

621.315.4/61(075)

М 545

№3931-1



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
ТАГАНРОГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

---

**КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И  
НАНОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

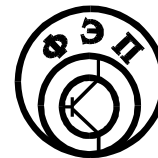
## **МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

**МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ  
ТЕХНИКИ**

**ЧАСТЬ 1**

**Конспект лекций**

Для студентов специальностей 210200,  
210600



**Таганрог 2006**

УДК 621.315.4/61:621.38(075.8)+621.38.002.3(075.8)

Составители: О.Н. Негоденко, С. П. Мирошниченко.

Методическое пособие «Материалы электронной техники»  
Часть 1. Конспект лекций. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006, 66с.

Ил. 60. Библиогр.: 14 назв.

*В пособии приводятся основные физические явления в диэлектриках, описываются их электрические, физико-химические и механические свойства. Методическое пособие предназначено для специальностей 210200, 210600, а также может быть полезно студентам радиотехнических специальностей.*

Рецензент Е. Т. Замков, кандидат технических наук, доцент кафедры КЭС, ТРТУ.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Целью курса является изучение физической сущности явлений, протекающих в электрорадиоматериалах (ЭРМ), их свойств, областей использования и правил выбора. ЭРМ называются материалы и компоненты, несущие электрическую нагрузку или электрическую совместно с механической. Остальные материалы, несущие только механическую нагрузку, называются конструкционными материалами и элементами конструкций. Конечно, радиоинженер должен знать как ЭРМ, так и конструкционные материалы. Некоторые ЭРМ, например, пластмассы, являются одновременно и конструкционными материалами. Такие конструкционные материалы как стали, цветные металлы и их сплавы рассмотрены в приводимой ниже литературе, но в курсе ЭРМ не рассматриваются. Поскольку авторами и другими преподавателями ТРТУ ранее был издан ряд учебных пособий по отдельным разделам курса, материал этих разделов не включен в курс лекций (рекомендуется изучать изданные ранее пособия).

Научно-технический прогресс в области радиоэлектротехники прежде всего связан с разработкой и использованием новых материалов. Надежность РЭА, быстродействие, экономичность, рабочие температуры, стойкость к ударам, излучениям определяются не столько схемой и конструкцией РЭА, сколько использованными материалами.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ И КЛАССИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

Качественные скачки в развитии радиоэлектроники возможны лишь за счет использования новых материалов и новых физических эффектов. Так, внедрение в 50-х годах 20 столетия ферритов позволило резко уменьшить габариты катушек индуктивности, трансформаторов, СВЧ переключателей, матриц памяти для ЭВМ. Использование полупроводников и полупроводниковой технологии в 60-е годы позволило резко уменьшить габариты и потребляемую мощность РЭА и ЭВА. Технология группового производства дала толчок развитию новых направлений микроэлектроники. В 70-е годы начали активно внедряться сверхпроводники, появилась функциональная электроника (устройства на поверхностных акустических волнах, акусто-электронные устройства, хемотронные устройства, устройства на цилиндрических магнитных доменах). В настоящее время активно развиваются наноэлектроника, вакуумная микроэлектроника.

Радиоматериалы делятся на активные и пассивные. Пассивные ЭРМ используются для изготовления резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и т.д., т.е. элементов, не связанных с преобразованием информации. ЭРМ, используемые для изготовления транзисторов, диодов, лазеров и т.д., т.е. элементов, связанных с преобразованием информации, называются активными материалами. ЭРМ работают в электрических и магнитных полях. По поведению в электрическом поле ЭРМ делят на проводники, полупроводники, диэлектрики, по поведению в магнитном поле – магнитные и немагнитные.

К проводниковым материалам относятся материалы с удельным электрическим сопротивлением  $\rho < 10^{-5}$  Ом\*м, к диэлектрикам -  $\rho > 10^9$  Ом\*м, к полупроводникам – с  $\rho = 10^{-6} - 10^9$  Ом\*м. Ряд материалов одновременно являются и диэлектриками, и полупроводниками в зависимости от температуры окружающей среды, агрегатного состояния. Материалы различаются и по ширине запрещенной зоны: проводники, если  $\Delta E \approx 0$ , полупроводники, если  $\Delta E < (2-3)$ эВ, диэлектрики, если  $\Delta E > (2-3)$ эВ. По агрегатному состоянию материалы делят на твердые, жидкие, газообразные. По структуре – на монокристаллические, поликристаллические, аморфные и смешанные.

Монокристаллы состоят из одинаковых кристаллических ячеек, расположенных в правильном порядке (кубических, ромбических, тетрагональных, тригональных, гексагональных, орторомбических и др.). Атомы или ионы располагаются в узлах решетки, в центре, в центре грани. Монокристаллы анизотропны, т.е. их свойства различны в разных направлениях.

Поликристаллические материалы состоят из большого числа мелких кристалликов, хаотически ориентированных в разных направлениях. Они изотропны, т.е. их свойства одинаковы в любом направлении.

Аморфные материалы характеризуются хаотическим расположением атомов или ионов.

Смешанные материалы – в аморфную среду вкраплены кристаллики.

Связь между атомами бывает ионной, ковалентной (атомной), металлической, молекулярной.

Ионная связь обусловлена кулоновским притяжением противоположно заряженных ионов. Характерна для неорганических диэлектриков (NaCl, LiF).

Ковалентная (атомная) связь возникает между атомами путем образования общих пар валентных электронов. Такую связь имеют Si, Ge, алмаз, соединения из элементов средних групп таблицы Менделеева (SiC, BN), а также органические соединения (полиэтилен  $C_2H_4$ , политетрафторэтилен  $C_2F_4$ , газы  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ).

Металлические связи возникают между положительно заряженными ионами металлов и обобществленным электронным облаком.

Молекулярные связи существуют между отдельными молекулами за счет электростатического притяжения находящихся в молекулах зарядов противоположного знака (силы Ван-дер-Ваальса). Эти связи очень слабы, поэтому вещества, имеющие этот вид связи, легко размягчаются при нагревании, имеют низкие температуры плавления.

Особым видом связи является водородная – через ион водорода, расположенном между двумя ионами, характерна для  $H_2O$ .

По магнитным свойствам материалы делятся на диамагнетики (магнитная проницаемость  $\mu < 1$ , но  $\mu \approx 1$ ), парамагнитные ( $\mu > 1$ , но  $\mu \approx 1$ ), ферромагнитные ( $\mu \gg 1$ ), ферримагнитные ( $\mu \gg 1$ ). У ферромагнитных материалов магнитные моменты соседних одинаковых решеток выстраиваются в одном направлении (рис.1).

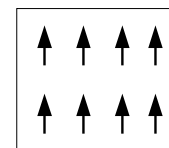


Рис. 1

Ферримагнитные материалы имеют две подрешетки, магнитные моменты их противоположны, при этом если они одинаковы (рис. 2 а), то материалы называются скомпенсированными ферримагнетиками (или антиферромагнетиками). Если магнитные моменты соседних подрешеток различны

(рис. 2 б), то материалы называются нескомпенсированными ферромагнетиками. Именно последние имеют  $\mu \gg 1$ .

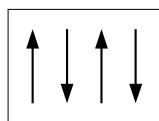


Рис. 2 а

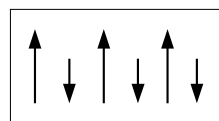


Рис. 2 б

Диэлектрики делятся на неполярные (нейтральные) и полярные. У неполярных диэлектриков молекула симметрична и электрический момент молекул равен нулю. У полярных диэлектриков молекула ассиметрична, электрический момент высок (электрический момент – произведение заряда на расстояние между зарядами противоположного знака).

Все реальные материалы имеют дефекты в своем строении. Дефекты делятся на точечные, линейные, объемные.

К точечным дефектам относят дефекты по Френкелю (рис. 3 а) – смещение атома из узла решетки в междоузлие, к дефектам по Шоттки (рис. 3 б) – отсутствие атома в узле решетки.

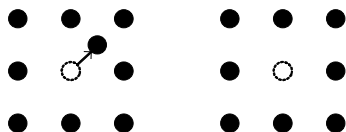


Рис. 3 а

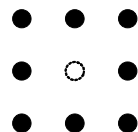


Рис. 3 б

Линейные дефекты – смещение одной части решетки относительно другой (дислокации линейные, винтовые, криволинейные, угловые).

Объемные дефекты – пустоты, скопление дислокаций.

Дефекты существенно влияют на свойства материалов, особенно монокристаллических.

Магнитные материалы могут быть проводниками, полупроводниками, диэлектриками. Все эти материалы имеют более обширную классификацию, которую удобно показывать на рисунках. Классификация пассивных диэлектриков приведена на рис. 4.



Рис. 4

Классификация активных диэлектриков представлена на рис. 5 – 14

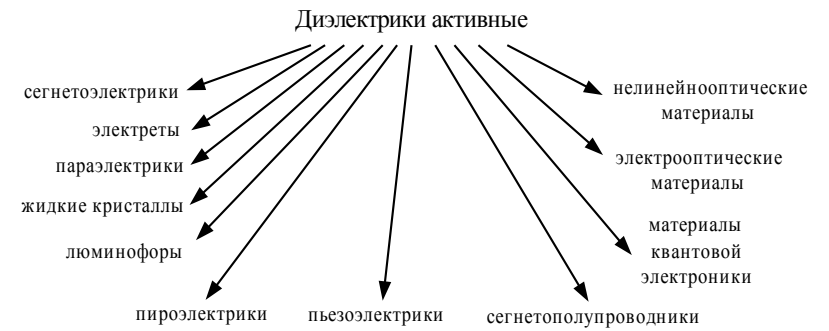


Рис. 5

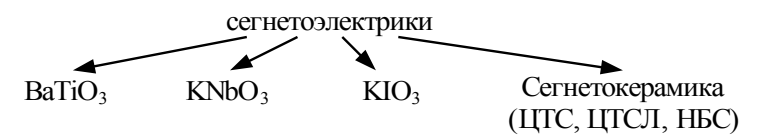


Рис. 6

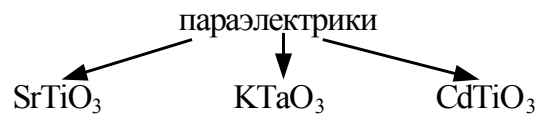


Рис. 7

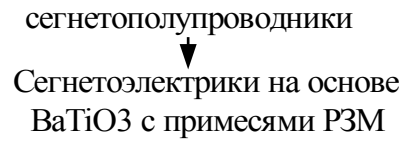


Рис. 8

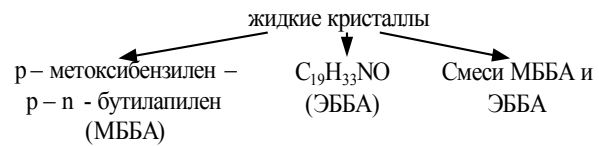


Рис. 9

Пьезомат  
ериалы  
эзоэлектр  
ики

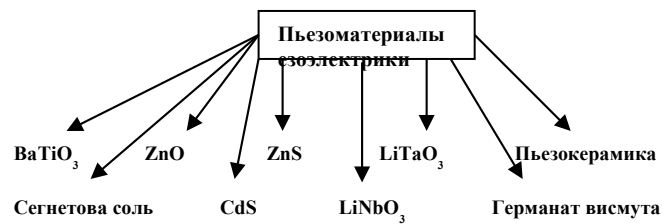


Рис. 10

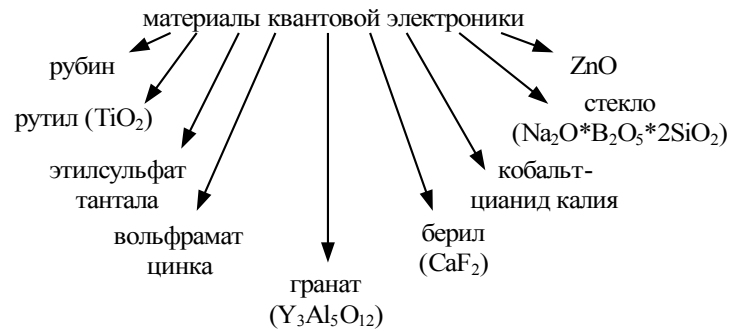


Рис. 11





Рис. 12

Электреты – это вещества с большой и длительно сохраняющейся остаточной поляризацией, т.е. электрет является формальным аналогом постоянного магнита. В настоящее время электретное состояние наблюдается, более чем у 70 диэлектриков. Они используются для изготовления микрофонов, в качестве пылеуловителей, дозиметров радиации, измерителей атмосферного давления и влажности, в вычислительных машинах, для измерения механических вибраций.

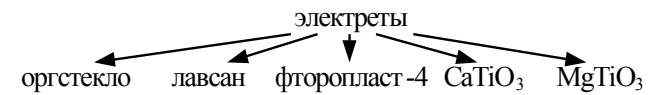


Рис. 13



Рис. 14

Классификация полупроводников приведена на рис. 15

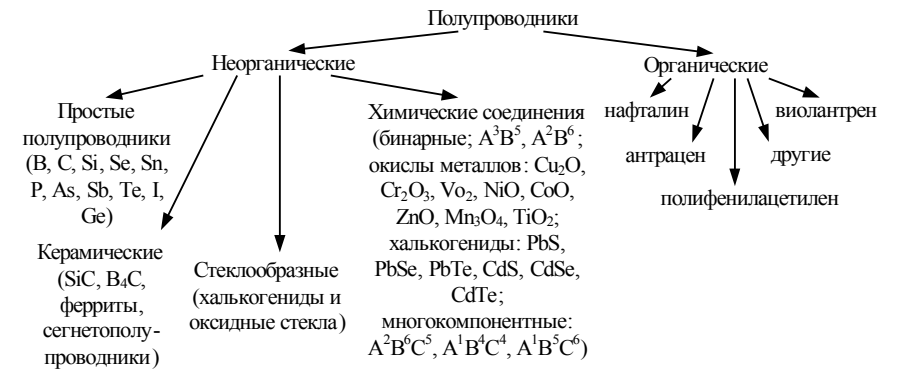


Рис. 15

Классификация проводников показана на рисунке 16

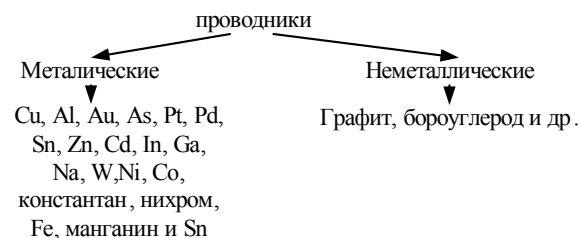


Рис. 16

Классификация сверхпроводников приведена на рис. 17

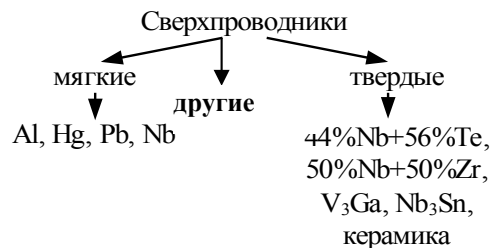


Рис. 17

Классификация магнитных материалов представлена на рис. 18

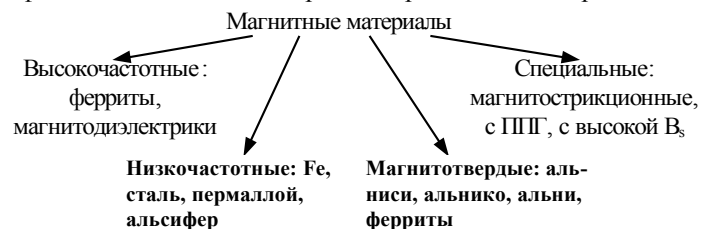


Рис. 18

На основе ЭРМ выпускаются РК, классификация которых показана на рис. 19. При построении РК произошло развитие особых направлений в науке, которые получили следующие названия: акустоэлектроника, магнитоэлектроника, криотроника, оптоэлектроника, хемотроника, фононика, приборы с поверхностным переносом заряда (ППЗ), полупроводниковая и диэлектрическая негатроника. Некоторые области знаний усиленно развиваются и сегодня, другие, развившись, отошли на задний план (ПЗС, хемотроника). Со временем картина развития меняется, появляются новые области знаний.

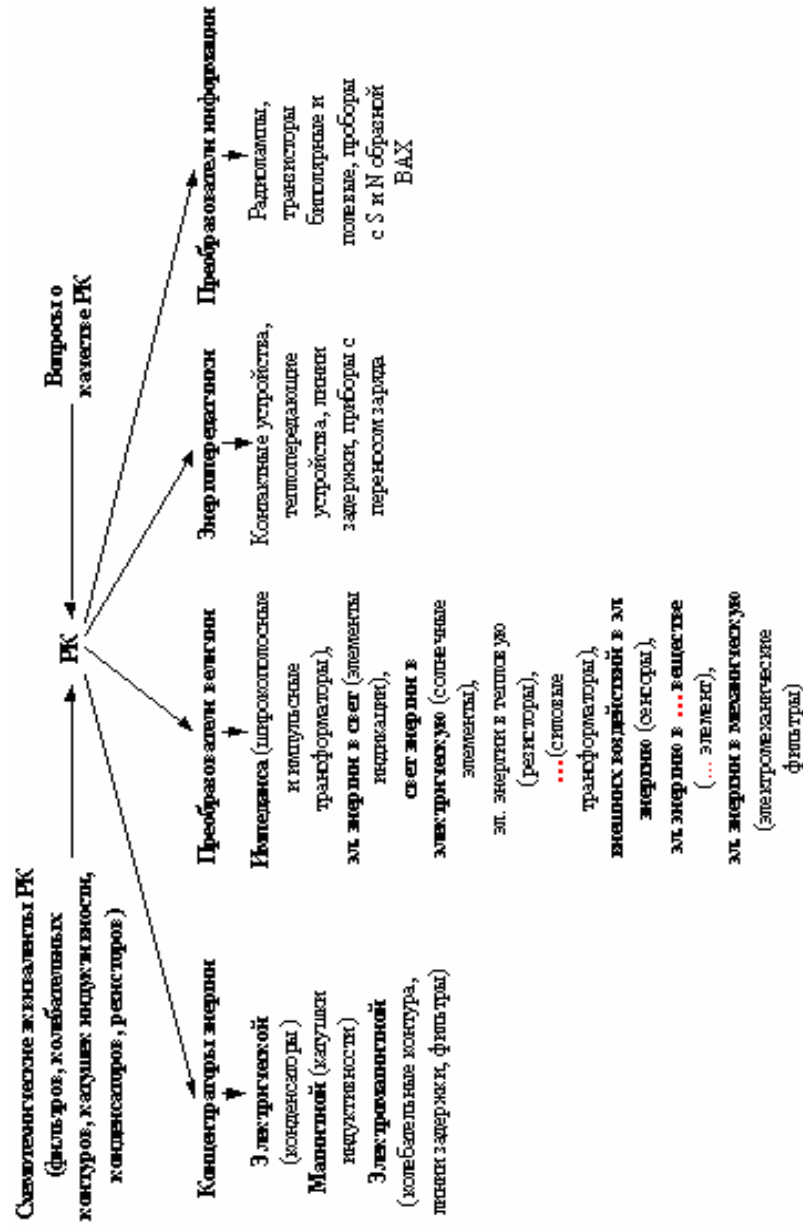


Рис. 19

Одной из интересных областей знаний, является микросхемотехника, связанная с построением эквивалентов РК, аналогов приборов с S и N образными ВАХ. Безусловно, развитие науки о РК сопровождается исследованиями их качества.

