

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра химии

**А. А. Позняк, В. А. Полубок**

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Лабораторный практикум  
по дисциплине  
«Физико-химические основы микроэлектроники  
и технологии РЭС и ЭВС»  
для студентов специальности  
«Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»  
всех форм обучения

МИНСК 2007

УДК.621.315 (075.8)  
ББК 32.85 я 73  
П 47

Рецензент  
заведующий кафедрой РЭС, профессор,  
канд. техн. наук Н. С. Образцов

**Позняк, А. А.**

П 47 Электрофизические характеристики диэлектриков: лаб. практикум по дисц. «Физико-химические основы микроэлектроники и технологии РЭС и ЭВС» для студ. спец. «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» всех форм обуч. / А. А. Позняк, В. А. Полубок. – Минск : БГУИР, 2007. – 48 с.  
ISBN 978-985-488-143-0

В практикум включены расширенные теоретические сведения к двум лабораторным работам по дисциплине «Физико-химические основы микроэлектроники и технологии РЭС и ЭВС» для студентов специальности

**I-39 02 01** «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств» всех форм обучения.

Приведённый материал будет способствовать качественному изучению программных тем, а также подготовке и выполнению лабораторных работ по изучению механизмов поляризации диэлектриков.

**УДК.621.315 (075.8)**  
**ББК 32.85 я 73**

ISBN 978-985-488-143-0

© Позняк А. А., Полубок В. А., 2007  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2007

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Лабораторная работа «ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ»</b> .....	4
<b>1.1. Теоретические сведения</b> .....	4
1.1.1. Основные характеристики диэлектриков .....	4
1.1.2. Механизмы поляризации в диэлектриках .....	8
1.1.3. Упругая поляризация .....	8
1.1.4. Тепловая поляризация .....	10
1.1.5. Миграционная поляризация .....	12
1.1.6. Влияние частоты внешнего поля на процессы поляризации .....	13
1.1.7. Влияние температуры на процессы поляризации .....	15
<b>1.2. Выполнение лабораторной работы</b> .....	17
1.2.1. Лабораторная установка и методика измерений .....	17
1.2.2. Порядок работы .....	18
1.2.3. Задания по работе .....	18
1.2.4. Содержание отчета .....	19
1.2.5. Контрольные вопросы .....	19
<b>Литература</b> .....	20
<b>2. Лабораторная работа «ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ»</b> .....	21
<b>2.1. Теоретические сведения</b> .....	21
2.1.1. Процессы электропроводности в диэлектриках .....	21
2.1.2. Токи утечки и смещения .....	26
2.1.3. Диэлектрические потери .....	28
2.1.4. Мощность диэлектрических потерь .....	33
2.1.5. Температурно-частотные зависимости $\text{tg}\delta$ .....	34
2.1.6. Применение и классификация диэлектриков .....	35
<b>2.2. Выполнение лабораторной работы</b> .....	48
2.2.1. Задания по работе .....	48
2.2.2. Содержание отчета .....	48
2.2.3. Контрольные вопросы .....	48
<b>Литература</b> .....	507

# 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ»

**Цель работы:** Изучить возможные механизмы поляризации в различных видах диэлектриков. Исследовать температурные зависимости электрических характеристик диэлектриков при различных частотах.

## 1.1. Теоретические сведения

### 1.1.1. Основные характеристики диэлектриков

*Диэлектриками* называют вещества, обладающие высоким удельным сопротивлением, проницаемые для внешнего электрического поля и способные поляризоваться. *Поляризация* – явление обязательное для любых диэлектриков. В зависимости от того, поляризация или электропроводность определяют электрические свойства среды, вещества делят на *проводники* и *диэлектрики*. Для проводников характерны высокая проводимость, полное экранирование электрического поля (для не очень высоких частот) и отсутствие поляризации. Удельное сопротивление проводников составляет  $\sim 10^{-6} - 10^{-4}$  Ом·см, а диэлектриков  $10^6 - 10^{17}$  Ом·см.

В проводниках концентрация свободных (несвязанных) зарядов очень велика. Внешнее электрическое поле вызывает их направленное перемещение (электрический ток), что приводит к образованию в проводнике внутреннего поля, которое полностью компенсирует внешнее.

В идеальном диэлектрике свободные носители заряда отсутствуют, все электроны связаны и принадлежат отдельным атомам, поэтому диэлектрики проницаемы для электрического поля (греч. **dia** – через + англ. **electric** — электрический). Действие электрического поля приводит к смещению связанных зарядов вещества друг относительно друга, т.е. к *поляризации* диэлектрика.

Многообразие свойств диэлектрика определяется его агрегатным состоянием, химическим составом, структурой, строением молекул и внешними факторами. По агрегатному состоянию диэлектрики делятся на газообразные, жидкие и твёрдые; по химическому составу – на органические и неорганические. В состав органических диэлектриков обязательно входит углерод, и они, как правило, отличаются низкой теплостойкостью. По структуре твёрдые диэлектрики делятся на

кристаллические и аморфные. Диэлектрики могут быть построены из заряженных ионов, закрепленных в определенных положениях равновесия, или из нейтральных молекул (все газообразные, жидкие и некоторые твердые вещества). По строению молекул различают *полярные* (дипольные) диэлектрики и *неполярные* (нейтральные).

Неполярные диэлектрики состоят из пространственно-симметричных молекул, они обычно негигроскопичны и не смачиваются водой (рис. 1.1, б). В молекулах полярных диэлектриков заряды распределены несимметрично (рис. 1.1, а). Полярные диэлектрики смачиваются водой и всегда в той или иной степени гигроскопичны.

В неполярных диэлектриках в отсутствие внешнего поля центры тяжести положительных и отрицательных зарядов в молекулах совпадают и дипольный момент отсутствует. В полярных диэлектриках в тех же условиях отдельные молекулы вещества имеют постоянный дипольный момент, но из-за хаотической ориентации молекул суммарный дипольный момент всего образца равен нулю.

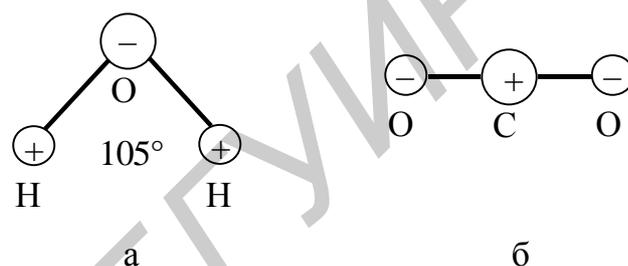


Рис. 1.1. Расположение зарядов:  
а – в полярных ( $\text{H}_2\text{O}$ );  
б – в неполярных ( $\text{CO}_2$ ) диэлектриках

Под действием внешнего поля в результате поляризации каждый элемент объема диэлектрика  $\Delta V$  приобретает некоторый наведенный (индуцированный) электрический момент, отсутствовавший до воздействия электрического поля и исчезающий при его выключении.

Состояние диэлектрика, находящегося во внешнем поле, описывается двумя векторными величинами: напряженностью электрического поля  $\vec{E}$  и поляризованностью диэлектрика  $\vec{P}$ .

Напряженность электрического поля  $\vec{E}$  характеризует силовое действие поля на заряженные частицы вещества.

