности электрического поля и резко выраженная температурная зависимость диэлектрической проницаемости. Они находят применение для изготовления малогабаритных низкочастотных конденсаторов, а также нелинейных конденсаторов, называемых варикондами, емкость которых зависит от приложенного напряжения, для ячеек памяти вычислительной техники, для модуляции и преобразования лазерного излучения.

Пьезоэлектрики обладают сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом, который может быть как прямым, так и обратным. При прямом пьезоэффекте под действием механических напряжений происходит поляризация диэлектрика, в результате чего на каждой из поверхностей диэлектрика возникают электрические заряды, линейно зависящие от механических усилий. При обратном пьезоэффекте происходит изменение размеров диэлектрика под действием электрического поля. Среди пьезоэлектриков одно из важных мест занимает монокристаллический кварц, из которого вырезают пластины с определенной кристаллографической ориентацией. Кварцевая пластина с электродами и держателем эквивалентна колебательному контуру с высокой добротностью, достигающей 10^6 — 10^7 .

К пироэлектрикам относят диэлектрики, в которых спонтанная поляризованность изменяется при изменении температуры. При неизменной

температуре спонтанная поляризованность пироэлектрика скомпенсирована свободными зарядами противоположного знака из-за процессов электропроводности и адсорбции заряженных частиц из окружающей атмосферы. При изменении температуры спонтанная поляризованность изменяется, что сопровождается освобождением некоторого заряда на поверхности пироэлектрика, вследствие чего в замкнутой цепи возникает электрический ток, пропорциональный скорости изменения температуры. Пироэффект используют для создания тепловых датчиков и приемников лучистой энергии, принцип действия которых состоит в том, что при облучении зачерненной (поглощающей) поверхности кристалла происходит его нагрев и возникает импульс тока, регистрируемый электронной схемой.

К электретам относятся диэлектрики, способные длительное время сохранять поляризованное состояние и создавать в окружающем их пространстве электрическое поле, то есть электрет является формальным аналогом постоянного магнита. Они находят применение для изготовления микрофонов и телефонов, измерения механических вибраций и во многих других случаях.