Все РК делятся на РК широкого применения, которые в больших количествах выпускаются заводами, и РК частного применения, которые проектируются и изготавливаются по частным требованиям. Их конструкция зависит от конструкции и назначения изделия, в котором они применяются, от освоенных процессов на заданном производстве.

К РК предъявляется много требований, главными из которых являются надежность, экономичность и технологичность. Надежность характеризуется интенсивностью отказов  $\lambda_i$ , причем

$$\lambda_i = \frac{\Delta N}{N_{cp} \Delta t}$$

где  $\Delta N$  – количество вышедших из строя РК за время испытания  $\Delta t$ ;

$N_{cp}$  – количество РК в испытываемой партии

Интенсивность отказов устройства

$$\lambda_y = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Экономичность связана с дешевизной применяемых материалов и оборудования техпроцессов. Технологичность – способность РК изготавливаться по простым и дешевым технологиям.

Понятно, что основные качества РК зависят от качества применяемых материалов, правильности их выбора. Прогресс в радиоэлектронике идет по схеме: новые материалы и техпроцессы – новые активные элементы – новая схемотехника, а иногда и системотехника. Так, развитие микроэлектроники позволило не только повысить надежность систем, повысить их сложность, но и уменьшить габариты и потребляемую мощность.

Таким образом, роль РМ в радиоэлектронике является определяющей.

## 2. ДИЭЛЕКТРИКИ

### 2.1. Характеристики диэлектриков в постоянных электрических полях

Диэлектрическая проницаемость и поляризованность, температурный коэффициент диэлектрической проницаемости.

Ограниченное смещение связанных зарядов диэлектриков или ориентация их дипольных молекул под действием электрического поля называется поляризацией.

Если проводящие обкладки конденсатора поместить в вакуум и приложить к ним постоянное напряжение, на обкладках появится заряд  $Q_0$  (рис. 1 а). Теперь если между теми же обкладками разместить диэлектрик, то под действием электрического поля произойдет смещение зарядов по направлению к обкладкам (рис. 1 б)

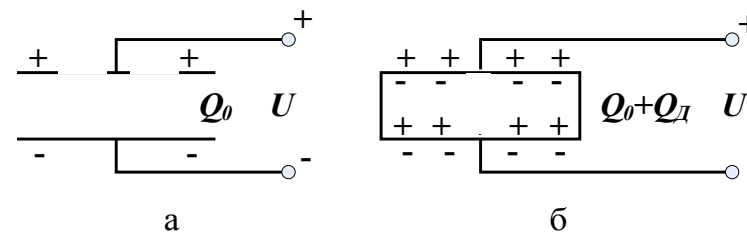


Рис. 1

Необходимость нейтрализовать действие зарядов диэлектрика вызывает поток дополнительных зарядов на обкладки конденсатора. Там появляется заряд  $Q_0 + Q_д$ . Емкость конденсатора  $C$ , определяемая как отношение заряда  $Q$  к приложенному напряжению  $U$ , возрастает.

Способность диэлектрика поляризоваться в электрическом поле характеризуется относительной статической диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , причем

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_д}{Q_0} = 1 + \frac{Q_д}{Q_0}$$

где:  $Q_д$  - заряд, обусловленный поляризацией диэлектрика;

$Q_0$  - заряд на обкладках вакуумированного конденсатора.

Относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз возрастает емкость плоского конденсатора, если между его обкладками поместить диэлектрик.

Видно, что  $\epsilon > 1$ , причем для газов  $\epsilon \approx 1$ , для жидкости  $\epsilon = 2 - 100$ , для твердых диэлектриков  $\epsilon = 2 - \text{десятки тысяч}$ .

Абсолютная диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon,$$

где:  $\epsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума,

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}.$$

Диэлектрики подразделяются на линейные и нелинейные. У линейных диэлектриков  $\boldsymbol{\varepsilon}$  не зависит от напряженности поля  $\boldsymbol{E}$  и связь электрической индукции  $\boldsymbol{D}$  с напряженностью поля  $\boldsymbol{E}$  имеет вид:

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \boldsymbol{E}.$$

У нелинейных диэлектриков  $\boldsymbol{\varepsilon}$  зависит от напряженности поля  $\boldsymbol{E}$ .

Электрическую индукцию в однородном линейном диэлектрике можно представить в виде:

$$\boldsymbol{D} = \boldsymbol{D}_0 + \boldsymbol{P}$$

где:  $\boldsymbol{D}_0$  - индукция в вакууме;

$\boldsymbol{P}$  – поляризованность диэлектрика.

Поляризованность  $\boldsymbol{P}$  с количественной стороны характеризует процесс поляризации диэлектрика в электрическом поле и равна суммарному электрическому моменту, отнесенному к единице объема, т.е.

$$\boldsymbol{P} = \frac{\sum \boldsymbol{m}}{V} = \frac{\sum qd}{Sd} = \frac{Q}{S} = \boldsymbol{\sigma}$$

где:  $d$  – толщина диэлектрика;

$q$  – единичный заряд;

$S$  – площадь обкладок конденсатора;

$Q$  – общий заряд;

$\boldsymbol{\sigma}$  – поверхностная плотность зарядов.

Следует помнить, что  $\boldsymbol{E}$ ,  $\boldsymbol{D}$ ,  $\boldsymbol{P}$  - векторные величины. В изотропном (однородном) диэлектрике векторы  $\boldsymbol{D}$ ,  $\boldsymbol{D}_0$ , и  $\boldsymbol{P}$  совпадают по направлению. В линейном диэлектрике поляризованность растет пропорционально напряженности поля, т.е.

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{\chi} \boldsymbol{E}$$

где:  $\boldsymbol{\chi}$  - диэлектрическая восприимчивость.

С учетом вышеизложенного получим

$$\boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}_0 = \boldsymbol{D}_0 + \boldsymbol{\chi} \boldsymbol{E}$$

или

$$\boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}_0 = \boldsymbol{\varepsilon}_0 + \boldsymbol{\chi}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{1} + \frac{\boldsymbol{\chi}}{\boldsymbol{\varepsilon}_0}.$$

Для нелинейных диэлектриков поляризованность  $\boldsymbol{P}_H$  нелинейно зависит от  $\boldsymbol{E}$ , т.е.

$$\boldsymbol{P}_H = \boldsymbol{\chi}(\boldsymbol{E}) * \boldsymbol{E}.$$

Физически это обусловлено тем, что поляризованность диэлектриков состоит из двух составляющих: индуцированной поляризованности  $P_{инд}$ , пропорциональной напряженности поля; спонтанной поляризованности  $P_{сп}$ , которая зависит от  $E$  не по линейному закону. Тогда

$$P_H = P_{инд} + P_{сп} = \chi_{инд} E + \chi_{сп}(E) E$$

$$\epsilon = 1 + \frac{\chi_{инд}}{\epsilon_0} + \frac{\chi_{сп}}{\epsilon_0}$$

У линейных диэлектриков  $\chi_{инд}$  такова, что  $\epsilon$  составляет единицы-десятки, а у нелинейных диэлектриков за счет  $\chi_{сп}(E)$   $\epsilon$  достигает десятков тысяч.

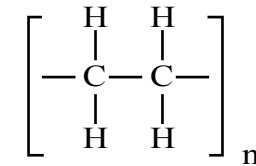
Для оценки температурных свойств диэлектриков введено понятие температурного коэффициента диэлектрической проницаемости

$$TK\epsilon = \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon \Delta t} \left( \frac{1}{K} \right)$$

$TK\epsilon$  может быть как положительным так и отрицательным и определяется по графикам зависимости  $\epsilon$  от температуры  $t$  методом графического дифференцирования.

## 2.2. Уравнение Клаузиуса-Моссоти

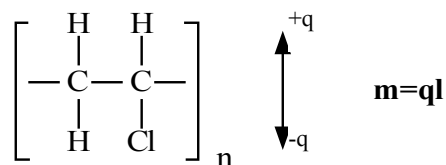
В зависимости от строения все диэлектрики делятся на нейтральные и полярные. Диэлектрики, в молекулах которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, называются нейтральными, если они не совпадают – полярными. Например, у полиэтилена структурная формула имеет вид



Здесь  $n$  – индекс полимеризации, показывающий сколько молекул мономера входит в молекулу полимера.

Формула симметрична, поэтому электрический момент  $m=0$ .

У полихлорвинила структурная формула имеет вид:



Здесь электрический момент  $m \neq 0$ .

Между диэлектрической проницаемостью и поляризуемостью элементарных частиц вещества существует определенное соотношение, называемое уравнением Клазиуса-Моссоти.

Для неполярных газов и жидкостей

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{n\alpha_{\epsilon}}{3\epsilon_0}$$

где  $n$  – число молекул в единице объема

$\alpha_{\epsilon}$  - электрическая поляризуемость одной молекулы.

Для полярных газов и с определенным приближением для полярных жидкостей

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = \frac{n}{3\epsilon_0} (\alpha_{\epsilon} + \alpha_d)$$

где  $\alpha_d$  - дипольная поляризуемость одной молекулы.

Уравнение Клазиуса-Моссоти используется для аналитического определения зависимости  $\epsilon$  от температуры.

Для твердых диэлектриков из-за близкого расположения молекул уравнение Клазиуса-Моссоти не справедливо.

### 2.3. Диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков

Диэлектрическая проницаемость слоистого диэлектрика или смеси разных диэлектриков определяется по формуле Лихтенекера

$$\epsilon^X = Q_1 \epsilon_1^X + Q_2 \epsilon_2^X$$

где  $\epsilon$ ,  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  - общая диэлектрическая проницаемость и проницаемость компонентов,

$Q_1$  и  $Q_2$  – объемные концентрации компонентов ( $Q_1 + Q_2 = 1$ )

$X$  – константа, характеризующая распределение компонентов в пространстве,  $X = -1 \div +1$

При параллельном включении компонентов (рис. 2)  $X = 1$  и



$$\varepsilon = Q_1 \varepsilon_1 + Q_2 \varepsilon_2$$

При последовательном включении компонент (рис. 3)  $X = -1$  и

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{Q_1 \varepsilon_2 + Q_2 \varepsilon_1}$$

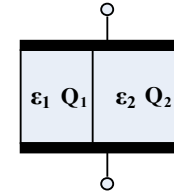


Рис. 2

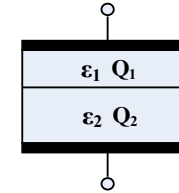


Рис. 3

Когда компоненты распределены хаотически,

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \frac{Q_1}{Q_2} + \varepsilon_2 \frac{Q_2}{Q_1}$$

Формула Лихтенекера справедлива, когда  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  не сильно различаются. При большом различии  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  используются другие формулы.

## 2.4. Деполярирующий фактор

При помещении диэлектрика в электрическое поле с электрической индукцией  $D$  он поляризуется. При этом заряды элементарных диполей во внутренних слоях диэлектрика взаимно компенсируют друг друга, а заряды на внешних поверхностях не скомпенсированы. Они создают электрическую индукцию полюсов  $D_d$  (деполяризующее поле), тогда индукция внутри диэлектрика

$$D_{\text{вн}} = D - D_d$$

Направление  $D_d$  противоположно направлению  $D$ . Величина индукции поверхностных зарядов  $D_d$  зависит от формы образца и от внешнего поля  $D$ . Влияние формы и направления внешнего поля на внутреннее поле в диэлектрике оценивается с помощью деполяризующего фактора

$$\gamma = \gamma_x i + \gamma_y j + \gamma_z k$$

Деполяризующее поле  $D_d = -\gamma P$

Знак “-” связан с тем, что заряды на поверхности диэлектрика вызывают приток на обкладки зарядов противоположного знака.

Если поле перпендикулярно поверхности плоского конденсатора,  $\gamma_x = \gamma_y = 0$ , а  $\gamma_z = 1$ . Тогда  $D_{ВН} = D + P$  и, как показано ранее,  $\epsilon = 1 + \frac{\chi}{\epsilon_0}$ . При полушарообразной форме электродов конденсатора

$$\epsilon = 1 + \gamma_{зш} \frac{\chi}{\epsilon_0}$$

а при полуцилиндрической форме электродов

$$\epsilon = 1 + \gamma_{зц} \frac{\chi}{\epsilon_0}$$

где  $\gamma_{зш} = 1/3$ ,  $\gamma_{зц} = 1/2$ .

Таким образом, только у плоского конденсатора емкость за счет диэлектрика изменилась в  $\epsilon$  раз. При других формах обкладок емкость увеличивается в меньшее количество раз.

## 2.5. Токи абсорбции

Процесс поляризации диэлектриков проходит в течение некоторого времени. Различают мгновенные и замедленные виды поляризации. К мгновенным видам поляризации относят те, время установления которых менее  $10^{-12}$  с. Время установления замедленных видов поляризации может достигать нескольких минут. За время установления данного вида поляризации принимают время, в течение которого ток, связанные с этим видом поляризации, уменьшается в  $e$  раз.

Токи в диэлектрике, связанные с его поляризацией, называются токами смещения  $I_{CM}$ . Токи в диэлектрике, связанные с наличием в нем небольшого числа свободных носителей зарядов, называются токами сквозной проводимости  $I_{СКВ}$ . Полный ток через диэлектрик

$$I = I_{СКВ} + I_{CM}$$

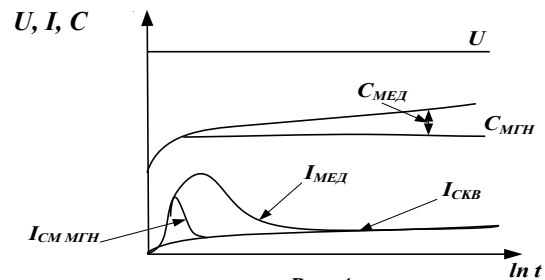


Рис. 4

При заряде конденсатора от источника постоянного напряжения  $U$  (рис.4) за время менее  $10^{-12}$ с произойдет мгновенная поляризация диэлектрика, потечет ток  $I_{СММГН}$ , емкость установится  $C_{МГН}$ . Замедленные виды поляризации приведут к медленному увеличению емкости, течет ток замедленных видов поляризации  $I_{МЕД}$ . Медленное изменение емкости и заряда конденсатора называется явлением абсорбции. Ток  $I_{МЕД}$  называют током абсорбции. У некоторых диэлектриков  $I_{АБС}$  спадает до нуля за 30-60 мин. Токи абсорбции велики у диэлектриков сложной структуры, полярных (бумага, диэлектрики электролитических конденсаторов).

Учет явления абсорбции важен при измерении сопротивления изоляции диэлектриков  $R_{ИЗ}$ . Отсчет  $R_{ИЗ}$  следует проводить через определенное время, когда  $I_{МЕД}=0$ .

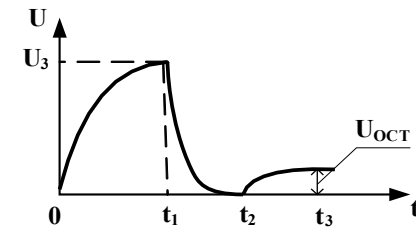


Рис. 5

Если конденсатор зарядить до напряжения  $U_3$  (рис. 5) за время  $t_1$ , затем замкнуть его накоротко на время  $t_2-t_1$ , затем оставить на некоторое время  $t_3-t_2$  разомкнутым, то при наличии в диэлектрике явления абсорбции на обкладках появится напряжение  $U_{ост}$  (остаточное). Коэффициентом абсорбции называется отношение  $U_{ост}$  к  $U_3$ , т.е.

$$K_{АБС} = \frac{U_{ост}}{U_3}$$

Величина коэффициента абсорбции может достигать 10% (у электролитических конденсаторов).

### 3. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

#### 3.1. Виды электропроводности диэлектриков

В зависимости от природы носителей заряда различаются следующие виды электропроводности:

- электронная, проводимость не зависит от времени;

- ионная, прохождение тока через вещество сопровождается электролизом, проводимость уменьшается со временем;

- молионная, носителями зарядов являются заряженные группы молекул, прохождение тока через вещество сопровождается явлением электрофореза, проводимость уменьшается со временем;

- смешанная электропроводность, когда носителями заряда являются электроны и ионы одновременно или другие носители.

Выделим в однородном диэлектрике с носителями заряда одного знака куб (рис. 1),

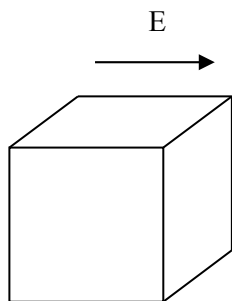


Рис. 1

Заряд куба равен

$$Q = nq,$$

где:  $n$  – число носителей заряда в единице объема;

$q$  – заряд носителя.

При наличии электрического поля плотность тока равна количеству электричества, протекающего в единицу времени через поперечное сечение куба, т.е.

$$j = qnV_{cp},$$

где:  $V_{cp}$  – средняя скорость движения носителей. С другой стороны закон Ома в дифференциальной форме имеет вид

$$j = \gamma E,$$

где:  $\gamma$  – объемная удельная проводимость вещества.

Тогда

$$nqV_{cp} = \gamma E; \gamma = nq \frac{V_{cp}}{E} = nq\mu,$$

здесь  $\mu = \frac{V_{cp}}{E}$  – подвижность носителей, т.е. средняя скорость движения носителей на единицу напряженности электрического поля.

Если в создании тока участвуют носители заряда разных типов, то

$$\gamma = \sum_{i=1}^p n_i q_i \mu_i .$$

Характер электропроводности и величина удельной проводимости зависят от химического состава вещества, его строения, агрегатного состояния, температуры, материала электродов, напряженности поля.

### 3.2. Электропроводность газов

Ионизация нейтральных молекул газа происходит либо под действием внешних факторов (рентгеновские, ультрафиолетовые, космические лучи и т.д.), либо вследствие соударения заряженных частиц с молекулами.

Электропроводность газов, обусловленная действием внешних факторов, называется несамостоятельной.