Поляризованность  $\vec{P}$  (вектор поляризации) – это величина, которая количественно характеризует явление поляризации. Она зависит от способности к смещению центров тяжести зарядов вещества в электрическом поле и представляет собой дипольный момент единицы объема диэлектрика, т.е. равна векторной сумме дипольных моментов молекул (атомов, ионов), находящихся в единице объема диэлектрика:

$$\vec{P} = \lim \left( \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{P}_i \right),$$

где  $n$  – число диполей молекул, содержащихся в объеме  $\Delta V$  диэлектрика;  
 $\vec{P}_i$  – индуцированный дипольный момент  $i$ -й молекулы (атома, иона).

Зависимость  $\vec{P}(\vec{E})$  характеризует электрические свойства диэлектрика. Для большинства диэлектриков в не очень сильных электрических полях справедлива линейная зависимость  $\vec{P}$  от  $\vec{E}$ :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \cdot \vec{E}, \quad (1.1)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Такие диэлектрики называются *линейными*.

Безразмерный параметр  $\chi$ , характеризующий способность вещества поляризоваться, называется *диэлектрической восприимчивостью* диэлектрика.

Вместо вектора поляризации  $\vec{P}$  часто пользуются вектором электрического смещения  $\vec{D}$  (вектором электрической индукции), определяемым формулой

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}.$$

Введение  $\vec{D}$  не дает дополнительной информации о поведении диэлектрика в электрическом поле, но оно значительно упрощает изучение поля в диэлектрике. Вектор электрической индукции  $\vec{D}$  представляет собой геометрическую сумму двух различных физических величин: напряженности поля в данной точке диэлектрика (умноженной на  $\epsilon_0$ ) и поляризации объема среды в этой же точке. В различных частях неоднородного диэлектрика, где  $\epsilon$  отличается по величине, поле вектора  $E$  будет различно, в то время как поле вектора  $\vec{D}$  везде будет одинаково. Единица измерения  $\vec{D}$  (Кл/м<sup>3</sup>) та же, что и для  $\vec{P}$ .

В случае неполяризуемой среды (например вакуума)  $\vec{P} = 0$  и вектор индукции  $\vec{D}$  совпадает с напряженностью поля. Таким образом, электрическая постоянная  $\epsilon_0$  характеризует электрическое поле при отсутствии взаимодействия его с веществом.

В диэлектриках с учетом (1.1) вектор электрического смещения (электрической индукции) равен

$$\dot{\mathbf{D}} = \varepsilon_0 \dot{\mathbf{E}} + \dot{\mathbf{P}} = \varepsilon_0 \dot{\mathbf{E}} + \varepsilon_0 \chi \cdot \dot{\mathbf{E}} = (1 + \chi) \cdot \varepsilon_0 \dot{\mathbf{E}} = \varepsilon_a \dot{\mathbf{E}}.$$

Коэффициент пропорциональности  $\varepsilon_a$  называется *абсолютной диэлектрической проницаемостью*. Она обусловлена поляризацией диэлектрика и показывает, во сколько раз напряженность электрического поля в диэлектрике меньше напряженности внешнего электрического поля, в которое помещен диэлектрик.

На практике обычно пользуются *относительной диэлектрической проницаемостью*  $\varepsilon$ , равной отношению абсолютной проницаемости  $\varepsilon_a$  к электрической постоянной  $\varepsilon_0$  (диэлектрической проницаемости вакуума):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0} = 1 + \chi.$$

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  для всех материалов больше единицы. Ее определяют как величину, показывающую, во сколько раз уменьшается сила взаимодействия двух точечных зарядов при переносе их из вакуума в диэлектрик. Для вакуума  $\chi = 0$  и  $\varepsilon = 1$ .

Безразмерные величины  $\chi$  и  $\varepsilon$  являются основными характеристиками электрических свойств диэлектрика.

Рассмотрим систему конденсатора, состоящую из двух металлических электродов (обкладок), удаленных друг от друга на расстояние  $h$ . Поверхностный заряд каждого из электродов обозначим через  $Q$ . Опыт показывает, что заряд  $Q$  пропорционален разности потенциалов между обкладками конденсатора  $C:Q = C \cdot U$ . Коэффициент пропорциональности между  $Q$  и  $U$  называется ёмкостью конденсатора  $C$ . Ёмкость конденсатора зависит от геометрических размеров и конфигурации электродов. Если между обкладками конденсатора площади  $S$  находится вакуум, то ёмкость определяется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0}{h} S.$$

При внесении между обкладками конденсатора диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  в результате поляризации на противоположных поверхностях диэлектрика образуются заряды противоположного знака. Эти заряды нейтрализуют часть полного заряда на электродах, что понижает напряженность поля в диэлектрике по сравнению с вакуумом. При сохранении поверхностного заряда

обкладок  $Q$  уменьшается разность потенциалов между ними, а при неизменном напряжении  $U$  возрастает заряд на обкладках. Следовательно, ёмкость такого конденсатора увеличится в  $\epsilon$  раз:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{h} S.$$

Смещение зарядов в направлении внешнего поля требует затрат энергии, поэтому оно совершается не мгновенно, а в течение некоторого времени, которое называют временем установления поляризации  $\tau$ . Время установления поляризации является еще одной важной характеристикой процессов поляризации.

С другой стороны, поляризуемость материала обычно рассматривается как обратимый процесс. Обратимость поляризации также требует некоторого времени, чтобы электроны, атомы и диполи вещества успели совершить необходимые перемещения. Время, в течение которого упорядоченность ориентированных полем диполей после снятия поля уменьшается в  $\epsilon$  раз, называется временем релаксации. Время установления поляризации  $\tau$  принимается равным времени релаксации.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , диэлектрическая восприимчивость  $\chi$  и время установления поляризации  $\tau$  зависят от изменяющихся внешних факторов: частоты приложенного поля, температуры, давления и т.д.

### 1.1.2. Механизмы поляризации в диэлектриках

Измеряемая диэлектрическая проницаемость обычно является результатом наложения нескольких поляризационных процессов, различающихся по своей природе и времени установления.

Различают *упругую* (деформационную), *релаксационную* (тепловую) и *миграционную* (объёмно-зарядную) поляризации.

### 1.1.3. Упругая поляризация

*Упругая поляризация* представляет собой смещение заряженных частиц (электронов, ионов) или поворот молекул с постоянными диполями относительно положения равновесия под действием внешнего электрического поля. При этом сравнительно слабому внешнему полю противодействуют сильные внутренние поля химических связей между частицами диэлектрика, поэтому смещение заряженных частиц имеет квазиупругий характер, а его величина

очень мала по сравнению с межатомным расстоянием.

*Электронная упругая поляризация* является наиболее общим видом поляризации. Она наблюдается во всех диэлектриках независимо от агрегатного состояния (газ, жидкость, твёрдое тело) и структуры (кристалл, аморфное вещество). Данный вид поляризации обусловлен смещением во внешнем поле электронных оболочек атомов (ионов) относительно ядер. Атомы, из которых состоит диэлектрик, под действием внешнего поля превращаются в электрические диполи. Для материалов с чисто электронно-упругой поляризацией справедливо равенство  $\epsilon = n^2$ , где  $n$  – показатель преломления видимого света. Электронная поляризуемость тем выше, чем больше размер атома, т.к. увеличение числа электронных слоёв ведет к усилению экранирования ядра внутренними электронными слоями и связь электронов внешней оболочки с ядром становится слабее. Электронная поляризуемость иона будет тем меньше, чем больше его заряд, поскольку при увеличении заряда уменьшается радиус иона и связь электронов с ядром упрочняется. Время установления электронной упругой поляризации составляет  $10^{-16} - 10^{-17}$  с.

*Ионная упругая поляризация* наблюдается в диэлектриках с ионным типом химической связи и обусловлена раздвижением противоположно заряженных ионов во внешнем поле. Этот вид поляризации наблюдается только в тех кристаллических диэлектриках, в которых явно выражен ионный характер связи в кристаллической решетке. Ионное смещение особенно сильно в тех случаях, когда ионы сравнительно слабо связаны друг с другом и имеют большие электрические заряды. При одинаковых зарядах и близких радиусах способность к поляризации будет выше у ионов с большим числом внешних электронов. Время установления ионной поляризации составляет обычно  $10^{-14} - 10^{-15}$  с.

Во многих диэлектриках имеются молекулы, обладающие собственным электрическим моментом  $\vec{P}_0$ , т.е. они представляют собой диполи даже в отсутствие внешнего поля. *Дипольная упругая поляризация* характерна для тех видов полярных диэлектриков, в которых дипольные моменты молекул могут изменять свою ориентацию, участвуя в тепловом хаотическом движении. При отсутствии внешнего поля все направления ориентации равновероятны и результирующая поляризация равна нулю. Наличие внешнего электрического поля приводит к преимущественной ориентации вдоль поля. При этом диполи должны быть более или менее жестко связаны, чтобы возникала упругая возвращающая сила при вынужденном изменении направления их ориентации. Такой вид поляризации характерен для жидких кристаллов и пироэлектриков.

Простейшим примером полярной молекулы является, например, молекула хлороводорода  $\text{HCl}$ .

Диэлектрическая проницаемость, обусловленная упругой поляризацией, составляет обычно от 1,5 – 2,5 ед. для электронной поляризации и до 15 ед. – для ионной.

#### 1.1.4. Тепловая поляризация

Важным отличием тепловой поляризации от упругой является сильная зависимость поляризуемости от температуры. При тепловом характере поляризации индуцированный внешним полем дипольный момент определяется не только напряженностью электрического поля, но и интенсивностью теплового движения частиц, участвующих в поляризации. Такими частицами являются диполи, ионы и электроны. Тепловая поляризация наблюдается в диэлектриках, содержащих слабосвязанные заряженные частицы (электроны, ионы) или полярные молекулы, которые могут хаотически перемещаться в процессе теплового движения на расстояния порядка  $10^{-8}$  –  $10^{-7}$  см. Внешнее электрическое поле вносит некоторое упорядочение в тепловое движение частиц, в результате чего объем такого кристалла приобретает дипольный момент. Иногда тепловую поляризацию называют *релаксационной*.

В отличие от упругой поляризации тепловая поляризация устанавливается достаточно медленно. Приложение внешнего электрического поля к диэлектрику приводит к определённой перестройке диэлектрика. В результате через некоторое время, называемое временем релаксации, устанавливается новое поляризованное равновесное состояние. Если электрическое поле выключить, то за счёт тепловых колебаний и перемещений частиц восстанавливается хаотическая ориентация диполей или хаотическое распределение электронов и ионов в «ловушках». Поляризованность через некоторое время исчезает. Уменьшение поляризации со временем описывается формулой

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где  $\tau$  – время релаксации;

$t$  – время после снятия внешнего поля.

*Ионная тепловая поляризация* играет основную роль в твёрдых диэлектриках со значительным количеством структурных дефектов и примесных ионов. В таких диэлектриках имеются слабосвязанные ионы

(находятся вблизи дефектов или в междоузлиях). За счёт тепловых флуктуаций ионы могут переходить из одних положений равновесия в другие, преодолевая потенциальные барьеры. При отсутствии внешнего поля такие перемещения носят случайный характер, и диэлектрик не поляризован. Под действием поля появляется некоторое преимущественное перемещение ионов в дефектных областях. Такие процессы характерны для аморфных веществ (стёкла, органические полимеры) и для ионных кристаллов с неплотной упаковкой частиц. Диэлектрическая проницаемость этих материалов имеет сравнительно невысокие значения (4 – 20), однако с увеличением температуры проницаемость значительно возрастает. В зависимости от особенностей структуры диэлектрика и типа дефектов время релаксации при комнатной температуре колеблется от  $10^{-8}$  до  $10^{-4}$  с.

В твёрдых диэлектриках, имеющих примесные дефекты (ловушки), возможна электронная поляризация, обусловленная тепловым движением. Под влиянием теплового движения они могут последовательно перемещаться из одного вероятного местоположения в другое, оставаясь локализованными. При отсутствии внешнего поля эти хаотические перемещения не приводят к поляризации, т.к. в среднем происходит их взаимная компенсация. Приложенное внешнее поле стимулирует преобладание перескоков в определенном направлении, приводя к возникновению индуцированного момента в объеме диэлектрика. Время релаксации *электронной тепловой поляризации* составляет  $10^{-7}$  –  $10^{-2}$  с.

Диэлектрикам с электронно-релаксационной поляризацией (керамика на основе окислов титана, ниобия, висмута) присущи электронная электропроводность, высокий показатель преломления. Они отличаются исключительно высокими значениями  $\epsilon$  (200 – 500), зависящими от температуры.

*Дипольная тепловая поляризация* наблюдается в материалах, содержащих полярные молекулы, связи между которыми невелики. Она заключается в ориентации в направлении внешнего электрического поля имеющих постоянный дипольный момент молекул полярного диэлектрика и так же, как и другие виды релаксационной поляризации, по своей природе связана с тепловым движением молекул. В чистом виде дипольная поляризация может наблюдаться только в газах, жидкостях и аморфных вязких телах (вода, канифоль,

смолы). В кристаллических телах при температуре ниже точки плавления диполи закреплены на своих местах настолько прочно, что ориентироваться не могут, и ориентационная поляризация в них практически не осуществляется.

Способность к поляризации полярных жидкостей и газов будет тем выше, чем больше постоянный дипольный момент молекул и чем меньше их размер. Например, относительно большое значение диэлектрической проницаемости для воды ( $\epsilon = 81$ ) связано с очень малыми размерами её молекулы.

Диэлектрическая проницаемость, обусловленная дипольно-релаксационной поляризацией, может достигать нескольких сотен единиц.

Процессы установления дипольной поляризации так же, как и процессы её ликвидации, после выключения внешнего поля требуют значительно большего времени по сравнению с упругими видами поляризации. Время поляризации возрастает с увеличением размеров молекул и динамической вязкости (коэффициента внутреннего трения) вещества.

#### 1.1.5. Миграционная поляризация

*Миграционная поляризация* наблюдается в неоднородных диэлектриках, когда проявляется различие в величине или характере электропроводности в различных областях такого диэлектрика. В этом случае поляризация диэлектрика происходит за счёт накопления зарядов на границах его неоднородностей, приводя к образованию слоев объемного заряда. Время установления миграционной поляризации от  $10^{-8}$  до  $10^4$  с.

Диэлектрическая проницаемость диэлектриков с миграционной поляризацией также достигает нескольких сотен единиц.

Рассмотренные механизмы поляризации индуцируются внешним полем. Однако в некоторых твёрдых диэлектриках и жидких кристаллах поляризация может быть вызвана их механической деформацией, изменением температуры, облучением, а в ряде случаев она может существовать и в отсутствие каких-либо внешних воздействий – такие вещества называются *сегнетоэлектриками*.

В некоторых диэлектриках тепловая энергия может непосредственно превращаться в электрическую. *Пироэлектрический эффект* заключается в появлении электрических зарядов на поверхности полярного диэлектрика при изменении его температуры.

Диэлектрики, длительное время сохраняющие в объеме или на поверхности электрические заряды и создающие в окружающем пространстве постоянное электрическое поле, называются *электретами*.