График зависимости плотности тока  $j$ , протекающего через газ, от напряженности поля  $E$  показан на рис. 2.

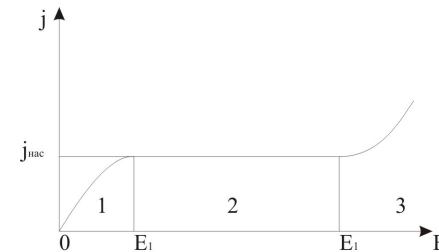


Рис. 2

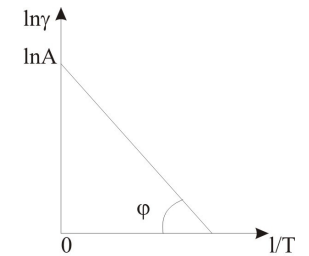


Рис. 3

Здесь участок 1 – несамостоятельная проводимость, закон Ома выполняется, концентрация носителей заряда постоянна. Для воздуха

$E_1 = 0,006 \frac{B}{см}$ . Участок 2 – несамостоятельная проводимость, закон Ома

не выполняется, все ионы уходят на электроды, не успевая рекомбинировать. Участок 3 – самостоятельная проводимость, обусловленная действием

ударной ионизации. Для воздуха  $E_2 \approx 10^4 \frac{B}{см}$ . При несамостоятельной про-

водимости воздух является хорошим диэлектриком,  $j_{нас} \approx 10^{-19} \frac{A}{см^2}$ .

Проводимость газов зависит от температуры. Типичный график этой зависимости представлен на рис. 3. Этот график аппроксимируют формулой

$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta E}{kT}}$ , где:  $\Delta E$  – энергия ионизации молекул газа;  $k$  – постоянная

Больцмана:  $k = 8,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{эВ}}{\text{град}}$ ;  $T$  – абсолютная температура.

Как видно, с ростом температуры проводимость возрастает (вследствие увеличения концентрации носителей заряда).

Так как  $\ln \gamma = \ln A - \frac{\Delta E}{kT}$ , то при  $T \rightarrow \infty$   $\ln \gamma = \ln A$ .

Это уравнение является уравнением прямой в отрезках координат типа  $y = ax + b$ . Здесь  $b = \ln \gamma$ ,  $x = \frac{1}{T}$ ,  $a = -\frac{\Delta E}{k} = \text{tg} \varphi$ . Отсюда энергия ионизации молекул газа  $\Delta E = k \cdot \text{tg} \varphi$ . Знак “-” говорит о том, что угол  $\varphi$  находится во второй четверти, где  $\text{tg} \varphi$  отрицателен.

### 3.3. Электропроводность жидкостей

Электропроводность жидкостей зависит от строения молекул, наличия примесей, их типа. Электропроводность нейтральных жидкостей-диэлектриков определяется диссоциацией примесей, полярных – кроме диссоциации примесей диссоциацией молекул самой жидкости. Ток в жидкости обусловлен как передвижением ионов, так и передвижением крупных заряженных коллоидных частиц.

Полярные жидкости имеют большую проводимость, чем нейтральные. График зависимости плотности тока от напряженности поля приведен на рис. 4.

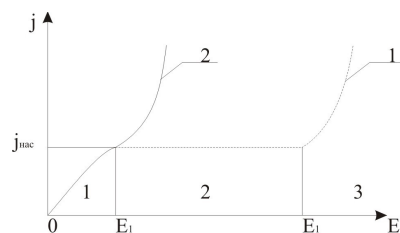


Рис. 4

Кривая 1 соответствует чистой жидкости, а кривая 2 – жидкости с примесями. На участке 2 кривой 2 проводимость обусловлена увеличением подвижности ионов, степенью диссоциации, ударной ионизацией, холодной эмиссией электронов из катода (Эффект Шоттки).

С увеличением температуры возрастает подвижность ионов, степень диссоциации, поэтому проводимость возрастает и может быть аппроксимирована формулой

$$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

Для нейтральных жидкостей  $\gamma = 10^{-13} - 10^{-15} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$ , слабополярных –  $\gamma = 10^{-12} - 10^{-7} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$ , полярных –  $\gamma = 10^{-7} - 10^{-5} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$ .

### 3.4. Электропроводность твердых диэлектриков

Электропроводность твердых диэлектриков обусловлена передвижением ионов самого диэлектрика, ионов примесей и электронов. Зависимость проводимости твердого диэлектрика от температуры в общем случае подчиняется выражению

$$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta E_1}{kT}} + Be^{-\frac{\Delta E_2}{kT}},$$

где:  $A$  и  $B$  – проводимость при  $T \rightarrow \infty$ ;  $\Delta E_1$  и  $\Delta E_2$  – энергии, зависящие от механизма электропроводности, это могут быть энергии, необходимые для перевода из узлов в междоузлия решетки положительных или отрицательных ионов, энергия ионизации атомов примесей и т.д.

Как правило, одно из двух слагаемых преобладает в низкотемпературной области, другое в высокотемпературной. График зависимости  $\gamma$  от  $\frac{1}{T}$  показан на рис. 5.

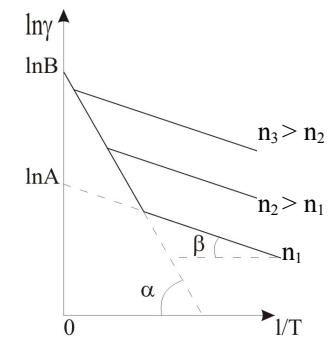


Рис. 5

Здесь:  $n_1, n_2, n_3$  – концентрации примесей. При низких температурах преобладает примесная проводимость, при высоких – собственная.

Например, в ионных кристаллических диэлектриках электропроводность обусловлена перемещением собственных ионов, вырываемых из решетки

под влиянием флуктуаций теплового движения, и ионами примесей. В этом случае

$$\gamma = Ae^{-\frac{\Delta E_{nn} + \frac{1}{2}\Delta E_{un}}{kT}} + Be^{-\frac{\Delta E_{nc}}{kT}}.$$

Здесь:  $\Delta E_{nn}$  – энергия перемещения ионов примеси;

$\Delta E_{un}$  – энергия ионизации ионов примеси ( $\frac{1}{2}$  связана с возникновением двух зарядов);

$\Delta E_{nc}$  – энергия перемещения собственных ионов.

Из этой формулы следует, что

$$\Delta E_{nc} = k \cdot tg\alpha,$$

$$\Delta E_{nn} + \frac{1}{2}\Delta E_{un} = k \cdot tg\beta.$$

В кристаллических диэлектриках с атомной или молекулярной решеткой электропроводность связана только с наличием примесей.

Электропроводность аморфных диэлектриков, как правило, ионная (стекла, слюда, полимеры, большинство видов керамики), она зависит от химического состава вещества, химического состава примесей, количества примесей, степени полимеризации.

С ростом температуры проводимость аморфных диэлектриков увеличивается по показательному закону.

При сильном электрическом поле, когда  $E > 10^5 - 10^6 \frac{B}{см}$ , в твердых

диэлектриках появляется электронный ток, быстро возрастающий с увеличением напряженности поля. Справедлива формула Пуля

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

где:  $\beta$  – коэффициент, зависящий от материала;  $\gamma_0$  – проводимость

при  $E = 10^5 - 10^6 \frac{B}{см}$ . Иногда работает закон Френкеля

$$\gamma = \gamma_0 e^{\beta \sqrt{E}}.$$

Для некоторых твердых диэлектриков характерно явление “ползучести” (старения) удельного сопротивления, т.е. эффект его уменьшения со временем под действием поля. Этот процесс обратим, он объясняется изменением химического строения материала. Например, старение титаносодержащей керамики объясняется выходом кислорода из решетки. Старение характерно для материалов с ионной проводимостью. У материалов с электронной проводимостью старение не наблюдается.



При примесной ионной проводимости ток спадает со временем, т.к. уменьшается концентрация ионов примеси. Этот процесс называется электрохимической очисткой.

Если диэлектрик гигроскопичен, то впитываемая им влага увеличивает проводимость. Это объясняется увеличением числа носителей заряда за счет диссоциации молекул примеси, имеющихся в воде, и диссоциацией молекул самого диэлектрика.

### 3.5. Поверхностная электропроводность диэлектриков

Вследствие неизбежного увлажнения, окисления и загрязнения поверхности у твердых диэлектриков создается заметная поверхностная электропроводность.

Удельное поверхностное сопротивление численно равно сопротивлению квадрата поверхности любых размеров. Так как

$$R_s = \rho_v \frac{l}{ab},$$

где:  $\rho_v$  – объемное удельное сопротивление поверхности глубиной  $a$ , шириной  $b$  и длиной  $l$ , то

$$R_s = \frac{\rho_v}{a} \cdot \frac{l}{b} = \rho_s \cdot \frac{l}{b},$$

где:  $\rho_s$  – удельное поверхностное сопротивление,  $\frac{\text{Ом}}{\text{кВ}}$ . Полное сопротивление изоляции диэлектрика

$$R_{из} = \frac{R_v \cdot R_s}{R_v + R_s}.$$

Чтобы увеличить  $R_s$  длину поверхности изоляторов стараются увеличить.

Все материалы делятся на не растворимые в воде (парафины, керамика, янтарь), частично растворимые (стекла), с пористой структурой (бумага).

С увеличением влажности окружающей среды удельное поверхностное сопротивление падает тем сильнее, чем лучше материал растворяется в воде, чем больше он загрязнен.

Присутствие загрязнений на поверхности мало сказывается на электропроводности гидрофобных (не смачиваемых водой) диэлектриков и сильно влияет на электропроводность гидрофильных (смачиваемых водой) диэлектриков.

## 4. СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ В ПЕРЕМЕННЫХ ПОЛЯХ

### 4.1. Комплексная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь

Поместим линейный однородный диэлектрик между обкладками плоского конденсатора, находящегося под напряжением  $U = U_m e^{j\omega t}$ , где  $U_m$  - амплитуда напряжения,  $\omega$  - круговая частота,  $t$  - текущее время (рис.1).

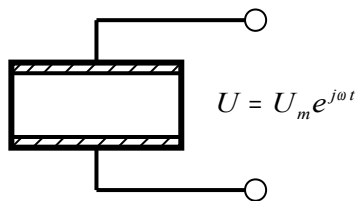


Рис. 1

Такой конденсатор можно представить схемой замещения (рис.2).

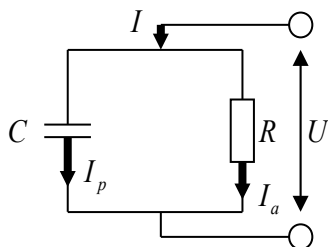


Рис. 2

Схема замещения не отражает сути физических процессов, происходящих в диэлектрике, и введена условно. Этот рисунок является схемой замещения конденсатора, если ее реакция на воздействие внешнего напряжения такая же, как у самого конденсатора, т.е. одинаковы частотные характеристики, равны углы сдвига фаз между током и напряжением, равны запасаемые и теряемые энергии. Емкость  $C$  характеризует запасаемую электрическую энергию в конденсаторе, сопротивление  $R$  - потери энергии в диэлектрике, идущие на его нагрев. Предположим, что потери на сквозную проводимость и потери в обкладках конденсатора отсутствуют.

Построим векторную диаграмму токов и напряжения в реальном конденсаторе (рис.3).

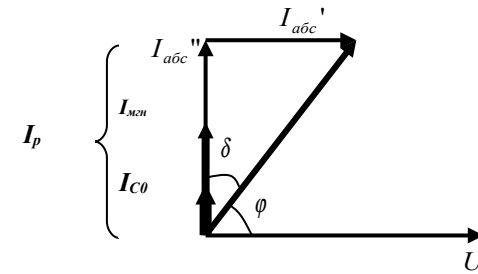


Рис. 3

Реактивный ток  $I_p$  опережает напряжение  $U$  на четверть периода ( $90^\circ$ ), причем

$$I_p = I_{c0} + I'_{abc} + I_{mgn}, \text{ где } I_{c0} -$$

емкостной ток через конденсатор при отсутствии диэлектрика между его обкладками;  $I_{mgn}$  и  $I'_{abc}$  - токи мгновенной и медленной поляризации, связанные с запасаемой энергией.

Активный ток  $I_a = I'_{abc}$ , где  $I'_{abc}$  - составляющая абсорбционного тока, связанная с теряемой энергией.

Ток через конденсатор  $I = I_m e^{j(\omega t + \varphi)}$ , где  $I_m$  - амплитуда тока;  $\varphi$  - угол сдвига фаз между током  $I$  и напряжением  $U$ ;  $\delta$  - угол потерь, дополняющий угол  $\varphi$  до  $90^\circ$ .

Закон Ома для параллельной схемы замещения

$$I = U \left( \frac{1}{R} + j\omega C \right).$$

Для диэлектриков в переменных полях вводят понятие комплексной диэлектрической проницаемости  $\dot{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$ , где  $\epsilon'$  - действительная часть

$\dot{\epsilon}$ , причем,  $\epsilon' = \frac{C}{C_0}$ ,  $C_0$  - емкость вакуумного конденсатора,  $\epsilon''$  - мнимая составляющая  $\dot{\epsilon}$ .

Тогда

$$I = U \left( \frac{1}{R} + j\omega \epsilon' C_0 \right) = j\omega C_0 U (\epsilon' + \frac{1}{Rj\omega C_0}) = j\omega C_0 U (\epsilon' - j\epsilon'').$$

Отсюда

$$I_a = \omega C_0 \epsilon'' U, \quad I_p = \omega C_0 U \epsilon'$$

Из рис. 3 видно, что

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{\omega C_0 \varepsilon'' U}{\omega C_0 U \varepsilon'} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

Мощность потерь

$$P_a = UI_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$$

Запасаемая мощность

$$P_p = UI_p = U^2 \omega C, \text{ тогда } \operatorname{tg} \delta = \frac{P_a}{P_p}$$

Отсюда видно, что потери мощности важно учитывать на высоких частотах, особенно при больших рабочих напряжениях. Если существует сквозная активная проводимость, то на диаграмме к току  $I'_{abc}$  следует добавить  $I_{скв}$  (ток сквозной) и  $\operatorname{tg} \delta$  будет большим.

## 4.2. Виды поляризации диэлектриков

Различают следующие виды поляризации диэлектриков:

- деформационные - упругий сдвиг зарядов друг относительно друга под воздействием электрического поля, не сопровождается потерями энергии; это электронная и ионная поляризации;
- релаксационные - связаны с тепловыми колебаниями электронов, ионов или с поворотом полярных молекул в электрическом поле; сопровождаются потерями энергии; это электронно-релаксационная, ионно-релаксационная, дипольно-релаксационная поляризации;
- с особым механизмом, связаны с потерями энергии; это структурная, спонтанная и резонансные поляризации.

Электронная поляризация – упругое смещение и деформация оболочек атомов и ионов под действием внешнего электрического поля (рис.4).

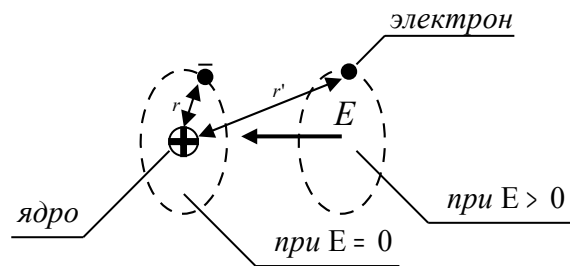


Рис. 4

Наблюдается у всех диэлектриков без исключения. Время установления равно  $10^{-15}$ - $10^{-14}$ с. Проявляется на частотах  $10^{14}$ - $10^{16}$  Гц. Величина относительной диэлектрической проницаемости вещества только с этим видом поляризации численно равна квадрату показателя преломления света, т.е.

$$\varepsilon = n^2.$$

К числу диэлектриков, у которых наблюдается только электронная поляризация, относятся следующие: кислород, азот, метан, трансформаторное масло, четыреххлористый водород (жидкость), толуол, бензол, парафин, цераезин, полиэтилен, полиизобутилен, полипропилен, натуральный каучук, эскапон, полистирол, фторопласт-4.

Графики зависимости  $\varepsilon'$  от частоты и температуры приведены на рис.5.

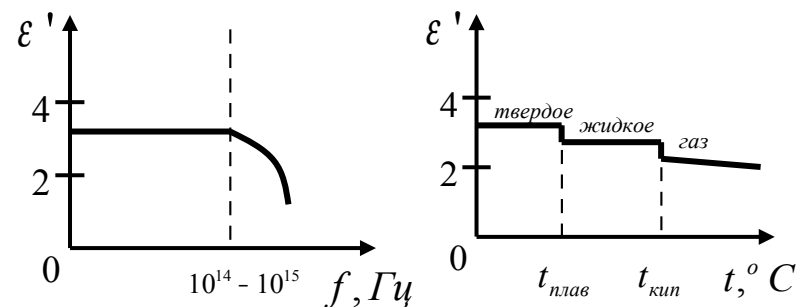


Рис. 5

Для веществ с чисто электронной поляризацией

$$\varepsilon' = 1 + \frac{\chi}{\varepsilon_0} = 1 + n\alpha_e,$$

где:  $n$  - число атомов или ионов в единице объема;

$\alpha_e$  - электронная поляризуемость одного атома или иона.

При этом  $\alpha_e$  не зависит от температуры. Некоторое уменьшение  $\varepsilon'$  с ростом температуры связано с уменьшением числа частиц в единице объема. Наиболее резкое снижение  $\varepsilon'$  наблюдается при переходе вещества из одного агрегатного состояния в другое.

### Ионная поляризация

Характерна для твердых тел с ионным строением и плотной упаковкой ионов. Выражается в упругом смещении ионов в электрическом поле. Время установления лежит в пределах  $10^{-12}$  -  $10^{-13}$  с. Поляризуемость одного иона

$$\alpha_u = \frac{2q}{\nu}$$

где:  $q$  - заряд иона;  $\nu$  - коэффициент упругой связи между ионами.  
Диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon' = 1 + n(\alpha_{\text{э}} + \alpha_{\text{и}}).$$

Графики зависимостей  $\epsilon'$  от частоты и температуры представлены на рис. 6.