### **1.1.6. Влияние частоты внешнего поля на процессы поляризации**

При включении внешнего поля практически мгновенно в диэлектрике возникает только упругая поляризация. Затем в процессе теплового движения молекул с некоторой конечной скоростью устанавливается равновесная для данного поля ориентация дипольных моментов и поляризованность вещества возрастает до максимально возможной. При увеличении частоты внешнего поля отдельные виды поляризации уже не успевают установиться за один полупериод изменения поля и  $\epsilon$  снижается до значений, определяемых более быстрыми процессами поляризации. Поэтому наибольшее возможное значение диэлектрической проницаемости диэлектрика будет при постоянном напряжении. Оно называется *статической диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{ст}$* . Наименьшее значение  $\epsilon$ , соответствующее измерениям на частоте световых колебаний, называется *оптической диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{опт}$* . Зависимость  $\epsilon$  от частоты колебаний  $f$  называется *дисперсией диэлектрической проницаемости*.

В веществах с неполярными молекулами существует только упругая поляризация, обусловленная квазиупругим смещением электронов относительно ядер или ионов друг относительно друга.

Время установления упругой поляризации близко к периоду собственных колебаний заряженных частиц и составляет  $10^{-16}$  –  $10^{-17}$  с – для упругой электронной и  $10^{-12}$  –  $10^{-13}$  с для упругой ионной поляризации, т.е. она успевает следовать за полем даже при частотах, близких к оптическим. Поэтому диэлектрическая проницаемость материалов, обладающих преимущественно упругой поляризацией, от частоты практически не зависит (вплоть до очень высоких частот).

В оптическом диапазоне частот для упругой поляризации характерно резонансное изменение  $\epsilon$ , сопровождаемое поглощением энергии: при частотах, близких к собственным частотам колебаний заряженных частиц,  $\epsilon$  сначала растет, а затем резко уменьшается и, проходя через минимум, достигает высокочастотного значения  $\epsilon_\infty$  (рис. 1.2). Масса ионов значительно больше, чем масса электронов, поэтому их собственная частота колебаний существенно ниже. Соответственно область дисперсии ионной поляризации лежит в инфракрасной (ИК) области спектра, а электронной – в ультрафиолетовой (УФ).

Диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков при увеличении частоты прикладываемого поля сначала остается неизменной, однако, начиная с некоторой критической частоты, когда ориентационная поляризация уже не успевает устанавливаться, основной вклад в поляризуемость будет определяться упругими видами поляризаций. Следовательно, при увеличении частоты  $\epsilon$  снижается, стремясь на высоких частотах к значениям, характерным для неполярных диэлектриков (рис. 1.3).

Миграционная поляризация, наблюдающаяся в неоднородных диэлектриках, характеризуется такой же частотной зависимостью, как и релаксационная поляризация, но она проявляется при более низких частотах.

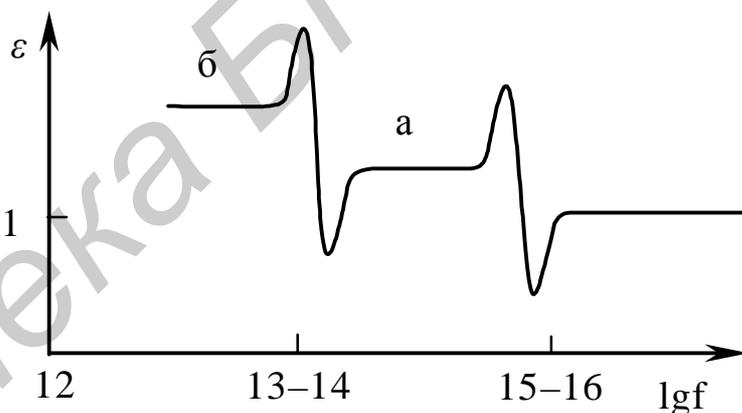


Рис. 1.2. Зависимость  $\epsilon$  от  $f$  для твёрдых диэлектриков в области высоких частот: электронная (а), ионная (б) поляризации

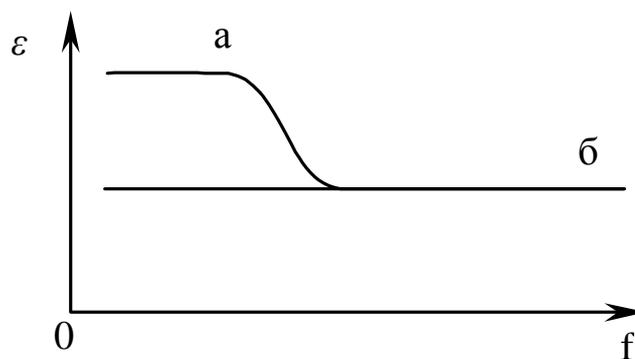


Рис. 1.3. Зависимость  $\epsilon$  от  $f$  для твёрдых полярных (а) и неполярных (б) диэлектриков

При одновременном наличии в диэлектрике нескольких различных механизмов релаксационной поляризации с различными временами установления поляризации  $\tau$  в графике зависимости  $\epsilon(f)$  может наблюдаться не одно, а несколько снижений (рис. 1.4).

### 1.1.7. Влияние температуры на процессы поляризации

В неполярных диэлектриках непосредственно на процесс

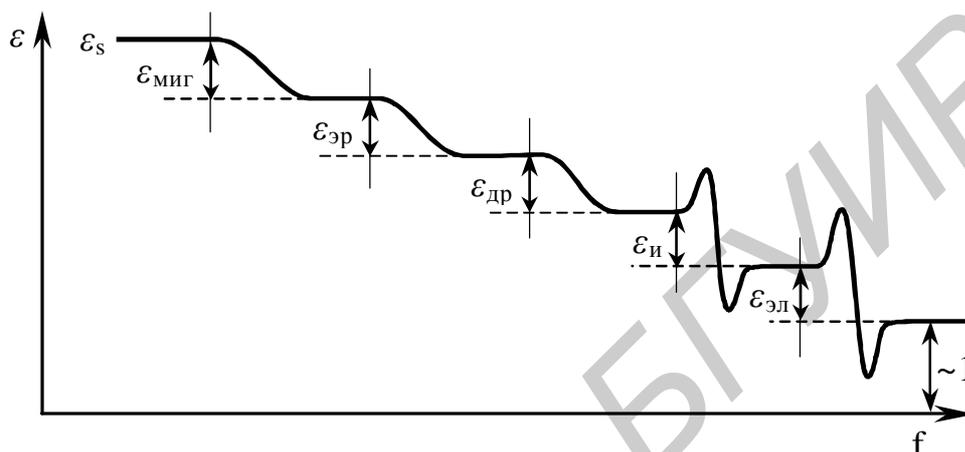


Рис. 1.4. Частотная зависимость составляющих диэлектрической проницаемости:

$\epsilon_{\text{миг}}$  — миграционной;  $\epsilon_{\text{эр}}$  — электронно-релаксационной;

$\epsilon_{\text{др}}$  — дипольно-релаксационной;  $\epsilon_{\text{и}}$  — ионной;  $\epsilon_{\text{эл}}$  — электронной

электронной поляризации в молекулах вещества изменение температуры влияния не оказывает, т.к. поляризуется каждая отдельная молекула. При нагревании  $\epsilon$  слабо уменьшается, поскольку при тепловом расширении уменьшается число объектов поляризации в единице объема (рис. 1.5).