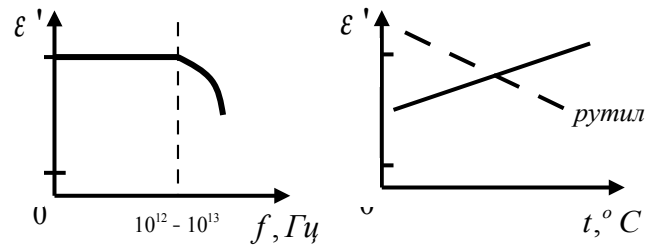


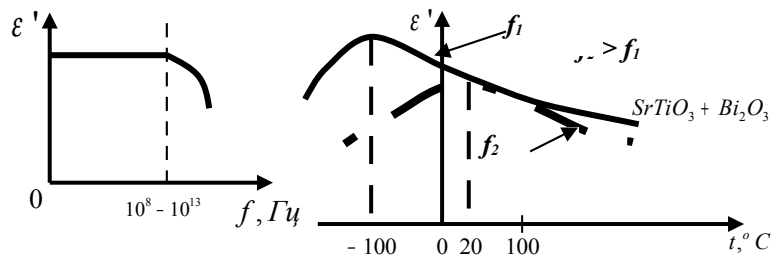
Рис. 6

С увеличением температуры  $\nu$  уменьшается и  $\alpha_{\text{и}}$  увеличивается, поэтому  $\epsilon'$  возрастает. Исключение составляет рутил ( $\text{TiO}_2$ ), у которого  $\alpha_{\text{э}} > \alpha_{\text{и}}$  с ростом температуры  $\epsilon'$  уменьшается.

К диэлектрикам, у которых превалирует ионная поляризация, относятся следующие:  $\text{KCl}$ ;  $\text{NaCl}$ ;  $\text{CaCO}_3$ ;  $\text{PbO}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### Электронно-релаксационная поляризация

Возникает за счет ориентации возбужденных тепловой энергией избыточных «дефектных» электронов или «дырок». Характерна для диэлектриков с высоким показателем преломления, большим внутренним полем и электронной электропроводностью:  $\text{TiO}_2$  с примесями  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Ti}$ ; ряда соединений на основе оксидов металлов с переменной валентностью ( $\text{Nb}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Fe}$ ). Величина  $\epsilon'$  очень высока, в ее температурной зависимости имеется максимум, главным образом, в области отрицательных температур. Время установления лежит в пределах  $10^{-13}$ - $10^{-8}$  с. Графики зависимости  $\epsilon'$  от частоты и температуры показаны на рис.7.



### Ионно-релаксационная поляризация

Наблюдается в неорганических стеклах и в некоторых ионных кристаллических неорганических веществах с неплотной упаковкой ионов. В этом случае слабо связанные ионы вещества под действием внешнего электрического поля среди хаотических тепловых перебросов получают избыточные перебросы в направлении поля. Время установления лежит в пределах  $10^{-13}$  -  $10^{-8}$  с.

Графики зависимости  $\varepsilon'$  от частоты и температуры показаны на рис.8.

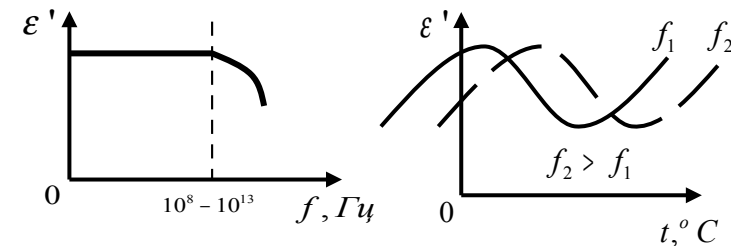


Рис.8.

Сначала с увеличением температуры увеличивается количество ионов, участвующих в ионизации, что облегчает поляризацию и  $\varepsilon'$  растет. Затем, уменьшается число молекул в единице объема, увеличиваются хаотические колебания,  $\varepsilon'$  падает. Затем,  $\varepsilon'$  опять может возрастать в связи с появлением новых видов поляризации. Максимум  $\varepsilon'$  наблюдается в области отрицательных температур при низких частотах. К веществам, у которых преобладает этот вид поляризации, относятся некоторые сорта керамики.

### Дипольно-релаксационная поляризация

Заключается в частичном ориентировании полярных молекул вещества под действием электрического поля, а также в упругом смещении зарядов внутри молекул. Связана с тепловыми колебаниями частиц. Характерна для полярных газов и жидкостей, а также для твердых полярных органических диэлектриков, но в этом случае поляризация обусловлена не поворотом самой молекулы, а поворотом в ней полярных радикалов по отношению к молекуле. Такую поляризацию также называют дипольно-радикальной. Этот вид поляризации характерен для полиамидных, эпоксиальных, фенолоформальдегидных, полиэфирных, органических смол, фторопласта-3, полихлорвинила, целлюлозы и ее производных. Время установления лежит в преде-

лах  $10^{-13}$ - $10^{-8}$ с. Зависимости  $\epsilon'$  от частоты и температуры такие же, как показанные на рис.8.

При отрицательных температурах в зависимости имеется максимум. С увеличением частот максимум перемещается в область положительных температур.

### Структурная поляризация

Проявляется в твердых диэлектриках с неоднородной структурой при наличии макроскопических неоднородностей и примесей. Заметна на низких частотах и связана со значительными потерями энергии. Отдельные области диэлектрика с разной проводимостью ведут себя как большие полярные молекулы. В электрическом поле свободные носители заряда перемещаются в пределах каждой области. С увеличением частоты  $\epsilon'$  падает (рис.9), т.к. области не успевают переориентироваться. По графику  $\epsilon'=f(f)$  можно судить о степени неоднородности диэлектрика. Время установления лежит в пределах от сотых долей секунды до нескольких часов. Характерна для бумаги, пропитанной головаксом, текстолита, гетинакса.

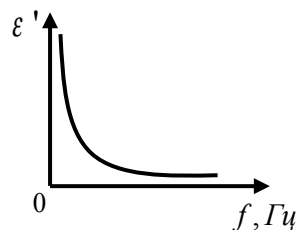


Рис. 9.

### Резонансные виды поляризации

Наблюдаются на частотах, совпадающих с собственной частотой колебаний электронов и ионов. Характерные зависимости  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  показаны на рис.10.

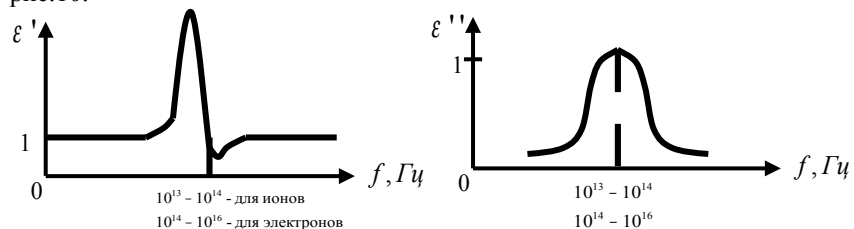


Рис. 10

На резонансной частоте поглощение энергии максимально, т.е. эти виды поляризации хотя и мгновенные, но с потерями.



Спонтанная (самопроизвольная) поляризация связана с образованием в ряде веществ при определенной температуре группировок ионов, обладающих большим электрическим моментом. Поляризованность нелинейно зависит от напряженности внешнего электрического поля. Поляризация сопровождается значительными потерями энергии. Спонтанной поляризацией обладают сегнетоэлектрики.

## 5. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ И ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

### 5.1. Виды диэлектрических потерь

Различают следующие виды потерь энергии в диэлектрике:

- потери, обусловленные сквозной проводимостью;
- потери, связанные с поляризацией.
- потери на ионизацию воздушных включений.
- потери, обусловленные неоднородностью структуры.,

Потери на сквозную проводимость значительны у материалов высокой объемной и поверхностной проводимостью. Если конденсатор с потерями представить параллельной, схемой замещения, состоящей из емкости  $C$  и сопротивления  $R_{из}$ , то

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{U / \omega C}{R_{из} U} = \frac{1}{R_{из} \omega C}.$$

Мощность потерь

$$P_a = I_a U = \frac{U^2}{R_{из}}$$

Видно, что  $\operatorname{tg} \delta$  обратно пропорционален частоте, а мощность потерь от частоты не зависит.

С другой стороны, т.к.  $C = \frac{\varepsilon' S}{d}$  ( $S$ -площадь обкладок,  $d$  - толщина диэлектрика), то

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{d}{R_{из} \omega S \varepsilon'} = \frac{Y_{СКВ}}{\omega \varepsilon'}, \text{ где } Y_{СКВ} = \frac{d}{R_{из} S}.$$

удельная сквозная проводимость.

Чем больше  $Y_{скв}$  и меньше  $\epsilon'$ , тем больше  $tg\delta$ . Для хороших диэлектриков потерями на сквозную проводимость можно пренебречь уже на частотах 1-100 кГц.

Температурные зависимости  $tg\delta$  и  $P_a$  описываются выражениями:

$$tg\delta = Be^{-\frac{c}{T}}, P_a = Ae^{-\frac{b}{T}}$$

где: A, B, b, c, - постоянные коэффициенты, зависящие от материала.

Видно, что и  $tg\delta$  и  $P_a$  с ростом температуры возрастают, что связано с уменьшением  $R_{из}$ .

Так как  $tg\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$  для потерь на поляризацию, то общую частотную зависимость  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  для диэлектриков удобнее представлять в виде, приведенном на рис.1.

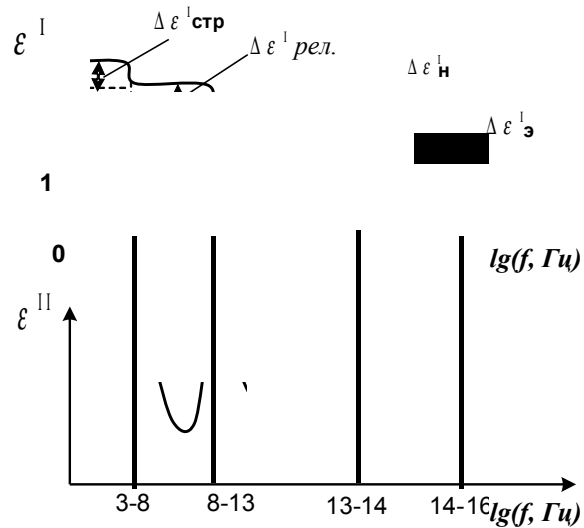


Рис.1

Здесь:  $\Delta \epsilon'_{стр}$  - приращение  $\epsilon'$  за счет структурной поляризации;

$\Delta \epsilon'_{рел.}$  - приращение  $\epsilon'$  за счет релаксационных видов поляризации;

$\Delta \epsilon'_{и}$  и  $\Delta \epsilon'_{э}$  - приращение  $\epsilon'$  за счет ионной и электронной поляризаций.

При совпадении частоты сигнала с частотой собственных колебаний частиц вещества наблюдается интенсивное поглощение энергии электрическо-

го поля. Потери и  $\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$  возрастают с частотой в каждом пике до тех пор, пока поляризация успевает следовать за смещением поля. Чем больше частота  $f$ , тем больше число переориентаций диполя, тем больше  $\operatorname{tg}\delta$  и  $P_a$ . Когда частицы не успевают ориентироваться за полем,  $\varepsilon''$ ,  $\operatorname{tg}\delta$  падает, а мощность потерь становится постоянной ( $P_a = U^2\omega C\operatorname{tg}\delta$ ,  $\omega$  – растет,  $\operatorname{tg}\delta$  – падает,  $P_a = \text{const}$ ). Это показано на рис. 2.

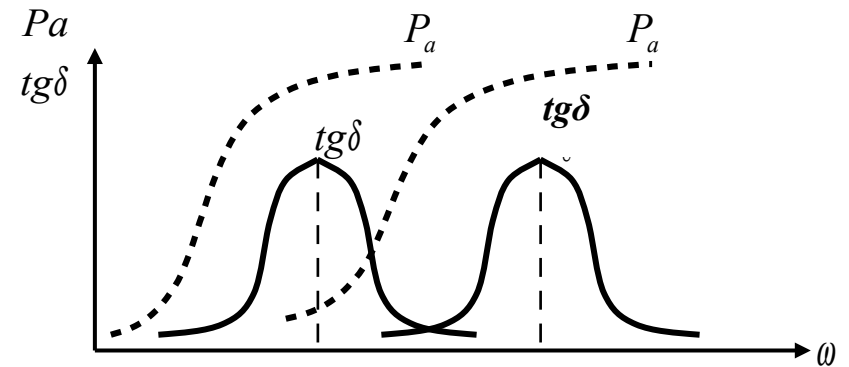


Рис. 2

В температурных зависимостях  $\operatorname{tg}\delta$  и  $P_a$  имеется максимум. Например, для силикатного стекла и бумаги такие зависимости показаны на рис. 3.

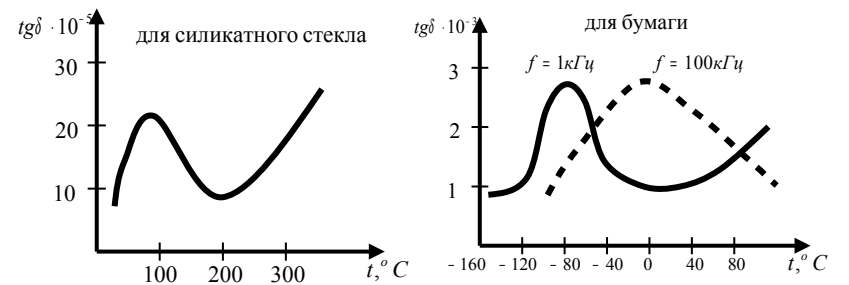


Рис. 3

Графики, приведенные на рис.1, можно использовать для ориентированного предсказания частотных характеристик диэлектриков. Например, для полиэтилена, имеющего только электронный вид поляризации, зависимость  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  от частоты будут иметь вид, показанный на рис.4

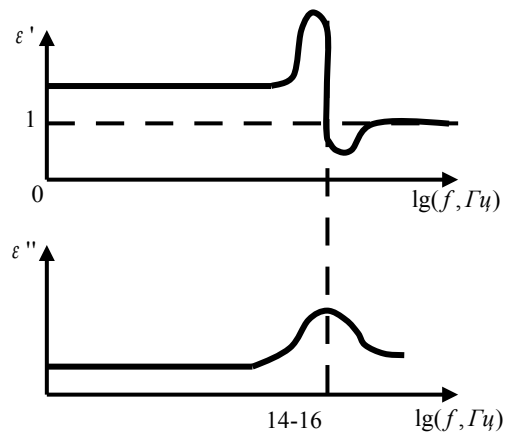


Рис. 4

Для бумаги, у которой вероятно структурная дипольно-релаксационная и электронная поляризации эти же зависимости будут такими, как показано на рис. 5.

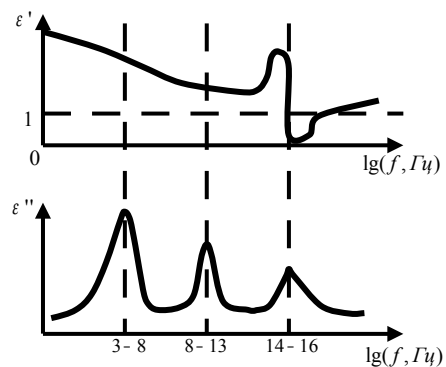


Рис. 5

Потери в диэлектриках с неоднородной структурой зависят от степени и характера неоднородности. В частотной зависимости  $tg\delta$  также имеется максимум, а в температурной зависимости  $tg\delta$  может быть несколько максимумов. Например, для бумаги, пропитанной масляно-канифольным компаундом в зависимости  $tg\delta$  от температуры имеется два максимума, первый ( $-60^{\circ}\text{C}$ ) характерен для бумаги, второй ( $60^{\circ}\text{C}$ ) характерен для компаунда.

Потери на ионизацию воздушных включений в твердом диэлектрике возникают при высоких напряжениях, когда начинается их ионизация. При уве-

личении напряжения  $tg\delta$  сначала возрастает, а затем уменьшается, когда все молекулы уже ионизированы.

## 5.2. Пробои диэлектриков

Нарушение электрической прочности диэлектрика в электрическом поле называют пробоем.

Напряжение, при котором происходит пробой, называют пробивным -  $U_{пр}$ , а соответствующее значение напряженности электрического поля – пробивной напряженностью

$$E_{пр}. \text{ При этом } E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d} \left[ \frac{В}{м} \right].$$

Пробой газов обусловлен ударной ионизацией и фотоионизацией, сопровождается коронным разрядом. Пробивная напряженность зависит от химического состава газа, температуры, давления, расстояния между электродами, от формы воздействующего напряжения. При нормальных условиях пробивная напряженность воздуха  $E_{пр} = 30 \frac{кВ}{см}$ . Длительность подготовки

пробоя газов составляет,  $10^{-7}-10^{-8}с$ . Чем больше величина приложенного к газовому промежутку напряжения, тем быстрее развивается пробой.

Пробивное напряжение при воздействии импульсов выше, чем при воздействии постоянного напряжения, что оценивается коэффициентом импульса  $\beta = \frac{U_{пр.имп}}{U_{пр}}$ , величина  $\beta$  достигает 1,5.

При уменьшении зазора между электродами  $E_{пр}$  увеличивается (рис.6), что объясняется трудностью формирования разряда.

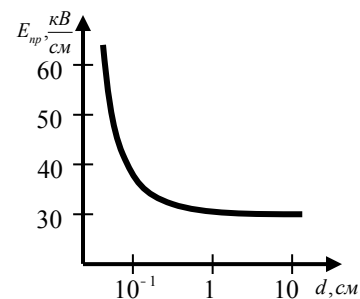


Рис. 6.

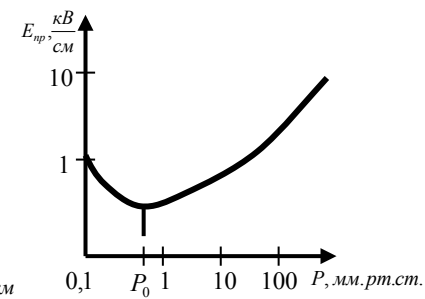


Рис. 7.

График зависимости  $E_{пр}$  воздуха от давления показан на рис.7.

При увеличении давления от  $P_o$  уменьшается расстояние между молекулами, уменьшается длина свободного пробега,  $E_{np}$  растет. При уменьшении давления от  $P_o$  уменьшается число молекул в единице объема, уменьшается вероятность столкновения атомов с электронами,  $E_{np}$  также растет.

Влияние частоты  $f$  на  $E_{np}$  воздуха видно из рис.8.

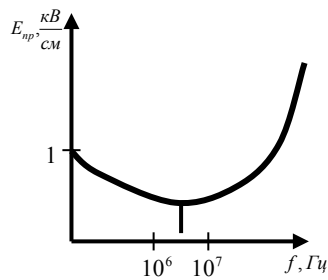


Рис. 8

С увеличением частоты до  $5 \cdot 10^6$  Гц,  $E_{np}$  сначала уменьшается, что объясняется искажениями поля, обусловленными образованием объемных зарядов в воздухе и вследствие различия в подвижностях ионов и электронов. При увеличении частот больше  $5 \cdot 10^6$  Гц  $E_{np}$  растет, что объясняется тем, что ударная ионизация не успевает развиваться за полупериод приложенного напряжения.

Влияние химического состава газа на пробивную напряженность видно

из следующих данных: для азота  $\frac{E_{np}}{E_{np.возд.}} = 1$ , для гексафторида серы (элегаза)  $SF_6$  это отношение равно 2,5, для фреона  $CCl_2F_2$  -2,6, для паров четыреххлористого углерода - 6,4.

На  $E_{np}$  также влияет степень однородности поля. В неоднородном поле возможно возникновения коронного разряда в критических местах (между остриями). Неоднородность поля ведет к уменьшению  $E_{np}$ .

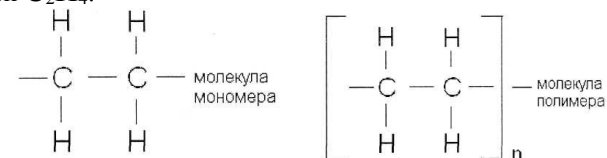
Пробой жидкостей происходит при более высоких напряженностях, чем в газах. Пробивная напряженность сильно зависит от концентрации примесей, особенно воды. Сотые доли процентов воды снижает  $E_{np}$  в несколько раз. Пробой жидкостей объясняется диссоциацией молекул примесей и собственных молекул при высоких напряженностях поля, а также ударной ионизацией.

## 6. ОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

### 6.1. Основы строения и классификация органических диэлектриков

Диэлектрики делятся на органические и неорганические. Основой органических материалов служит углерод, а неорганических - кремний. Встречаются также и кремний-органические материалы. Органические диэлектрики делятся на естественные и синтетические. Это высокомолекулярные соединения - смолы. К естественным, или природным, смолам относятся канифоль, шеллак, янтарь, натуральный воск, горный воск (озокерит). Канифоль получается из соков деревьев хвойных пород, янтарь - ископаемая смола, шеллак - отложение испражнений насекомых тропических стран.

Синтетические смолы получают путем химических реакций полимеризации или поликонденсации. Реакция полимеризации - это химический процесс соединения молекул простых по составу веществ (мономеров) в большие молекулы (полимеры) без получения побочных продуктов. Например, этилен  $C_2H_4$ :



Здесь  $n$  - степень полимеризации, т.е. число молекул мономера в молекуле полимера.

Соединения, содержащие единицы молекул мономера - газы, десятки-жидкость, сотни- твердые вещества. С увеличением количества атомов углерода увеличивается температура размягчения вещества.

Если в реакции участвует несколько полимеров - это реакция сополимеризации и получаемое вещество сополимер.

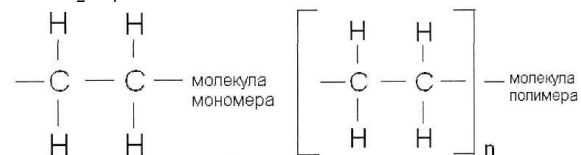
Реакция поликонденсации - химический процесс образования высокомолекулярных соединений, когда в молекулу полимера входят не все молекулы мономера и образуется низкомолекулярные побочные продукты в виде воды, аммиака и других. По строению молекулы полимеров делятся на линейные и пространственные. Линейные полимеры образуются, когда молекула мономера имеет две реактивные точки (две свободные валентности), создающие связи между молекулами, как у этилена. При большом количестве реактивных точек получают пространственные полимеры. Линейные полимеры гибки и эластичны, легко размягчаются и расплавляются при повышении температуры, легко растворяются в растворителях.

Пространственные полимеры обладают большой жесткостью, плавятся при высоких температурах, а многие из них при высоких температурах разрушаются (сгорают, обугливаются), растворяются плохо, многие практически нерастворимы. Линейные полимеры термопластичны, то есть их свойства меняются при нагревании и охлаждении. Термопластичные материалы легко перерабатываются литьем, прессованием, выдавливанием. Линейные полимеры могут иметь аморфную структуру, а также содержать и кристаллическую фазу (до 90%). Материалы с кристаллической фазой теряют способность растворяться. Пространственные полимеры терморезистивны, то есть при нагревании переходят в новое состояние.

Полимеризационные смолы термопластичны, поликонденсационные бывают как термопластичными (новолак и полиамидные смолы), так и терморезистивными (глифталевые, бакелитовые). Поликонденсационные смолы полярные и гигроскопичные, полимеризационные смолы могут быть полярными и неполярными. Неполярные смолы практически не гигроскопичны.

## 6.2. Неполярные высокочастотные полимеры

Полиэтилен получается полимеризацией этилена, который извлекают из газов, выделяющихся при переработке нефти и коксового угля. Структурная формула этилена  $C_2H_4$ :



Коэффициент полимеризации  $n$  достигает  $(20-35) \cdot 10^3$ . Существуют два способа получения полиэтилена – при высоком и низком давлении. В первом случае полимеризация происходит при температуре  $t = 200^\circ\text{C}$  и давлении  $P=1500 - 3000$  атмосфер в присутствии катализатора. При втором способе полимеризация происходит при давлении  $P=1-75$  атмосфер в растворителе (углеводороде) с добавлением металлоорганического катализатора, температура  $t=(30-70)^\circ\text{C}$ .

Полиэтилен представляет собой белый (роговидный) материал, на ощупь напоминает парафин, в тонких пленках прозрачен. До переработки в изделие полиэтилен гранулируется. Это легкий материал, удельный вес  $d=0.92-0.96 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$

При поджигании полиэтилен загорается, медленно горит синеватым пламенем без копоти. Полиэтилен термопластичен, температура размягчения  $t = 110^\circ\text{C}$ . При комнатной температуре на него не действуют ни кислоты, ни



щелочи, кроме концентрированной азотной кислоты. Полиэтилен прочен на разрыв, тверд, гибок в диапазоне температур  $t = (-60-+60)^{\circ}\text{C}$ , морозостойчив, стоек к истиранию. Маслостойкость плохая, в бензине набухает, растворяется в ацетоне, четыреххлористом углеводе  $\text{CCl}_4$ , хлороформе, толуоле, ксилоле. Содержит кристаллическую (75%) и аморфную (25%) фазы. Электрические параметры:

$$\epsilon = 2.2 - 2.5, \quad \text{tg}\delta = 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}, \quad \rho_V = 10^{17} \text{ Ом} \cdot \text{см} \quad E_{\text{пр}} = 45 - 60 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$$

Зависимости  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  от частоты и температуры показаны на рис. 1, 2.

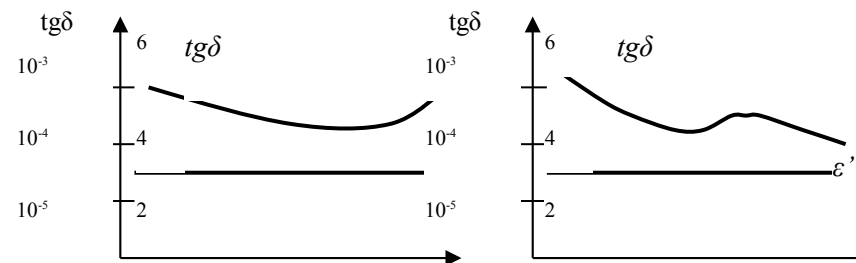


Рис. 1

Рис. 2

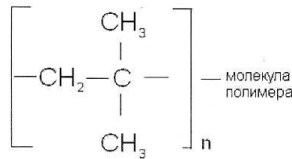
Механические свойства полиэтилена зависят от температуры, полиэтилен высокой плотности в 2-3 раза прочнее на разрыв, чем низкой плотности. Водопоглощение полиэтилена, погруженного в воду при комнатной температуре на 1 месяц, составляет 0,03%.

В зависимости от величины относительного удлинения при разрыве выпускается полиэтилен марок ПЭ-150, ПЭ-350, ПЭ-450, ПЭ-500 (цифры – относительное удлинение в процентах). Выпускается также пористый полиэтилен, который получается введением в состав полиэтилена газообразователей. Электрические характеристики пористого полиэтилена:  $\epsilon = 1.1, \quad \text{tg}\delta = 10^{-3}$ .

. Водопроницаемость возрастает в 10 раз. Солнечная энергия разрушает полиэтилен. Для увеличения светостойкости в него вводят до 2% сажи. Горючесть полиэтилена может быть снижена добавлением в него хлорированного парафина и трехоксида сурьмы. При облучении  $\alpha$  и  $\beta$ -лучами температура плавления увеличивается до  $(180-200)^{\circ}\text{C}$ , улучшаются и механические свойства.

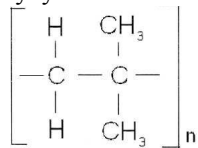
Полиэтилен высокого давления применяют для изготовления изоляции и защитных оболочек кабелей связи. Полиэтиленовые пленки низкого давления применяют в качестве антикоррозийного и упаковочного материала. Облученный электронами полиэтилен имеет в 5 раз большую теплостойкость.

**Полипропилен** получается полимеризацией пропилена, содержащегося в газах, выделяющихся при переработке нефти. Структурная формула полипропилена:



В зависимости от техпроцесса полипропилен может быть получен как аморфный каучукообразный, так и кристаллический. Полипропилен представляет собой жесткий материал без цвета и запаха, с глянцевой поверхностью. Он имеет резко выраженную температуру плавления в диапазоне 164-168 °С. По электрическим свойствам аналогичен полиэтилену. Он негигроскопичен, стоек к действию кислот, щелочей и растворов солей, разрушается только концентрированной азотной кислотой при температуре 70°С, разрушается под действием солнечных лучей, светостойкость улучшается при введении в него (1—2)% сажи. Растворяется в бензоле, толуоле. Применяется для изготовления искусственных волокон, химической посуды. Сополимер СЭП-15 этилена и пропилена (2-15% пропилена) обладает большой теплостойкостью, стойкостью к растворению в агрессивных средах. Пленки полипропилена прочнее, чем пленки полиэтилена.

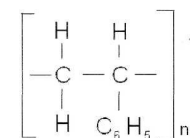
**Полиизобутилен** - получается полимеризацией изобутилена, имеет следующую структурную формулу:



В зависимости от коэффициента  $n$  ( $10^3$ - $4 \cdot 10^5$ ) может быть как жидким так и твердым каучукообразным материалом. Полиизобутилен эластичен в диапазоне температур (78-100)°С. При его нагревании до температур, превышающих 100°С, снижаются механические свойства, пластичность возрастает. Он устойчив к воздействию воды и химических растворов вплоть до 100°С. Горит коптящим пламенем. Под действием солнечных лучей полиизобутилен становится липким (распадается), его прочность и эластичность уменьшаются. Светостойкость повышают введением 1% сажи. Полиизобутилен выпускается марок П-200, П-155, П-118, П-85 (цифры коэффициент полимеризации в тысячах). Применяется при изготовлении высокочастотных кабелей, как антикоррозийное покрытие. Набухает и растворяется в бензине, керосине. Электрические характеристики близки

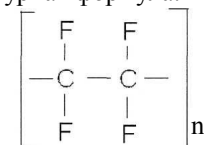
и аналогичны характеристикам полиэтилена, но  $E_{np}$  в 2-3 раза ниже.

**Полистирол** получается полимеризацией стирола  $\text{C}_8\text{H}_8$ . Структурная формула имеет вид:



Стирол – побочный продукт сухой перегонки каменного угля, дерева. Стирол легко полимеризуется даже при хранении на холоде, в темноте, при отсутствии катализатора. Полистирол получается в виде блоков, плит, эмульсии. Блочный полистирол обладает лучшими электрическими свойствами, аналогичными свойствам полиэтилена. Полистирол растворяется в бензоле, ароматических и хлорированных углеводородах. Он устойчив к действию кислот, кроме концентрированной азотной, щелочей, озона. Смазочные масла разрушают полистирол. Он горит коптящим пламенем, обладает повышенным сопротивлением на разрыв (в 5 раз прочнее полиэтилена), обладает малой водопоглощаемостью. Полистирол применяется при изготовлении радиокабелей, пленочных конденсаторов, каркасов катушек индуктивности, установочных деталей. Пленка из полистирола называется стирофлексовой. Эмульсионный полистирол применяется для изготовления лаков, компаундов. Недостатком полистирола является низкая температура размягчения (80°C), разработан полистирол и с высокой (220°C) температурой плавления. Изделия из полистирола склонны к образованию тончайших трещин со временем. Для борьбы с этим явлением в полистироле вводят синтетический каучук. Полистирол входит в состав пластмасс. Пластмасса ПТ-3 содержит 3% рутила  $\text{TiO}_2$ . Блочный полистирол легко окрашивается. Из полистирола можно изготавливать пенопласт (ПС-1, ПС-Б).

**Политетрафторэтилен** (фторопласт-4) получается полимеризацией тетрафторэтилена  $\text{C}_2\text{F}_4$ . Структурная формула:



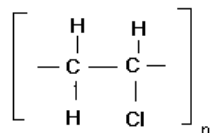
Это белый или сероватый материал, на ощупь напоминает мыло, самый тяжелый из всех полимеров ( $d = 2.3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ). Он обладает высокой теплостойкостью (250°C), по химическим свойствам превосходит платину, не горит, не растворяется ни в чем, негигроскопичен. ФТ-4 легко склеивается с металлами и пластмассами эпоксидными, карбинольными клеями. ФТ-4 обладает хорошими электрическими характеристиками:

$$\varepsilon = 1.9 - 2, \quad \text{tg}\delta = (2-4) \cdot 10^{-4}, \quad \rho_V = 10^{19} \text{ Ом} \cdot \text{см} \quad E_{\text{пр}} \geq 25 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$$

Электрические свойства практически не меняются в диапазоне частот до  $10^{10}$  Гц. Его недостатки: дорогой, течет на холоде при нагрузке более  $30 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ , токсичен при  $t = 250^\circ\text{C}$ , так как выделяется фтор,  $E_{np}$  снижается при длительном воздействии напряжением (до  $6 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$ ), при воздействии радиации свойства ухудшаются. Применяется в СВЧ устройствах, в конденсаторах, для изготовления вакуумных прокладок.

## 7. ПОЛЯРНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ПОЛИМЕРЫ

**Полихлорвинил** (поливинилхлорид) получается полимеризацией хлорвинила  $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$ . Структурная формула имеет вид:



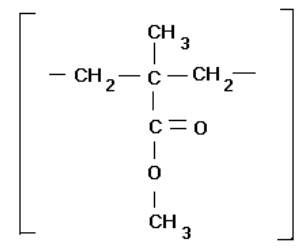
Эта формула похожа на формулу этилена, но один атом водорода заменён атомом хлора. Вследствие асимметрии формулы полихлорвинил – полярный диэлектрик. Поэтому он имеет пониженные электрические свойства:  $\epsilon = 3-6$ ;  $tgd=10^{-1} - 10^{-3}$ ;  $\rho_v=10^{14} - 10^{15}$  Ом см;  $E_{np}=10 - 50$  кВ/мм.

Теплостойкость полихлорвинила низкая ( $60 - 80^\circ\text{C}$ ), морозостойкость удовлетворительная ( $-75 \div -60^\circ\text{C}$ ).

Выпускается пластифицированный полихлорвинил – пластикат. Полихлорвинил устойчив к действию химических реагентов, набухает в дихлорэтане, при нагревании разлагается, выделяя хлористый водород. Под действием света пластикаты стареют (повышается хрупкость, уменьшается морозостойкость). Для повышения температуры разложения в полихлорвинил вводят стабилизаторы – углекислый свинец, соли кальция, кадмия, бария, стронция, эпоксидные смолы. Пластикаты выпускаются как без красителей в виде прозрачного материала, так и окрашенными в чёрный, коричневый и розовый цвета. Красители защищают пластикаты от светового старения. Пластикаты горят в пламени, но прекращают гореть, если их из пламени удалить. Трансформаторное масло растворяет пластикаты. Непосредственное соприкосновение пластиката с полиэтиленом снижает электрические свойства полиэтилена. Пластикаты применяют для изоляции телефонных и монтажных проводов, защитных оболочек кабелей (марки ПХВ – 1, ПХВ – 2).

**Винипласт** получают термическим прессованием полихлорвинила. Его цвет может быть от светлого до черного. Он применяется для изготовления радиодеталей, как конструкционный материал. Винипласт сваривается потоком горячего воздуха, хорошо механически обрабатывается, он не горит. Выпускается сополимер полихлорвинила с бутилакрилатом, метилметакрилатом (оргстеклом), изобутиленом. Он обладает большей эластичностью, обладает лучшими электрическими свойствами.

**Полиметилметакрилат** (оргстекло) получается полимеризацией метилметакрилата. Структурная формула имеет вид:



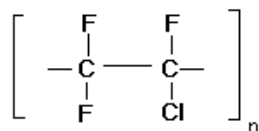
Это прозрачный материал, обладающий теплостойкостью до  $70^\circ\text{C}$ , морозостойкостью до  $-180^\circ\text{C}$ . Электрические свойства следующие:

$$\varepsilon = 2.8 - 3.5; \text{tg}\delta = 0.02 - 0.03; \rho_v = 10^{13} - 10^{14} \text{ Ом см}; E_{np} = 18 - 40 \text{ кВ/мм.}$$

Оргстекло выпускается пластифицированное (с пластификатором) и непластифицированное, обладает высокой светостойкостью, пропускает ультрафиолетовые лучи, обладает маслостойкостью, бензиностойкостью, влагостойкостью. Растворы кислот и щелочей не разрушают оргстекло. Оргстекло горит с выделением вредных газов. Листовое оргстекло обрабатывается горячей штамповкой при  $t = (80 - 125)^\circ\text{C}$ . Порошковое оргстекло хорошо прессуется при температуре  $(120 - 200)^\circ\text{C}$ . Из него могут получаться детали литьём под давлением  $P = 1200 \text{ кг/см}^2$  при температуре  $(130 - 270)^\circ\text{C}$ .

Оргстекло используется как конструкционный материал. Хорошо склеивается дихлорэтаном, уксусной кислотой, сваривается при  $t = (140 - 150)^\circ\text{C}$  и  $P = 510 \text{ кг/см}^2$ . При длительном кипячении оргстекло приобретает молочный цвет. Оргстекло применяется для изготовления лаков и клеев.

**Политрифтормонохлорэтилен** (фторопласт - 3) получается полимеризацией трифторхлорэтилена  $(\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl})_n$ . Структурная формула:



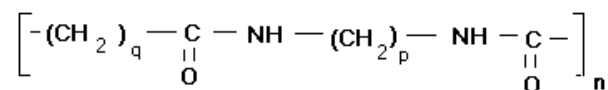
Внешне подобен фторопласту-4, но имеет повышенную жёсткость, пониженные электрические и химические свойства. Электрические свойства:

$\varepsilon = 3$ ;  $tg\delta = 0.01 - 0.02$ ;  $\rho_v = 10^{16} - 10^{17}$  Ом см;  $E_{np} = 15 - 20$  кВ/мм.