Если вещество при этом переходит из твёрдого состояния в жидкое или из жидкого в газообразное, что приводит к относительно большому скачкообразному изменению объема, то наблюдается и сравнительно резкое изменение  $\epsilon$  на графике  $\epsilon(T)$  (рис. 1.5).

В ионных кристаллах с плотной упаковкой частиц проявляются электронная и ионная поляризации. С ростом  $T$  наблюдается некоторое

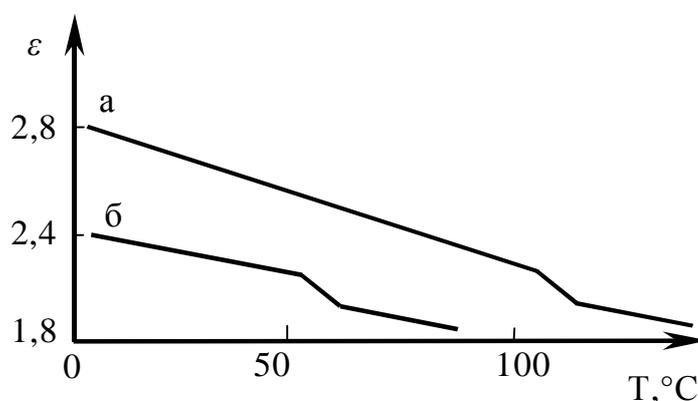


Рис. 1.5. Зависимость  $\epsilon$  от  $T$  для неполярных диэлектриков:

а — полиэтилен; б — парафин

увеличение  $\epsilon$ , связанное с увеличением расстояния между частицами при тепловом расширении и ослаблением сил взаимодействия между ними (рис. 1.6).

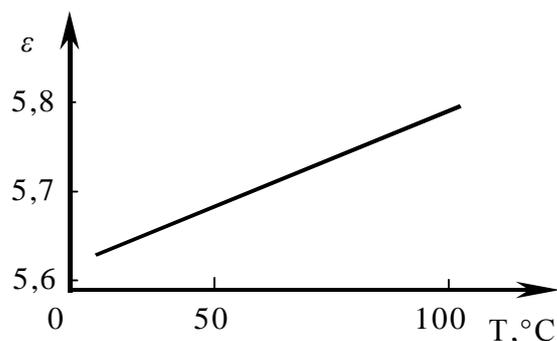


Рис. 1.6. Зависимость  $\epsilon$  от  $T$  для кристаллов NaCl

В полярных диэлектриках поляризация определяется не только упругой электронной и ионной поляризуемостью, но и ориентационной. В области низких температур ориентация молекул в большинстве случаев невозможна. При повышении температуры возможность ориентации молекул облегчается, что приводит к росту  $\epsilon$ . Но при дальнейшем увеличении температуры сказывается усиление хаотических тепловых колебаний молекул и степень упорядоченности их ориентации уменьшается. Соответственно кривая зависимости  $\epsilon(T)$  проходит через максимум и затем снижается (рис. 1.7).

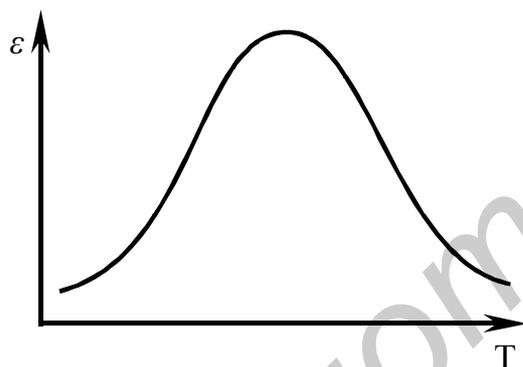


Рис. 1.7. Зависимость  $\epsilon$  от  $T$  для полярных диэлектриков

Такая зависимость характерна только для жидкостей и полимеров. В кристаллических телах существенное ослабление связей между молекулами, облегчающее ориентацию диполей, происходит лишь при температурах, приближающихся к температуре плавления или размягчения, когда электропроводность сильно возрастает.

В стеклах и в некоторых ионных кристаллах с неплотной упаковкой ионов кроме электронной поляризации наблюдается также ионно-релаксационная поляризация. С увеличением температуры  $\epsilon$  твёрдых диэлектриков возрастает пропорционально увеличению количества ионов, участвующих в ионно-релаксационной поляризации (рис. 1.8). При высоких температурах ионные соединения плавятся и становятся проводниками 2-го рода (т.е. с ионной проводимостью).

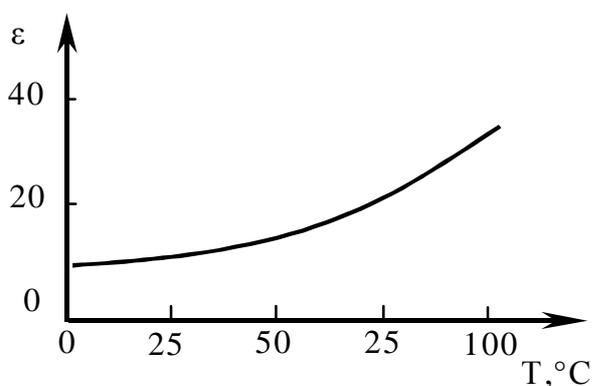


Рис. 1.8. Зависимость  $\epsilon$  от  $T$  для ионных кристаллов с неплотной упаковкой ионов (технический фарфор)

В неоднородных материалах

имеет место миграционная поляризация. Поведение  $\epsilon$  при изменении температуры в этом случае определяется температурными зависимостями проводимости в областях неоднородностей конкретного материала.

## 1.2. Выполнение лабораторной работы

### 1.2.1. Лабораторная установка и методика измерений

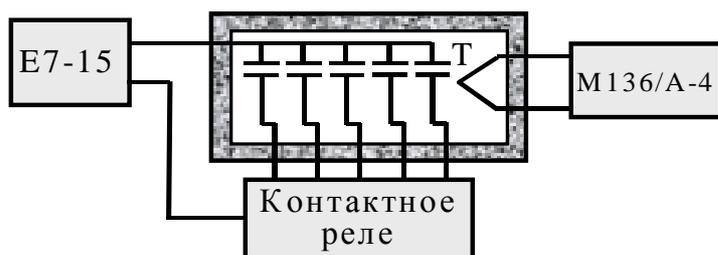


Рис. 1.6. Принципиальная схема лабораторного макета: E7-15 — измеритель иммитанса, M136/A-4 — микровольтметр

Исследование температурных зависимостей электрических параметров диэлектриков производят с использованием лабораторного макета, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.6.

Образцы исследуемых диэлектриков помещены в термостат Т. Выбор требуемого образца осуществляется посредством подвижного контактного реле, управляемого кнопкой. Номер выбранного образца, подключенного в измерительную цепь, высвечивается цифровым индикатором. Температура термостата в процессе исследований измеряется при помощи хромель-копелевой термопары ТП4, холодный спай которой находится при комнатной температуре. ТермоЭДС термопары измеряется микровольтметром M136/A-4.

Исследуемые образцы диэлектриков представляют собой конденсаторы промышленного изготовления с различными материалами, используемыми в качестве диэлектриков.

Для измерения электрических характеристик диэлектриков используется измеритель иммитанса E7-15, который позволяет с высокой точностью измерять активные и реактивные иммитансные параметры: емкость (С), индуктивность (L), сопротивление (R), проводимость ( $G_s$ ), тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ).

Прибор обеспечивает возможность проведения измерений при частоте 100 Гц и 1 кГц, а также измерение иммитансных характеристик с подачей напряжения постоянного смещения от внутреннего источника 5 В.