Теплостойкость - 200°C, морозостойкость - -200°C. ФТ-3 обладает высокой дугостойкостью, не устойчив к радиации, электрическая прочность снижается при длительном воздействии напряжения.

Применяется для изготовления антикоррозийных и изоляционных покрытий на алюминии, стали, никеле. Может быть подвергнут закалке. Закалённые детали почти прозрачны.

**Полиамидные смолы** получают при поликонденсации аминов и аминокислот. Структурная формула:



Индексы p и q лежат в пределах 4 – 8. Отличаются высокой механической прочностью и эластичностью, химически стойки по отношению к бензину, спирту, бензолу, щелочам. Концентрированные кислоты разрушают полиамидные смолы, муравьиная и уксусная кислота, фенолы растворяют полиамидные смолы при  $t = 70^\circ\text{C}$ .

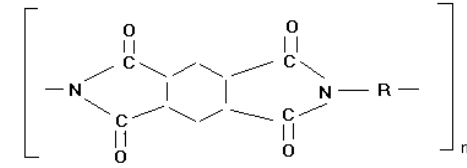
Цвет этих смол меняется от светлого до тёмно-коричневого.

Выпускаются следующие полиамидные смолы: капрон (p=q=5), нейлон (p=6, q=4), энант, полиамид 68, 548, АК-7, полиуретан ПУ-1. Капрон за рубежом называют – перлон, синон, дидерон. Теплостойкость этих смол - 110°C, морозостойкость -30 ÷ -50°C. Электрические свойства:  $\varepsilon = 4 - 6$ ;

$tg\delta = 10^{-1} - 10^{-2}$ ;  $\rho_v = 10^{10} - 10^{14}$  Ом см;  $E_{np} = 20 - 30$  кВ/мм.

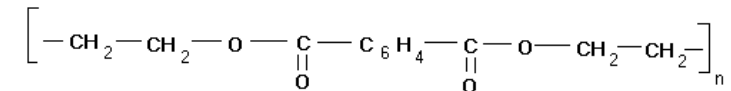
Полиамидные смолы обладают повышенной гигроскопичностью, стареют при нагревании, применяются для изготовления прочных волокон, изоляционных плёнок, деталей конструкций методом горячего литья под давлением.

**Полиимиды** получают реакцией поликонденсации и представляют собой сложные высокомолекулярные соединения. Структурная формула:



Полиимиды относятся к числу наиболее нагревостойких органических полимеров. При  $t = 500^\circ\text{C}$  полиимидная плёнка вдвое прочнее, чем плёнка из полиэтилена при  $t = 20^\circ\text{C}$ . Они не плавятся, не размягчаются при температурах ниже  $800^\circ\text{C}$ , однако из них выделяются газы  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  при  $t > 400^\circ\text{C}$ . Имеют хорошие электрические свойства, применяются как подложки гибридных микросхем, как основа печатных плат.

**Полиэтилентерефталат** (лавсан) получают поликонденсацией этилена и терефталевой кислоты. Структурная формула:



Относится к полиэфирным смолам (глифталевая, поликарбонатная, полиамидная, эпоксидная). Химически стоек, но при повышенных температурах хорошо окисляется на воздухе, поэтому переработку лавсана производят в среде нейтральных газов. Обладает высокой механической прочностью (как сталь), электрической прочностью ( $E_{np}=20 - 30$  кВ/мм). За рубежом называется майларом. Электрические характеристики:  $\varepsilon = 3-3.5$ ;  $tg\delta=0.002 - 0.02$ ;  $\rho_v=10^{14} - 10^{16}$  Ом см.

Теплостойкость -  $250^\circ\text{C}$ , морозостойкость -  $-100^\circ\text{C}$ . Применяется для изготовления подложек гибридных интегральных схем, как конструкционный материал. Плёнки лавсана используются как изоляционные при изготовлении трансформаторов, конденсаторов.

### Эфиры и этролы целлюлозы

Целлюлоза – растительные высокомолекулярные соединения (хлопок, дерево и т.д.). Структурная формула ветвистая, химическая формула:

$[\text{C}_2\text{H}_{10}\text{O}_5]_n$ , где  $n = 1000-2000$ . Так как структурная формула содержит группу (ОН), целлюлоза очень гигроскопична. При соответствующей обработке целлюлозы получают её эфиры. При обработке спиртами получают простые эфиры, кислотами – сложные: нитроцеллюлоза ((ОН) заменяет-

ся на ( $\text{NO}_2$ )), ацетилцеллюлоза, этилцеллюлоза, триацетатцеллюлоза. Электрические свойства:  $\varepsilon = 3-5$ ;  $\text{tg}\delta=10^{-2}-10^{-3}$ ;  $\rho_v=10^{10}-10^{14}$  Ом см;  $E_{np} > 3$  кВ/мм.

Эфиры целлюлозы используются для получения волокон (вискозные, ацетатные, штапельные), плёнок (кино, фото, целлофан), пластиков, лаков (растворяют эфиры в ацетоне).

На основе эфиров целлюлозы получают этролы целлюлозы путём смешивания эфиров с пластификаторами, наполнителями, стабилизаторами, красителями. Этролы допускают переработку методом горячего и холодного литья, прессовку. Их недостатки - низкая теплостойкость (30 - 50°C), склонность к возгоранию.

## 8. ПОЛЯРНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ПОЛИМЕРЫ

### 8.1. Термореактивные смолы

**Фенолоформальдегидные смолы** получают путём реакции поликонденсации между фенолом и формалином, делятся на две группы: новолачную и резольную.

Новолачная смола получается при избытке фенола и кислом катализаторе. Образуется смола и вода как побочный продукт. Новолачная смола термoplastична, называется идитолом. Она растворяется в спирте, ацетоне. Применяется для изготовления лаков, пластмасс. Для перевода её в термореактивное состояние в неё добавляется уротропин.

Резольная смола получается при равенстве концентраций фенола и формалина и щелочном катализаторе (аммиак). После варки кроме воды получается смола в стадии А - резол (низкомолекулярное соединение). Он термoplastичен, плавится при нагревании, растворяется в растворителях. Если резол прогреть в течение 6-7 часов при  $t = 60 - 70^\circ\text{C}$ , получается смола в стадии Б - резитол (высокомолекулярное соединение). Резитол не плавится, но размягчается при нагреве и не растворяется в растворителях. При нагреве резитола в течение 4-5 часов при  $t = 80^\circ\text{C}$  с повышением до  $140^\circ\text{C}$  и повышенном давлении получается смола в стадии С - резит. Резит не плавится при нагревании и не размягчается. Фенолоформальдегидная смола называется бакелитом. Бакелит в стадии С малоэластичен, влагостойкость низкая. Смола в стадии А используется для пропитки бумаги, ткани, стекловолокна, с целью получения после перевода смолы в стадии Б и С гетинакса, текстолита, стеклотекстолита. Выпускаются такие пресспорошки, содержащие кроме резола наполнители (мел, древесные стружки и т.д.). Из пресспорош-



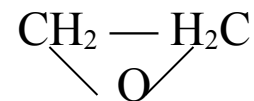
ков изготавливаются фенопласты. Все эти материалы имеют следующие электрические свойства:

$$\epsilon = 4 - 6; \quad \text{tg}\delta = 0.1 - 0.01; \quad \rho_v = 10^{11} - 10^{12} \text{ Ом см}; \quad E_{\text{пр}} = 12 - 16 \text{ кВ/мм}.$$

При замене фенола анилином  $\text{C}_6\text{H}_5(\text{NH}_2)$  получают анилиноформальдегидную смолу. Полярные свойства этой смолы выражены слабее ( $\epsilon = 3,6 - 4,5; \text{tg}\delta = 0.002;$ ). При реакции формальдегида с карбамидом  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  получается карбамидоформальдегидная смола. При реакции формальдегида с меланином  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$  получается меланино-формальдегидная смола. Эти смолы обладают высокой клейкостью и используются для изготовления клеев, лаков. Две последние смолы используются для изготовления аминопластов.

**Глифталевая смола** получается реакцией поликонденсации между глицерином и фталевым ангидридом. Смола в стадии А растворяется в ацетоне, спирте, бензине, обладает высокой клейкостью. Переход в стадию С происходит при более высокой температуре и в течение большего времени по сравнению с фенолоформальдегидной смолой. Глифталевая смола более эластична, имеет лучшие электрические характеристики. Она стойка к тепловому старению, используется для изготовления миканитов, текстолитов, гетинаксов.

**Эпоксидные смолы** образуются в результате реакции поликонденсации многоатомных фенолов и соединений, содержащих эпоксидную группу:



Многоатомные фенолы: резорцин, гидрохинон, пирокатехин, салигенин, диоксидифенилпропан, диоксидифенилсульфон, новолачная и резольная смолы, крахмал, полисахариды и другие. Соединения, содержащие эпоксидную группу: эпихлоргидрин глицерина, бутадиеنديоксид, диглицидный эфир глицерина, дихлоргидрин глицерина и другие.

Чаще всего применяется диоксидифенилпропан и эпихлоргидрин глицерина - диановые смолы. Реакция происходит в растворе едкого натрия. В зависимости от соотношения компонент, смолы могут быть жидкими и твердыми; цвета от прозрачного до темно - коричневого. Широкое применение получили смолы ЭД-5 и ЭД-6.

Эпоксидные смолы токсичны, вызывают кожные заболевания. Они обладают высокой клейкостью, эластичностью, химически стойки, растворяются в ацетоне. Эти смолы растворяют лакоткани, кембриковые трубки. Чаще используют не смолы, а компаунды на их основе, содержащие сами смолы, отвердитель, катализаторы, пластификаторы. В качестве отвердителя приме-

няют амины и ангидриды кислот (гексаметилдиамин, метафенилдиамин, малеиновый и фталевый ангидриды). В случае применения аминов затвердевание происходит без нагрева, ангидридов – при нагревании до  $t > 100^\circ\text{C}$ . Катализатор ускоряет процесс отвердевания. Наполнитель повышает механическую прочность компаунда (кварцевая и слюдяная мука, керамика и т.д.), уменьшает усадку при отвердевании, коэффициент линейного расширения, улучшает теплопроводность, снижает горючесть. Пластификатор увеличивает эластичность компаундов (трикрезилфосфат, дибутилфталат и др.), уменьшает хрупкость, повышает стойкость к тепловым ударам. Усреднённые электрические свойства следующие:  $\varepsilon = 3,7-6$ ;  $\text{tg}\delta=(1-4)10^{-3}$ ;  $p_v=10^{15} - 10^{17}$  Ом см;  $E_{np}=25 - 30$  кВ/мм.

Эпоксидные компаунды обладают высокой адгезией (сцеплением) к металлам, дереву, пластмассам, высокой механической прочностью, водостойкостью. Эпоксидные клеи склеивают металлы, стекло, фарфор, керамику, пластмассы.

## 8.2. Низкочастотные термореактивные композиционные пластмассы

Пластмассы делятся на простые и композиционные. Простые пластмассы состоят только из смол, композиционные кроме смолы содержат наполнитель, пластификатор, краситель. Свойства композиционных пластмасс обуславливаются как свойствами смолы (связующего вещества), так и свойствами наполнителя.

**Фенопласты** получают прессованием или литём под давлением пресспорошков из балелитовых или новолачных фенолоформальдегидных смол, из крезольно-формальдегидных смол или их смеси. Пресспорошки выпускаются 54-х марок, которые делятся на 7 групп от общего назначения до особого назначения. Электроизоляционные пресспорошки марок К-21-22, К-211-3, К-221-34 и других имеют в качестве наполнителя молотую слюду, кварц. Применяются для изготовления штепсельных вилок, выключателей, розеток, корпусов телефонов. Изделия из фенопласта называют карбалитовыми изделиями.

**Аминопласты (карбамидные пластины)** изготавливают из мочевино-формальдегидной смолы или меламино-формальдегидной смолы. Наполнители - сульфатная целлюлоза, асбест. Выпускаются различных цветов, применяются для изготовления декоративных изделий, бытовой техники, пищевой посуды. Выпускаются марки ВЭН-11, ВЭН-12, допускающие холодное прессование, а также другие. Разновидностью аминопластов является микора – отвердевшая пена мочевино-формальдегидной смолы, со-

держущая огнезащитные соли (белого цвета). Выпускается в виде пластин, блоков для теплоизоляции.

Слоистые пластины в качестве связующего материала содержат фенолоформальдегидную, эпоксидную, кремнийорганическую смолы, в качестве наполнителя служит бумага, хлопчатобумажные и синтетические ткани, асбестовое волокно. Основные слоистые пластины - это гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, асботекстолит, древесные слоистые пластины. Гетинакс изготавливается методом горячего прессования бумаги, пропитанной смолой. Выпускается фольгированный и декоративный гетинакс. Текстолит изготавливается так же, но наполнителем содержит ткань. Текстолит более прочен, чем гетинакс. Стеклотекстолит может использоваться на высоких частотах. Если в качестве наполнителя используется стекловолокно, материал называется стекловолокнитом.

### 8.3. Пенопласты и поропласты

Пенопластами и поропластами называют пластмассы с газовоздушным наполнителем. Пенопласт содержит не связанные друг с другом пузырьки, а поропласты имеют поры, пропускающие воздух от одной поверхности к другой. Широко используются пенопласты и поропласты на основе полистирола, фенолоформальдегидной смолы, каучука, полихлорвинила, кремнийорганических смол, полиуретана, эпоксидной смолы.

В основе технологии изготовления пенопластов и поропластов лежит метод вспенивания смол с последующим их затвердеванием. В результате образуется лёгкая масса с большим количеством пор или пузырьков. Пенопласты обладают меньшей газо- и водонепроницаемостью, тяжелее чем поропласты. Применяются в качестве звукопоглощающего, теплоизоляционного материала, в СВЧ устройствах. Усреднённые электрические характеристики:  $\epsilon = 1,1 - 1,4$ ;  $\text{tg}\delta = 0,0005 - 0,01$ ;  $\rho_v = 10^{10} - 10^{14}$  Ом см;  $E_{\text{пр}} = 6 - 10$  кВ/мм.

Марки поропластов и пенопластов: ПС-1, ПС-254, ПС-5, ПХВ-1, ФФ, ФК-20, К-40, ПУ-101 и другие.

### 8.4. Волокнистые электроизоляционные материалы

Делятся на органические и неорганические (стекловолокно). Органические волокнистые материалы бывают естественные (бумаги, картоны, льняные, хлопчатобумажные ткани, шёлковые ткани, нити) и искусственные (вискозный, ацетатный, триацетатный шёлк, ткани из капрона, нейлона). Конденсаторная бумага выпускается толщиной от 4 до 24 мкм. Кабельная бумага имеет от 80 до 170 мкм, телефонная бумага имеет толщину 90 мкм. Электротехнические картоны выпускаются для работы в трансформаторном

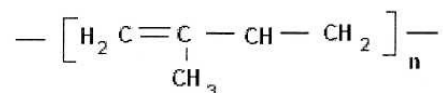
масле и в воздушной среде, их толщина от 0,1 до 3 мм. Электрические свойства:

$$\varepsilon = 2,5 - 3; \quad \operatorname{tg}\delta = 0,002 - 0,03; \quad \rho_v = 10^9 - 10^{11} \text{ Ом см}; \quad E_{\text{пр}} = 8 - 40 \text{ кВ/мм}.$$

Выпускаются электроизоляционные лакированные трубки - хлопчатобумажные или шёлковые чулки, пропитанные лаками. Хлопчатобумажные трубки, пропитанные бакелитовым лаком, называются кембриковыми трубками. Их диаметр от 1 до 12 мм. Пропитанные лаками ткани называются лакотканями. Они используются как межобмоточная и межслойная изоляция трансформаторов. Выпускаются также изоленды, как тканевые, пропитанные битумом, так и хлорвиниловые.

## 9. КАУЧУКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

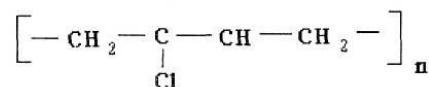
Основой для создания каучуковых материалов являются натуральные каучуки, синтетические каучуки. Натуральный каучук (НК) получают из растений каучуконосов (деревья тропических стран, одуванчик). Это аморфный материал, углеводород, имеющий состав  $[C_5H_8]_n$ . При  $t = 50^\circ\text{C}$  он размягчается и становится липким, при низких температурах хрупок, растворяется в углеводородах и сероуглероде. Структурная формула:



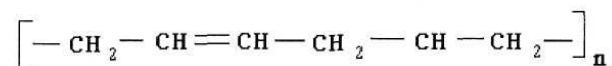
Натуральный каучук - неполярный материал.

Синтетические каучуки (СК) - аморфные вещества, получаемые из спирта и нефти. Распространены бутадиеновый каучук (СК - Б), хлоропеновый каучук (СКХ), бутадиен - стирольный каучук (СКС), бутадиен - нитрилкакрильный каучук (СКН), бутилкаучук (СКБ), полиуретановый каучук, изопреновый каучук (СКИ) и другие.

Бутадиеновый каучук получается полимеризацией газообразного бутадиена. Он имеет структурную формулу:



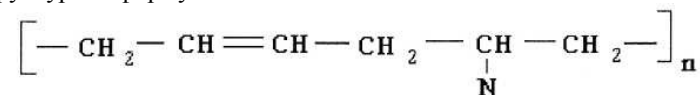
Это полярный материал. Обладает невысокими изоляционными свойствами, не стоек к действию масел, бензина, озона. Применяется для изготовления оболочек кабелей, так как противостоит тепловому старению. Бутадиен - стирольный каучук - это сополимер бутадиена и стирола, по свойствам близок к натуральному каучуку. Структурная формула:



Сопrotивляется тепловому старению.

Бутадиен - нитрилакриловый каучук - сополимер бутадиена и акрил нитрила, полярный материал с низкими электроизоляционными свойствами.

Структурная формула:



Набухает в масле, теплостоек:  $t = 230^\circ\text{C}$ .

Бутилкаучук - сополимер изобутилена и изопрена или бутадиена. Обладает высокой стойкостью к действию кислорода и озона, серной и азотной кислот, газопроницаемость в 10 - 20 раз меньше, чем у НК, эластичность невысока, но сохраняется до температур ниже  $-60^\circ\text{C}$ .

Изопреновый каучук (СКИ) получается полимеризацией изопрена, по составу близок к НК, по эластичности превосходит все каучуки.

Полиуретановый каучук получается на основе полиуретана и характеризуется высокой механической прочностью и малым старением.

На основе каучуков выпускаются следующие диэлектрики: резины, эбонит, эскапон.

Резины получают путём вулканизации каучуков, то есть нагревают их после введения в них серы. Сера сшивает цепочки каучуков и делает их терморезистивными. Вулканизация улучшает теплостойкость, морозостойкость, повышает механическую прочность и стойкость к растворителям. При введении серы в размере 1 - 3% получают мягкую резину. Помимо каучука и серы при изготовлении резины в состав резиновой смеси вводят наполнители (тальк, мел), красители, катализаторы. Резины применяются для изоляции проводов, для изготовления прокладок, амортизаторов. К недостаткам резины относятся низкая теплостойкость, маслостойкость, светостойкость. При наложении на медь из резины выделяется сера и соединяется с медью. Для устранения этого в каучуки вводят не чистую серу, а сернистое соединение - тиурам. Если в качестве наполнителя применяется сажа, получается сажевая резина, обладающая низкими электроизоляционными свойствами, высокой механической прочностью, она светостойка, не стареет, поэтому применяется для изготовления защитных оболочек шлангов. Усреднённые электрические свойства резин:

$$\epsilon = 3 - 7; \text{tg}\delta = 0.02 - 0.1; \rho_v = 10^{15} \text{ Ом см}; E_{\text{пр}} = 20 - 30 \text{ кВ/мм}.$$

Эбонит - твёрдая резина, получается на основе НК, СКБ, СКС, их смесей. Получается вулканизацией каучуков с добавлением 30 - 35% серы. Эбонит хорошо обрабатывается и применяется как изоляционный и конструкционный материал, обладает низкой теплостойкостью, под действием света  $\rho_s$  резко уменьшается благодаря выходу серы на поверхность. Электрические характеристики:

$\varepsilon=2.7 - 3$ ;  $\text{tg}\delta=0.005 - 0.08$ ;  $\rho_v=10^{15} - 10^{16}$  Ом см;  $E_{\text{пр}}=20 - 30$  кВ/мм.

Выпускается в виде плит, трубок, стержней. На рис. 1 приведены зависимости  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$  резины и эбонита от содержания серы.

Рост  $\varepsilon$  объясняется усилением полярных свойств материала за счёт атомов серы. При содержании серы свыше 15% ориентация дипольных молекул затрудняется,  $\varepsilon$  уменьшается. Видно, что малым  $\text{tg}\delta$  материал обладает при содержании серы меньше 5% (резина) и больше 25% (эбонит).

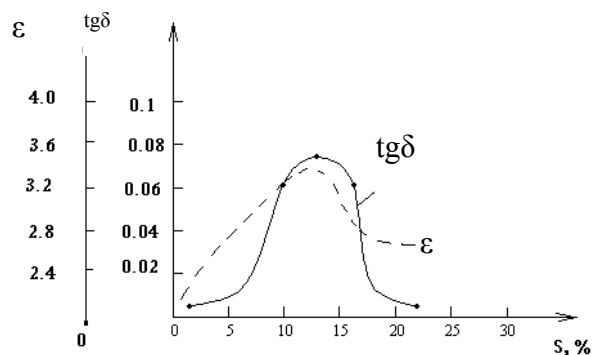


Рис 1

Эскапон получается вторичной полимеризацией бутадиенового каучука ( $250^\circ\text{C}$ ,  $p = 50$  атм., катализатор). Эскапон не содержит серы. В зависимости от степени полимеризации получается мягкий или твёрдый продукт. Твёрдый эскапон обычно светло-коричневого цвета, механические свойства такие же, как и у эбонита, однако после специальной обработки его твёрдость достигает твёрдости стали. Нагревостойкость больше чем у эбонита ( $70 - 130^\circ\text{C}$ ), кислотостойкость и растворяемость в растворителях средние. Электрические свойства лучше, чем у эбонита:

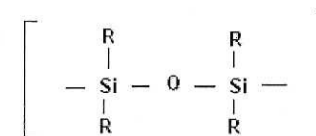
$\varepsilon=2.7 - 3$ ;  $\text{tg}\delta=0.0005$ ;  $\rho_v=10^{17}$  Ом см;  $E_{\text{пр}}=35 - 40$  кВ/мм.

Эскапон - неполярный материал, применяется в СВЧ устройствах. Мягкий эскапон растворяется в растворителях, применяется для изготовления эскапонового клея, который используется при изготовлении лакотканей.

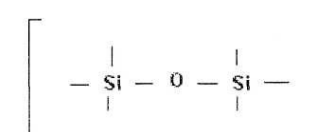
## 10. КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ И ДИ-ЭЛЕКТРИКИ НА ИХ ОСНОВЕ

Кремнийорганические полимеры по своему строению и свойствам занимают промежуточное положение между органическими полимерами и неорганическими материалами. Они обладают высокой эластичностью, гибкостью, характерной для органических материалов, а также высокой нагре-

востойкостью, характерной для неорганических материалов. Кремнийорганические полимеры могут быть термопластичными и иметь линейное строение, а также термореактивными с пространственной структурой. Основой этих полимеров является структура:



Где R - органический радикал CH<sub>3</sub> - метил, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub> - этил, C<sub>6</sub>H<sub>5</sub> - фенил и т.д.  
Группа атомов:



называется силоксановой. Поэтому кремнийорганические полимеры называются полиорганосилоксанами. Свойства этих материалов зависят от типа радикала. Полиорганосилоксаны получают реакциями полимеризации и поликонденсации. Они обладают высокой устойчивостью к действию влаги и температуры, химически инертны, стойки к термическому окислению, так как на поверхности образуется слой SiO<sub>2</sub>, препятствующий дальнейшему окислению. Полиорганосилоксаны обладают высокой светостойкостью, озоностойкостью, морозостойкостью, термоэластичностью (сохраняют эластичность до 180°C в течение 2000 часов, а органические полимеры - до 1 часа). Срок их службы в 10 раз больше, чем органических полимеров.

Кремнийорганические материалы могут быть получены в виде жидкостей, смол, эластичных каучукообразных продуктов. Жидкости прозрачны, химически инертны, не токсичны, применяются для пропитки конденсаторов. Электрические свойства:

$$\varepsilon=2.4 - 2.5; \text{tg}\delta=0.005 - 10^{-3}; \rho_v > 10^{19} \text{ Ом см}; E_{\text{пр}}=20 \text{ кВ/мм}.$$

Кремнийорганические смолы используются для изготовления теплоустойчивых пластмасс, компаундов, лаков, клеев, служат связующим материалом при изготовлении миканитов, стеклотканей, стеклотекстолитов, используются для опрессовки конденсаторов, резисторов, для изготовления панелей, печатных плат, деталей переключателей и т.д. Усреднённые электрические свойства:

$$\varepsilon=5 - 10; \text{tg}\delta=0.003 - 0.4; \rho_v=10^{12} - 10^{14} \text{ Ом см}; E_{\text{пр}}=3 - 15 \text{ кВ/мм}.$$

Зависимости  $E$  и  $\text{tg}\delta$  от температуры для полиэтилена показаны на рисунке 2.

Наличие максимума в зависимостях  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  в области отрицательных температур говорит о наличии в материале релаксационных видов поляризации. Величины  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  практически не изменяются с ростом частоты до  $10^7$  Гц ( $\text{tg}\delta$  слабо падает). Из смол делают высокотемпературные кремнийорганические лаки, эмали и клеи.

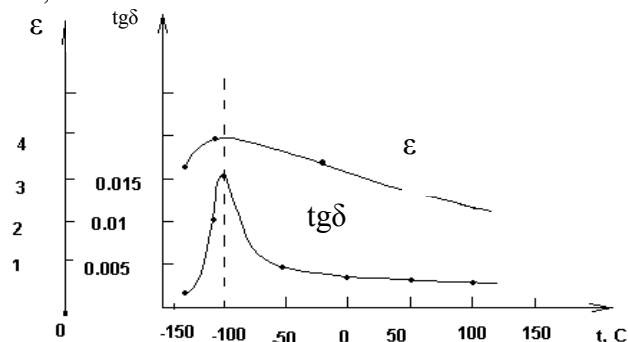


Рис 2

Кремнийорганические каучуки получают вулканизацией (без серы) кремнийорганических соединений. Выпускаются резины на основе каучука. Эти материалы обладают высокой теплостойкостью, влажностойкостью, озоностойкостью, хорошо противостоят старению. Растворяются в ароматических углеводородах, маслах, кислотах и щелочах. Применяются для изготовления прокладок, колпачков, шайб, работающих в диапазоне температур  $-60$  —  $+200$   $^\circ\text{C}$ . Для повышения механических свойств в резины вводят наполнители: ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ , мел). Резины эластичны до  $180$   $^\circ\text{C}$ . Электрические свойства:

$\epsilon=3 - 6$ ;  $\text{tg}\delta=0.008 - 0.01$ ;  $\rho_v=10^{13} - 10^{14}$  Ом см;  $E_{\text{пр}}=15 - 30$  кВ/мм.

Резины горят, образуя непроводящую золу.

## 11. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ЛАКИ, ЭМАЛИ, КЛЕИ, КОМПАУНДЫ

Лаками называют коллоидные растворы плёнкообразующих веществ в быстроспаряющихся растворителях. Коллоидные растворы состоят из некристаллизующихся частичек, которые по размерам значительно превосходят молекулу. Плёнкообразующими называют вещества, которые в процессе испарения растворителя и реакции полимеризации или поликонденсации, а также окисления, затвердевают и образуют эластичную плёнку. Плёнкообра-



зующими веществами являются природные и синтетические смолы, растительные высыхающие масла (льняное, тунговое).

Растворители получают путём перегонки нефти, каменного угля, дерева или путём химических реакций. Это бензин, керосин, уайт-спирит, бензол, толуол, ксилол, этиловый спирт, ацетон, скипидар, сероуглерод.

Для придания лаковой плёнке эластичности в раствор добавляют пластификаторы - касторовое масло, трикрезилфосфат и другие. Для ускорения сушки в лак добавляют сиккативы - катализаторы, получаемые сплавлением окислов кобальта, марганца, свинца с канифолью.

Для разбавления загустевших лаков в них вводят разбавители, отличающиеся от растворителей более медленным испарением - керосин, уайт-спирит, скипидар.

По назначению лаки подразделяются на пропиточные, покровные, клеящие и специальные (для изоляции проводов ПЭЛ, ПЭВ и др.)

По составу лаки делятся на масляные, масляно-битумные, смоляные, эфирцеллюлозные, кремнийорганические. По способу сушки - на лаки горячей и холодной сушки.

Эмали представляют собой лаки, в которые введены пигменты (красители) - окись цинка, окись титана, окись магния, железный сурик и другие. Пигменты улучшают твёрдость покрытия, нагревостойкость, влагостойкость, дугостойкость.

Эмали применяются с целью создания на поверхности уже пропитанных изделий (например, обмотки трансформаторов) защитной влагостойкой, маслостойкой плёнки, для декоративных целей.

Компаундами называются смеси и сплавы смол, битумов, воскообразных веществ, масел. Компаунды применяются как пропиточный, заливочный, клеящий материал. Они не содержат растворителей, могут быть термопластичными и термореактивными.

Выпускается около 70 марок лаков, эмалей и компаундов. Наибольшую нагревостойкость (до 1000°C) имеют кремнийорганические лаки, клеи, эмали и компаунды. Каждый лак, эмаль, клей, компаунд имеет свою технологию нанесения и сушки.

## 12. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

### 12.1. Слюда и материалы на её основе

Слюда встречается в природе в виде кристаллов, способных легко расщепляться на пластинки (по плоскостям спайности). По химическому составу слюда делится на мусковит ( $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) и флогонит ( $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6MgO \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ ).

Мусковит обычно бесцветен или имеет красноватый, зеленоватый и другие оттенки. Флогонит обычно янтарного цвета, золотистый, коричневатый,

чёрный. По электрическим свойствам мусковит лучше флогонита, он более прочен, твёрд, гибок и упруг. Мусковит:

$\varepsilon=6,8-8,4$ ;  $\operatorname{tg}\delta=3\cdot 10^{-4}$ ;  $\rho_v=10^{14}-10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ;  $E_{пр}=120\text{кВ/мм}$ ,

теплостойкость  $500-600^\circ\text{C}$ .

Флогонит  $\varepsilon=5,5-6,7$ ;  $\operatorname{tg}\delta=5\cdot 10^{-4}$ ;  $\rho_v=10^{13}-10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ;  $E_{пр}=120\text{кВ/мм}$ ,

теплостойкость  $(800-900)^\circ\text{C}$ . Эти характеристики справедливы для случая, когда поле перпендикулярно плоскости спайности. Если поле прикладывается вдоль плоскости спайности, электрические характеристики значительно хуже.

При температурах, превышающих теплостойкость, из слюды начинает выделяться входящая в неё вода, слюда теряет прозрачность, ухудшаются механические и электрические свойства.

Средний выход слюды из породы составляет 1-2%. Слюда-сырец подвергается ручной разборке, раскалывается на пластины, дефекты по краям обрезают. Такую полуочищенную слюду раскалывают на более тонкие (до 5мм) пластины и подвергают разбраковке.

По назначению слюда делится на конденсаторную, конструкционную (изготавливаются детали радиоламп), щипанную (из неё изготавливают миканит (пластина слюды склеивается с глифталевым и кремнийорганическим лаками), молотую (из неё изготавливается микалекс (получается горячим прессованием порошкообразной слюды и легкоплавкого стекла).

Микалекс (изготавливается из мусковита) выпускается в виде листов, стержней, хорошо обрабатывается, обладает высокой теплостойкостью, влагостойкостью. Он используется для изготовления держателя мощных радиоламп, панелей, воздушных конденсаторов, каркасов катушек, плат переключателей. Миканит используется при изготовлении фасонных изделий, конструкционных деталей, выпускается гибкий миканит на бумажной основе.

Из слюды выпускается также слюдиниты. При этом отходы слюды измельчаются, нагреваются до  $800^\circ\text{C}$ , обрабатываются сначала щелочью, затем кислотой. Получается масса, которую наносят на какую-либо подложку. Слюдиниты применяются там же, где и миканиты.

Чистая слюда, неполярный диэлектрик,  $\varepsilon'$  и  $\operatorname{tg}\delta$  не меняются до частот в сотни МГц.

Разработана технология получения искусственной слюды путём выращивания кристаллов из расплава шихты. Она обладает большей теплостойкостью и лучшими электрическими свойствами, чем природная.

## 12.2. Неорганические стёкла

Стёкла получают путём варки исходных материалов в печах. Сырьём служат песок  $\text{SiO}_2$ , сода  $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{CO}_2$ , поташ  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , известняк  $\text{CaCO}_3$ , бура  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , сурик, каолин, полевой шпат и другие. Сырьевые материалы измельчаются, отвешиваются в нужных соотношениях, тщательно перемешиваются и загружаются в печь. Здесь шихта плавится, летучие составные части ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ) удаляются, а оставшиеся окислы химически реагируют между собой, образуя стекломассу, которая поступает на изготовление изделий. Изделия подвергаются обжигу для устранения механических напряжений, возникающих при быстром охлаждении изделий.

Быстрое охлаждение необходимо для того, чтобы стекло не успело закристаллизоваться. При обжиге изделие нагревают до температуры ниже температуры плавления на  $100\text{--}200^\circ\text{C}$  и затем медленно охлаждают.

Стёкла – аморфные термопластические вещества. Известны стёкла оксидные и халькогенидные. Основой оксидных стёкол являются окислы  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{As}_2\text{O}_5$  и другие. Халькогенидные стёкла – сплавы на основе сульфидов, селенидов теллуридов металлов. Халькогенами называют аналоги кислорода в 6 группе системы Менделеева – S, Se, Te, а их соединения с металлами называют халькогенидами (например,  $4\text{As}_2\text{Se}_3 \cdot \text{As}_2\text{Te}_3$ ;  $\text{As}_2\text{Se}_3 \cdot \text{Sb}_2\text{Se}_3$ ).

Оксидные стёкла кроме стеклообразующих окислов содержат также окислы щелочных элементов  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , щёлочноземельных элементов  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$  (снижают температуру плавления), а также окислы  $\text{PbO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Стёкла на основе  $\text{SiO}_2$  называют силикатными, а на основе  $\text{B}_2\text{O}_3$  боратными. В радиотехнических устройствах наибольшее распространение получили силикатные стёкла, которые по электрическим свойствам делятся на три группы:

- 1) щёлочные стёкла с содержанием окислов  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , незначительным содержанием окислов тяжёлых металлов; это оконные стёкла, стёкла пирекс, нонекс, фурко, колбочное, марок №7, 12, 14, 20, 71, 707, К-5, К8 и др.;
- 2) щёлочные стёкла с высоким содержанием окислов тяжёлых металлов; стёкла, содержащие  $\text{PbO}$ , называются флинтами,  $\text{BaO}$  – кронами;
- 3) бесщёлочные стёкла – боратное, кварцевое, № 24, 19, ТК-6.

Как все аморфные вещества, стёкла не имеют резко выраженной температуры плавления. При нагревании вязкость стёкол увеличивается постепенно. Температура размягчения стёкол лежит в пределах  $(400\text{--}1600)^\circ\text{C}$ . Самое тугоплавкое – кварцевое стекло  $\text{SiO}_2$ . Температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha_l$  лежит в пределах  $(0,5\text{--}150) \cdot 10^{-7}$  1/град.

Наименьший  $\alpha_l$  у кварцевого стекла. Это самый стабильный материал из всех известных материалов. Стёкла – прочный материал:

$$\sigma_{\text{раст}} = 100 - 300 \text{ кг/см}, \sigma_{\text{сж}} = (6 - 21) \cdot 10^3 \text{ кг/см},$$

Как видно, предел прочности на сжатие  $\sigma_{\text{сж}}$  больше, чем предел прочности на растяжение. Поэтому стёкла не боятся резкого охлаждения, но боятся

резкого нагревания. Тонкостенные изделия более устойчивы к резкой смене температур, чем толстостенные. При пайке и сварке стёкол с металлами необходимо, чтобы  $\alpha_l$  стёкол был равен  $\alpha_l$  металла.

Выпускаются стёкла, согласованные по  $\alpha_l$  с вольфрамом, молибденом, платиной. Обычные стёкла прозрачны для лучей видимого спектра, легко окрашиваются окислами металлов (CaO – синее; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – зеленое; MgO<sub>2</sub> – фиолетовое, коричневое; VO<sub>3</sub> – желтое). Большинство стёкол поглощает ультрафиолетовые лучи, кварцевое и увиолевое стёкла прозрачны для ультрафиолетовых лучей. Стёкла допускают механическую обработку: сверление, шлифовку, полировку, фрезеровку. Сверление стёкол производят свёрлами из победита или латуни с применением абразива, применяют сверление на ультразвуковых установках. Стёкла растворяются в воде. Наименьшей растворимостью обладает кварцевое стекло. При введении окислов щелочных металлов растворимость сильно увеличивается. Стёкла с составом Na<sub>2</sub>O\*mSiO<sub>2</sub> (m=1,5--4,2) растворяются в воде при высокой температуре полностью, образуя жидкое стекло (силикатный клей). Силикатные стёкла устойчивы к действию кислот, за исключением плавиковой, стойкость к щелочам ниже. Электрические свойства стёкол зависят от состава.