### 1.2.2. Порядок работы

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Включить прибор Е7-15 и лабораторный макет. При этом все цифровые индикаторы и светодиоды на панели прибора Е7-15 должны периодически зажигаться и гаснуть в течение нескольких секунд. После завершения теста-индикации при помощи кнопок на передней панели прибора установить следующие режимы:

Параметр  $R/Q$ ;

Предел Автоматический выбор (A);

Частота 1 кГц;

Смещение Выкл.

3. Подключить прибор Е7-15 к лабораторному макету.
4. Нажатием кнопки на передней панели макета произвести выбор исследуемого образца.
5. Пользуясь кнопкой «Параметр» прибора Е7-15, установить нужный режим измерителя иммитанса.
6. В области изменения температуры от 300 до 400 К через каждые 10 К на частотах 100 Гц и 1 кГц произвести измерения проводимости, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов диэлектриков, указанных преподавателем. Контроль температуры термостата производить по показанию микровольтметра М138/А-4 с использованием переводной таблицы.
7. Измеренные параметры занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Экспериментальные результаты исследования температурной зависимости параметров конденсаторов

Т К	С		$G_s$		$tg\delta$		$\varepsilon$	
	100 Гц	1 кГц	100 Гц	1 кГц	100 Гц	1 кГц	100 Гц	1 кГц
300								
310								
320								
...								
400								

### 1.2.3. Задания по работе

1. Для образцов, указанных преподавателем, определить температурные зависимости емкости С, тангенса угла диэлектрических потерь  $tg\delta$  и проводимости G на частотах 100 Гц и 1 кГц.

2. По измеренным значениям  $C$  определить диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$ .

3. Результаты измерений  $C$ ,  $\operatorname{tg}\delta$ ,  $G$  и рассчитанные значения  $\epsilon$  занести в табл. 1.1.

4. Построить графики температурных зависимостей  $\epsilon(T)$  измеренных образцов для обеих частот измерений.

#### 1.2.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Расчётные формулы.
4. Экспериментальные и расчётные данные в виде таблиц.
5. Графические зависимости.
6. Анализ полученных результатов.
7. Выводы.

#### 1.2.5. Контрольные вопросы

1. Какими электрическими характеристиками описываются свойства диэлектриков?

2. Дать характеристику механизмам поляризации в различных видах диэлектриков.

3. Чем определяется величина диэлектрической поляризации в полярных и неполярных диэлектриках?

4. Охарактеризовать зависимость величины диэлектрической проницаемости от механизма поляризации?

5. Объяснить дисперсионную зависимость для полярных и неполярных диэлектриков.

6. В каких веществах под воздействием температуры изменяется способность поляризоваться и почему?

7. Что такое время релаксации? Как влияет изменение температуры на время установления поляризации при упругих и релаксационных механизмах?

8. Почему на температурной зависимости  $\epsilon(T)$  в случае ионно-релаксационной поляризации отсутствует максимум?

9. Сравните по величине статическую и оптическую диэлектрические проницаемости для случаев чисто электронной поляризации и дипольно-релаксационной.

10. Как изменяются значения напряженности поля  $E$  и электрическая индукция  $D$  в плоском конденсаторе, состоящем из нескольких слоев диэлектриков с различными значениями  $\epsilon$ , при переходе от одного слоя к другому?

11. Почему электромагнитные волны непригодны для подводной локации?

## Литература

1. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – СПб.: Лань, 2004.
2. Блейкмор, Дж. Физика твёрдого тела / Дж. Блейкмор. – М.: Мир. 1988.
3. Рез, И. О. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике / И. О. Рез, Ю. М. Поплавко. – М.: Радио и связь, 1989.
4. Тареев, Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М., 1983.
5. Барфут, Д. Полярные диэлектрики и их применение / Д. Барфут, Д. Тейлор. – М., 1981.
6. Богородицкий, Н. П. Материалы радиоэлектронной техники / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков. – М.: Высш. шк, 1969.

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ»

**Цель работы:** Изучить механизмы возникновения электропроводности диэлектриков и диэлектрических потерь, их основные свойства и характеристики.

### 2.1. Теоретические сведения

#### 2.1.1. Процессы электропроводности в диэлектриках

Удельная электропроводность диэлектриков мала, однако она всегда отлична от нуля. В соответствии с типом носителей заряда электропроводность диэлектриков подразделяется на *электронную*, при которой ток переносят отрицательные заряженные электроны или положительно заряженные электронные вакансии (дырки); *поляронную*, когда эти электроны и вакансии сильно связаны с кристаллической решеткой; *ионную*, при которой ток переносят положительно заряженные катионы или отрицательно заряженные анионы (или ионные вакансии), а также *молионную*, если носителями являются заряженные группы молекул или даже макроскопические частицы. В случае положительного заряда молионов явление проводимости называется *катафорезом*, а при отрицательных молионах происходит *анофорез*.

Поскольку ширина запрещенной зоны диэлектриков составляет более 2 эВ и в нормальных условиях тепловая генерация собственных носителей заряда маловероятна, то электронная (или дырочная) проводимость диэлектриков обычно имеет примесный характер.

Электроны или дырки, освобождающиеся в диэлектрике в результате различных активационных процессов, поляризуют своим полем некоторую область диэлектрика, вызывая искажение решетки в этом месте. Под действием электрического поля электроны и дырки вынуждены перемещаться вместе с этой областью. Соответственно эффективная масса электронов и дырок в диэлектриках оказывается в десятки и сотни раз больше, чем в металлах и полупроводниках. Электроны или дырки, находящиеся в подобном, частично связанном состоянии, называются *поляронами*. Перемещение полярона в кристалле осуществляется посредством перескоков от одного узла кристаллической решетки к другому под действием тепловых

флуктуаций. Естественно, что подвижность таких носителей чрезвычайно мала. Полярный механизм проводимости особенно характерен для ионных кристаллов, в которых велико кулоновское взаимодействие между электронами и ионами кристаллической решетки. В большинстве диэлектриков электронная проводимость мала по сравнению с ионной.

Ионная проводимость может быть обусловлена перемещением как собственных ионов, так и примесных. И те, и другие возникают преимущественно из-за термической активации. Ионная проводимость может наблюдаться в кристаллических диэлектриках, но особенно характерна для жидких диэлектриков и аморфных веществ – смол, компаундов, стёкол и т.п. У керамических материалов типа фарфора, содержащих наряду с кристаллической фазой также и аморфную, электропроводность в значительной мере определяется аморфной фазой.

Возможность перемещения ионов в кристаллических диэлектриках связана с наличием в них дефектов. Если в кристаллах есть вакансии, то под действием поля соседний ион может перескочить и заполнить ее, во вновь образовавшуюся вакансию может перескочить следующий ион и т.д. В результате происходит движение вакансий, которое приводит к переносу заряда через весь кристалл. Перемещение зарядов может происходить и в результате перескоков по междоузлиям. Электропроводность кристаллов с ионной решеткой зависит от валентности ионов. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей электропроводностью, чем кристаллы с многовалентными ионами.

С ростом температуры удельная проводимость диэлектриков  $\sigma$  при любом механизме проводимости увеличивается. Одной из причин увеличения  $\sigma$  является рост концентрации носителей заряда. Возникновение новых носителей в кристалле при ионном механизме проводимости связано с увеличением числа дефектов кристаллической решетки, а при электронном механизме – с увеличением количества электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Образование дефекта или перевод электрона в зону проводимости требует затраты определенной энергии  $U$ . Согласно распределению Больцмана, вероятность того, что частица в результате теплового возбуждения получит энергию, превышающую  $U$ , пропорциональна  $\exp\left(-\frac{U}{kT}\right)$ .

Поэтому с увеличением температуры концентрация носителей заряда возрастает экспоненциально

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right),$$

где  $n_0$  – величина, постоянная для данного материала;  
 $U$  – энергия образования дефекта.

В случае ионной проводимости увеличение  $\sigma$  будет происходить также за счёт возрастания подвижности носителей. Подвижность ионов связана с преодолением потенциальных барьеров высотой  $W$ , разделяющих соседние положения ионов, при их переходе в новое окружение. Перемещение иона осуществляется скачком под действием тепловой активации, поэтому

$$\mu = \mu_{и0} \cdot \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (2.1)$$

где  $\mu_{и0}$  – величина, постоянная для данного вещества;

$W$  – энергия активации перемещения дефекта по кристаллической решетке.

Так как удельная проводимость  $\sigma = q \cdot n \cdot \mu$ , то окончательно для ионной проводимости получим

$$\sigma = q \cdot n_{и0} \cdot \mu_{и0} \cdot \exp\left(-\frac{U+W}{kT}\right) = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right), \quad (2.2)$$

где  $q$  – заряд носителя;

$\sigma_0$ ,  $n_{и0}$ ,  $\mu_{и0}$  – постоянные;

$\Delta W = U + W$  – энергия активации носителя заряда, равная сумме энергии образования носителя и энергии активации его перемещения в решётке.

В случае электронной проводимости подвижность носителей заряда значительно слабее зависит от температуры, чем концентрация  $n$ . Поэтому энергию активации  $\Delta W$  в (2.2) можно считать равной  $U$ .

Зная температурную зависимость проводимости, по наклону прямой  $\ln \sigma = f(1/T)$  можно оценить  $\Delta W$  (рис. 2.1, а), а по величине отрезка, отсекаемого прямой на оси ординат,  $-\ln \sigma_0$ .

Если в создании электропроводности диэлектрика принимают участие разнородные ионы с различными энергиями активации, то полная проводимость будет описываться выражением

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_{01} \cdot \exp\left(-\frac{W_1}{kT}\right) + \sigma_{02} \cdot \exp\left(-\frac{W_2}{kT}\right),$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – проводимости, обусловленные соответственно механизмами с энергиями активации  $\Delta W_1$  и  $\Delta W_2$ .

При этом на кривой температурной зависимости проводимости будет наблюдаться излом (рис. 2.1, б), соответствующий температуре

$$T = \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{k(\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2)}.$$

В случае электронной проводимости диэлектрика наличие излома объясняется влиянием примеси. Участок кривой, расположенный выше точки излома, описывает примесную проводимость в кристалле, а ниже её – проводимость собственную.

При движении ионов в электрическом поле имеет место электролиз, т.е. перенос вещества, связанный с образованием вблизи электродов новых химических веществ. Поэтому, даже если между электродами и диэлектриком отсутствует обмен носителями, то прохождение электрического тока через диэлектрик будет сопровождаться существенным изменением его свойств с течением времени.

При длительной работе под постоянным напряжением ток проводимости через твёрдые и жидкие диэлектрики с течением времени может как уменьшаться, так и увеличиваться. Если ток проводимости с течением времени уменьшается, значит,

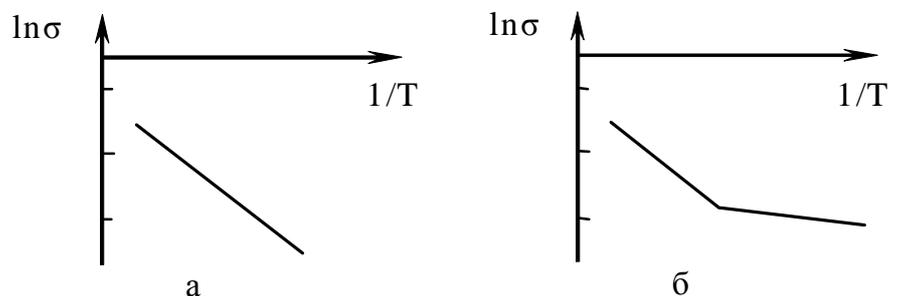


Рис. 2.1. Температурная зависимость проводимости диэлектрика:

а – при одном активационном процессе;

б – в случае нескольких активационных процессов

с течением времени может как уменьшаться, так и увеличиваться. Если ток проводимости с течением времени уменьшается, значит,

электропроводность данного материала обусловлена ионами посторонних примесей, число которых уменьшается за счёт электрической очистки образца. Если же ток через образец со временем увеличивается, то электропроводность в нём обеспечивается структурными элементами самого образца, что ведёт к необратимому процессу старения материала под напряжением, когда эти носители постепенно перемещаются в приэлектродную область и там накапливаются, что в свою очередь может привести к разрушению диэлектрика – его пробое. В переменном электрическом поле накопления ионов в приэлектродных областях не происходит и проводимость диэлектрика стационарна.

В отличие от ионного механизма переноса электронный механизм проводимости является стационарным процессом как в постоянных, так и в переменных полях; в этом случае обеспечивается постоянный обмен электронами между диэлектриком и электродами. Если обеспечить такой же эффективный обмен носителями заряда между образцом и электродами в случае ионной проводимости, используя, например, в качестве анода металл, ионы которого переносят электрический заряд в диэлектрике, то ток через образец также будет стационарным.

Все вещества в большей или меньшей степени *гигроскопичны*, т.е. обладают способностью поглощать влагу при смачивании водой или из воздуха, содержащего водяные пары. Присутствие даже малых количеств воды способно значительно уменьшить сопротивление диэлектрика. Это объясняется тем, что имеющиеся в воде примеси диссоциируют на ионы. Кроме того, присутствие воды, имеющей высокую диэлектрическую проницаемость, может способствовать диссоциации молекул самого вещества. Поэтому при увлажнении условия работы электрической изоляции ухудшаются.

Благодаря неизбежному увлажнению, окислению и загрязнению поверхностных слоев заметный вклад в электропроводность диэлектриков может вносить и *поверхностная проводимость*.

Для каждого диэлектрика существует такое предельное напряжение электрического поля, при котором наступает электрический пробой диэлектрика. Величина  $E_{\text{пр}}$  называется *электрической прочностью* диэлектрика. При пробое ток через диэлектрик катастрофически возрастает и сквозь диэлектрик проходит мощный электрический заряд (искра или дуга). Плотность тока при этом достигает больших значений, что приводит к необратимым изменениям в твёрдом диэлектрике. Основным механизмом пробоя является *ударная ионизация* электронами,

вследствие которой концентрация носителей заряда резко увеличивается за счёт возникновения в диэлектрике электронных лавин. Такая форма пробоя называется *электронным пробоем*.

Перед пробоем электрическое поле ускоряет электроны (дырки). Ударная ионизация начинается, когда электроны (дырки) приобретают за счёт поля энергию, которая больше ширины запрещенной зоны кристалла или равна ей. В этом случае они при неупругих взаимодействиях с атомами освобождают вторичные электроны, которые из валентной зоны переходят в зону проводимости. Можно считать, что при ионизации вместо одного быстрого электрона в зоне проводимости оказываются два медленных электрона, которые затем ускоряются полем и вновь происходит ионизация. В результате образуется лавина из  $2^n$  электронов, где  $n$  – *число ионизации*. При малой толщине диэлектрика электронный пробой, как правило, является *многолавиным*, в то время как при большой преобладает *однолавиный* механизм.