Натриевые стёкла:  $\varepsilon=5-7,5$ ;  $\operatorname{tg}\delta=0,003-0,006$ ;  $\rho_v=10^7-10^8\text{Ом}\cdot\text{см}$ .

Калиевые и натриево-калиевые стёкла:

$\varepsilon=5,7-7,5$ ;  $\operatorname{tg}\delta=0,001-0,003$ ;  $\rho_v=10^{10}-10^{12}\text{Ом}\cdot\text{см}$ .

Свинцовые и бариевые стёкла:  $\varepsilon=7-11$ ;  $\operatorname{tg}\delta=6\cdot 10^{-4}-10^{-3}$ ;  $\rho_v=10^{11}-10^{13}\text{Ом}\cdot\text{см}$ .

Бесщелочные стёкла:

$\varepsilon=3,2-8,8$ ;  $\operatorname{tg}\delta=6\cdot 10^{-4}-10^{-3}$ ;  $\rho_v=10^{13}-10^{15}\text{Ом}\cdot\text{см}$ .

У всех стёкол  $E_{np} = 50$  кВ/мм,  $\alpha_e=(30 - 500)\cdot 10^{-6}$  1/град.

Лучшими свойствами обладает кварцевое стекло SiO<sub>2</sub>. Введение в состав стекла окислов щелочных металлов понижает удельное сопротивление, причём Na<sub>2</sub>O понижает  $\rho_v$  сильнее, чем K<sub>2</sub>O. При воздействии на стекло постоянного напряжения происходит его электролиз, у катода откладывается металл. При введении в состав стекла двух различных щелочных окислов наблюдается их взаимная нейтрализация, что показано на рис. 1.

Введение в состав щелочного стекла окислов тяжёлых металлов уменьшает  $\operatorname{tg}\delta$  т.к. ионы тяжёлых металлов препятствуют продвижению ионов лёгких металлов. В стёклах наблюдаются потери энергии на сквозную проводимость, на ионно-релаксационную поляризацию, на структурную поляризацию (в некоторых стёклах).

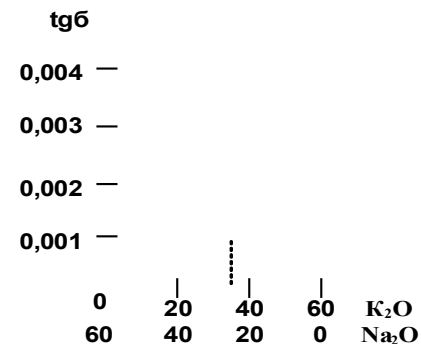


Рис. 1

Поверхностная электропроводимость стёкол зависит от состава, типа загрязнения, влажности воздуха. Объёмная проводимость - ионная, за счёт ионов примеси. Пробивная напряжённость стёкол мало зависит от их состава. Пробой стёкол носит, как правило, тепловой характер. Стёкла можно рассматривать как твёрдые электролиты. Если электроды сделаны из Ag, Ni, то их ионы способны мигрировать под действием электрического поля на значительные расстояния (при  $U = 1\text{В}$  это расстояние равно 1 см). Золотые и платиновые электроды не дают этого эффекта.

Стёкла применяются для изготовления баллонов радиоламп, конденсаторов, изоляторов. Нашли применение также стекломали. Для покрытия мощных проволочных резисторов эмаль получают из следующих материалов: 27% Pb, 70%  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 3%  $\text{MgO}_2$ . Это борно-свинцовое стекло, окрашенное в коричневый или зелёный цвет соответствующим окислом. Для увеличения водостойкости и теплостойкости к шихте добавляют  $\text{SiO}_2$ . Эмаль получается сплавлением шихты, выливанием расплава тонкой струйкой в холодную воду с последующим размолотом полученной фритты в порошок. Для нанесения эмали изделия покрывают этим порошком, затем нагревают до  $t=600^\circ\text{C}$ . Порошок оплавляется и превращается в эмаль.

Из бесщелочного стекла изготавливается стекловолокно. Оно получается выдавливанием длинных нитей (до 20 км) из расплавленного стекла с последующим промасливанием нитей, которые наматываются на барабан. Нити прочны как сталь, их толщина 3-7 мкм. Из нитей ткуются ткани, которые применяются для изготовления стеклотекстолитов.

Из стёкол изготавливаются также ситаллы (стеклокерамика). Ситаллы имеют мелкокристаллическое строение, обладают высокой прочностью, служат подложками гибридных интегральных микросхем. Если кристаллизация ситалла происходит под действием тепла – термоситаллы. Их  $\epsilon'$  не зависит от частоты до  $10^{10}$  Гц.

4. Графики зависимости  $tg\delta$  и  $\varepsilon'$  от температуры для ряда стёкол на рис. 2-4.

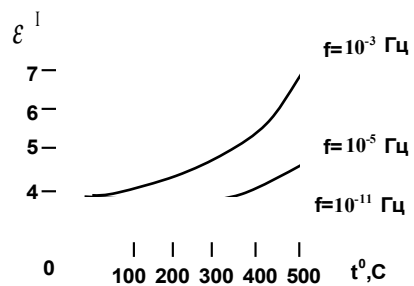


Рис.2

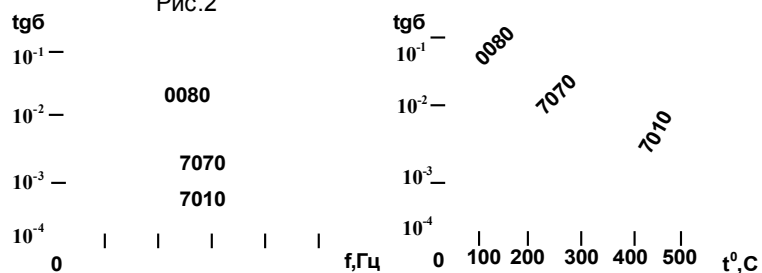


Рис.3

Рис.4

Выпускаются также закаленные стёкла – сталиниты, а также слоистые стёкла (с плёнками полимеров) - триплексы.

Халькогенидные стёкла обладают электронной проводимостью, удельное сопротивление лежит в пределах  $10^{-3}$ - $10^{13}$  Ом\*см. Эти стёкла могут быть и диэлектриками полупроводниками. Они имеют низкую температуру размягчения (30--400°C).

Стекло  $4As_2Se_3$  имеет  $\varepsilon=12,25$ ;  $tg\delta = 10^{-2}$ - $10^{-3}$  и  $p_v=10^{13}$  Ом\*см.

Стекло  $4As_2Se_3*As_2Se_3$  имеет  $\varepsilon=14,1$ ;  $tg\delta=10^{-2}$ - $10^{-3}$  и  $p_v=3,6*10^9$  Ом\*см.

Стекло  $4As_2Se_3*2As_2Se_3$  имеет  $\varepsilon=20$ ;  $tg\delta=10^{-2}$ - $10^{-3}$  и  $p_v=10^6$  Ом\*см.

Халькогенидные стекла применяются в микроэлектронике.

### 13. РАДИОТЕХНИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА

Слово керамика - от греческого "керамос" - горшечная глина. Керамика - один из самых распространенных диэлектриков. Она получается смешением ряда веществ: природных глин (каолин, калиевый полевоый шпат, кварц, мел, гипс, доломит), окислов бария, кальция, титана, стронция, циркония, цинка,

алюминия, магния. Технология получения различных видов керамики определяется её компонентами, их соотношениями. При производстве керамических материалов производится помол смеси компонентов, очистка от магнитных включений в сильном магнитном поле. Затем смеси придают вид тестообразной массы или сухого порошка. Производится предварительный отжиг лепёшек из массы или сухого порошка. Предварительный отжиг производится для уменьшения усадки изделия при окончательном отжиге. Затем отожженные лепёшки дробятся, подвергаются мокрому помолу, после чего массе придаётся тестообразный вид или вид порошка. Изделия могут быть изготовлены методом литья под давлением, выдавливанием через мунштук, штампованием, формованием на гончарном станке. Изделия подвергаются сушке, затем высокотемпературному окончательному отжигу. Иногда их покрывают глазунью- эмалью. Процесс отжига керамики можно разбить на три стадии:

- выделение воды или другой жидкости при  $t < 500^{\circ}\text{C}$  в результате разложения компонентов;
- образование кристаллической фазы при  $500^{\circ}\text{C} < t < 1200^{\circ}\text{C}$ ;
- образование аморфной стекловидной фазы и заполнение ею промежутков между кристаллами при  $t > 1200^{\circ}\text{C}$ .

После спекания и охлаждения керамика имеет сложное строение.

Кристаллическая фаза представляет собой ряд химических соединений и твёрдые растворы этих соединений. Основные свойства керамики ( $\varepsilon'$ ,  $\text{tg}\delta$ ,  $\alpha$ ) зависят от особенностей кристаллической фазы. Технологические свойства (температура спекания, пластичность) определяются особенностями аморфной стекловидной фазы. Имеются в керамике также и газовые включения, которые снижают механическую и диэлектрическую прочность керамики, увеличивают  $\text{tg}\delta$  при высоких напряжениях.

По назначению керамика делится на следующие виды:

- установочную, имеет малую  $\varepsilon'$ , высокие изоляционные свойства, применяются для изготовления опорных, проходных, антенных изоляторов, ламповых панелей, каркасов вариометров и катушек индуктивности;
- конденсаторную, имеет высокую  $\varepsilon'$ , малый  $\text{tg}\delta$ , используется для производства конденсаторов;
- вакуумную (пористую), применяется для изготовления внутренних изоляторов радиоламп, оснований проволочных резисторов.

Установочная керамика:

а) изоляторный фарфор, содержит 25% белой глины, 25% полевого шпата, 25%  $\text{SiO}_2$ , добавление в состав окисла бария снижает  $\text{tg}\delta$ ;

б) радиофарфор и пирофиллит; радиофарфор содержит 40% глины, 52%  $\text{SiO}_2$ ; 8%  $\text{BaCO}_3$ ; пирофиллит изготавливается из минерала пирофиллита и

глины; по сравнению с изоляторным фарфором радиофарфор обладает улучшенными характеристиками:  $\varepsilon=6-6,5$ ;  $tg\delta=3 \cdot 10^{-4}$  и  $E_{np}=20$  кВ/мм;

в) ультрафарфор, содержит окислы Ba, Al, Si, не содержит глины; наличие BaO или SrO уменьшает  $tg\delta$ ; ультрафарфор отличается высокими электрическими свойствами:  $\varepsilon=8-8,5$ ;  $tg\delta=3 \cdot 10^{-4}$ ;  $E_{np}=20-30$  кВ/мм; По механической прочности превосходят изоляторный фарфор и радиофарфор;

г) стеатитовая керамика, готовится на основе минерала талька и окислов Mg, Si, Ba, Ca, Sr; эти окислы увеличивают  $p_v$ ,  $p_s$ , уменьшают температуру спекания и повышают механические свойства; изделия изготавливаются методом сухого прессования; электрические свойства:  $\varepsilon=6-7$ ;  $tg\delta=(3-6) \cdot 10^{-4}$  и  $E_{np}>20-30$  кВ/мм,  $p_v=10^{12}$  Ом\*см

д) корундо-моллитовая керамика; изготавливается из корунда  $Al_2O_3$  и моллита  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ , обладает высокими электрическими и механическими свойствами:  $\varepsilon=6,8-7,4$ ;  $tg\delta=(14-18) \cdot 10^{-4}$  и  $E_{np} = 30-35$  кВ/мм,  $p_v=10^{13}-10^{14}$  Ом\*см;

е) цельзиановая керамика; в состав входит предварительно синтезированный цельзиан ( $BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ),  $BaCO_3$ , каолин, глина; имеет очень низкий температурный коэффициент линейного расширения; применяется для изготовления каркасов стабильных катушек индуктивности и вариометров, конденсаторов большой реактивной мощности.

Конденсаторная керамика изготавливается на основе  $CaTiO_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SrTiO_3$ ,  $CaSnO_3$ , делится на три группы:

- перовскитную  $CaTiO_3$  и рутиловую  $TiO_2$ :

$\varepsilon=70-150$ ;  $tg\delta=(3-5) \cdot 10^{-4}$  и  $E_{np} = 10-12$  кВ/мм,  $p_v=10^{11}-10^{13}$  Ом\*см;

$\alpha_\varepsilon = (-1300) \cdot 10^{-6}$  1/град

- титано-циркониевую  $SrTiO_3$ :

$\varepsilon=20-40$ ;  $tg\delta=(3-4) \cdot 10^{-4}$  и  $E_{np} = 8-10$  кВ/мм,  $p_v=10^{12}-10^{13}$  Ом\*см;

$\alpha_\varepsilon = -(20-40) \cdot 10^{-6}$  1/град

- станнатную  $CaSnO_3$ :

$\varepsilon=14-16$ ;  $tg\delta=(3-4) \cdot 10^{-4}$  и  $E_{np} = 10-12$  кВ/мм,  $p_v=10^{12}-10^{13}$  Ом\*см;

$\alpha_\varepsilon = 30 \cdot 10^{-6}$  1/град

Конденсаторы на основе перовскита и рутила с отрицательным  $\alpha_\varepsilon$  используются как термокомпенсационные.

Вакуумная керамика:

а) стеатитовая, но при изготовлении применяется более тщательный контроль и очистка от примесей;

б) алюмооксид (98%  $Al_2O_3$ , мрамор, глина); непластичен; для уменьшения коэффициента усадки применяется плавленая окись  $Al_2O_3$  (алунд); отличается высокими электрическими и механическими характеристиками:

$\varepsilon=9-10$ ;  $tg\delta=(3-5) \cdot 10^{-4}$  и  $E_{np} = 15-20$  кВ/мм,  $p_v=10^{16}-10^{17}$  Ом\*см;



Керамику можно также изготавливать на основе нитридов, карбидов. Керамики имеют электронно-релаксационную и ионно-релаксационную поляризации, поэтому это высокочастотные материалы,  $\varepsilon'$ ,  $tg\delta$  существенно не меняется до  $10^{10}$  Гц.

Графики зависимости  $\varepsilon'$ ,  $tg\delta$  от температуры приведены на рис. 1- 5.

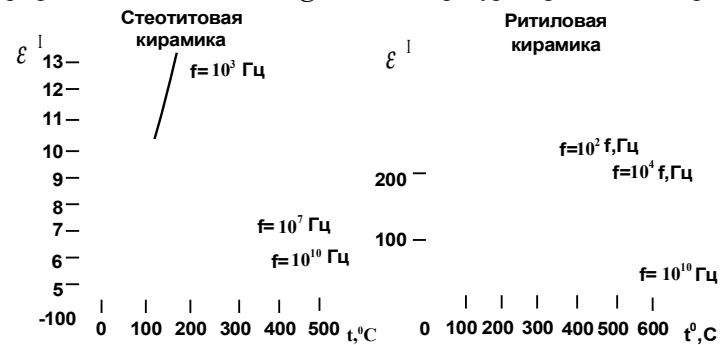


Рис.1

Рис.2

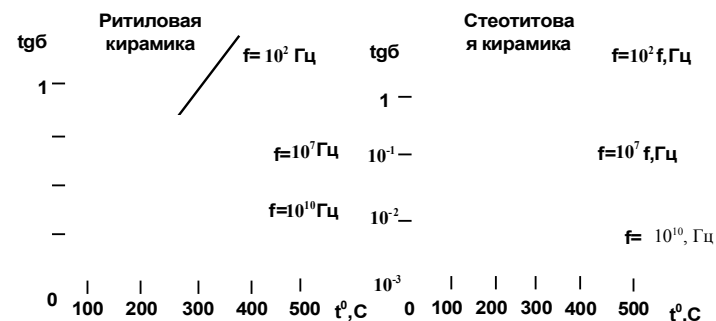


Рис.3

Рис.4

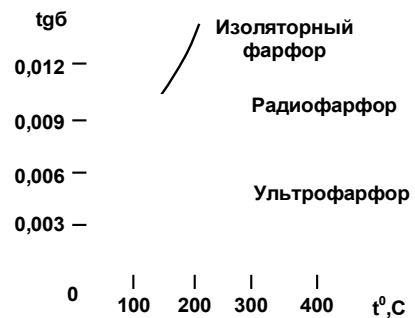


Рис.5

## ЛИТЕРАТУРА

1. Электрорадиоматериалы (под ред. Б.М. Тареева) – М.: Высшая школа. – 1978
2. Пасынков В.В. Материалы электронной техники. – М: Высшая школа. - 1980
3. Богородицкий Н.П. и др. Электротехнические материалы. – Л.: Энергия. – 1977
4. Харин А.Н., Дьякова А.П. Материалы электронной техники. Таганрог: ТРТУ. – 1977 (№212)
5. Балецкая Л.Г., Кагаева Н.В. Методические указания к изучению курса “РМ и РД” по разделу “Электрические явления в диэлектриках”. – Таганрог: ТРТИ. – 1981 (№546)
6. Негоденко О.Н., Путилин В.П., Балецкая Л.Г. Магнитные материалы. – Таганрог: ТРТУ. – 1993 (№1388)
7. Материалы в приборостроении и автоматике. (под ред. Ю.М. Пятина). – М: Машиностроение. – 1982
8. Никулин Н.В. Электроматериаловедение. – М.: Высшая школа. – 1984
9. Пасынков В.В., Сорокин О.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа. – 1986
10. Савровский Д.С., Головня. Конструкционные материалы и их обработка. М.: Высшая школа. – 1976
11. Галактионова Н.А. и др. Конструкционные материалы и их обработка. – М.: Металлургия. - 1978
12. Кнорозов Б.В. и др. Технология металлов. – М.: Металлургия. - 1974
13. Корицкий Ю.В. Электротехнические материалы. – М.: Энергия. - 1976
14. Курносов А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: Высшая школа. – 1980

**Негоденко Олег Николаевич**

**Мирошниченко Сергей Петрович**

**МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

**«МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»**

**Часть 1**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ**

**Для студентов специальностей 210200, 210600**

*Ответственный за выпуск Мирошниченко С.П.*

Подписано к печати 5.07.2006.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная

Печать офсетная. Усл. п. л. – 4,25. Уч.-изд. л.- 4,13.

Заказ № 250 Тираж 100 экз.

«С»

Типография Таганрогского государственного  
радиотехнического университета

ГСП 17 А, Таганрог, 28, Энгельса, 1.