### 2.1.2. Токи утечки и смещения

Наличие в диэлектриках незначительной концентрации свободных носителей приводит к возникновению слабых *токов сквозной проводимости (токов утечки)*. Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе до момента установления их равновесного состояния вызывают протекание также поляризационных токов – *токов смещения*. Токи смещения при упругих видах поляризации слишком кратковременны, чтобы их можно было как-нибудь зафиксировать. Напротив, токи смещения при релаксационных видах поляризации легко наблюдаются, и их называют *токами абсорбции*. Таким образом, общий ток, протекающий через диэлектрик, равен векторной сумме тока проводимости и тока абсорбции.

В полярных диэлектриках ток абсорбции вызывается ориентацией дипольных молекул, поворотами частей дипольных молекул или направленными перебросами молекул из одного положения равновесия в другое. В неполярных диэлектриках токи абсорбции могут возникать из-за неоднородности электрических свойств материала, когда под действием внешнего поля в диэлектрике протекает процесс образования объемных зарядов.

В постоянных электрических полях токи абсорбции протекают лишь в момент включения в течение времени установления поляризации или при выключении поля в течение времени

релаксации. По завершении процессов поляризации через диэлектрик будет протекать только ток сквозной проводимости –  $I_{\text{СКВ}}$  (рис. 2.2).

В переменных полях токи смещения протекают в течение всего времени действия поля. Следовательно, различие между электропроводностью и поляризацией может быть установлено только в постоянном электрическом поле, в переменном поле эти процессы смешиваются и различие между ними становится условным.

Установившийся на постоянном напряжении сквозной ток проводимости  $I_{\text{СКВ}}$  при  $t \rightarrow \infty$  равен

$$I_{\text{СКВ}} = \frac{U}{R}, \quad (2.3)$$

где  $R$  – сопротивление диэлектрика.

Появление тока абсорбции может быть обусловлено различными причинами, однако его изменение во времени в любом случае описывается экспоненциальной функцией

$$I_{\text{абс}} = U \cdot G_s \cdot \exp\left(-\frac{t}{T}\right),$$

где  $G_s$  – соответствующая току абсорбции проводимость (в общем случае не равная  $1/R$ );

$T$  – постоянная времени спада тока абсорбции;

$t$  – время, в течение которого  $I_{\text{абс}}$  уменьшается в  $e$  раз.

Определить  $T$  можно из касательной к графику зависимости  $I(t)$  (рис. 2.3) в любой точке этого графика.

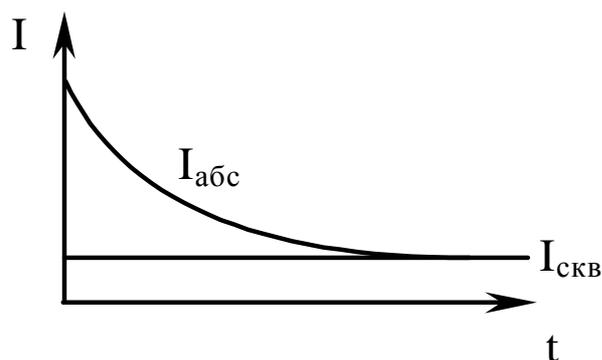


Рис. 2.2. Зависимость тока  $I$ , текущего через диэлектрик, от времени  $t$  при постоянном напряжении

Ток абсорбции (смещения) определяется скоростью изменения вектора смещения  $\mathbf{D}$ , включающем в себя мгновенные (упругие) и замедленные (релаксационные) смещения зарядов. Наличие тока смещения, который характеризует протекающие во времени процессы перераспределения зарядов по объёму диэлектрика, вызывает увеличение затрат мощности в диэлектрике, т.е. диэлектрические потери.

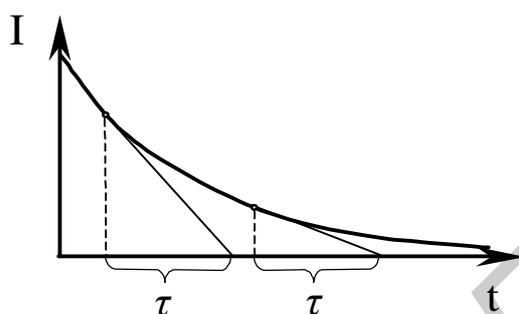


Рис. 2.3. Определение времени спада тока абсорбции из графика зависимости  $I(t)$

$$J_{\text{см}} = \frac{dU}{dT}$$

### 2.1.3. Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют часть энергии переменного электрического поля, которая рассеивается в объеме диэлектрика, переходя в теплоту.

В общем случае удельные потери  $P$ , т.е. энергия, рассеиваемая за единицу времени в единице объема диэлектрика под действием электромагнитного поля, вычисляется по формуле Джоуля-Ленца:

$$P = \sigma_a \cdot E^2, \quad (2.4)$$

где  $P$  – удельная мощность диэлектрических потерь;

$\sigma_a$  – удельная активная проводимость;

$E$  – напряженность электрического поля.

В полупроводниках и металлах активная проводимость  $\sigma_a$  вещества, измеренная на переменном напряжении, равна удельной проводимости  $\sigma$ , измеренной при постоянном напряжении. В диэлектриках  $\sigma_a$  и  $\sigma$  могут значительно различаться. Обычно  $\sigma_a > \sigma$ ,

причем значение  $\sigma_a$  зависит от частоты внешнего поля. Соответственно различаются и мощности потерь, измеренные на постоянном и переменном напряжениях при одинаковой напряженности поля.

В постоянном поле диэлектрик нагревается токами сквозной проводимости (токами утечки) за счёт рассеяния носителей заряда, участвующих в электропроводности, на тепловых колебаниях решётки и структурных дефектах.

В диэлектрике, помещённом в переменное электрическое поле, в тепловую переходит также энергия, затрачиваемая на установление релаксационных видов поляризации, а в неоднородном диэлектрике, кроме того – на перенос зарядов к внутренним границам между различными фазами (миграционная поляризация). Упругие виды поляризации в широком диапазоне частот не вызывают диэлектрических потерь в веществе, т.к. в этом случае электрическая энергия, которая требуется для поляризации молекулы, полностью возвращается источнику после снятия поля. При этом значительное рассеяние энергии происходит только при совпадении частоты электромагнитного поля с собственной частотой колебаний частиц (резонансные диэлектрические потери).

Обычно при рассмотрении диэлектрических потерь имеют в виду потери при переменном напряжении. Так как любое переменное поле  $E$  можно представить в виде совокупности гармонических полей, то достаточно рассмотреть поведение диэлектрика в поле  $E = E_0 \cos \omega t$ .

Рассмотрим явления, происходящие в конденсаторе, на обкладках которого источник синусоидального напряжения поддерживает переменную разность потенциалов:

$$U = U_0 \cdot \cos \omega t, \quad (2.5)$$

где  $t$  – время;

$\omega$  – круговая частота поля.

Если ёмкость конденсатора при отсутствии диэлектрика равна  $C_0$ , то в любой момент времени заряд на обкладках конденсатора  $Q$  будет равен

$$Q = C_0 \cdot U,$$

а величина переменного тока, текущего через конденсатор, будет равна

$$I = \frac{dQ}{dt} = -\omega \cdot C_0 \cdot U_0 \cos \omega t = I_0 \cdot \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.6)$$

где

$$I_0 = \omega \cdot C_0 \cdot U_0. \quad (2.7)$$

Сравнивая (2.5) и (2.6), находим, что падение напряжения на конденсаторе отстает по фазе от текущего через конденсатор тока на  $\pi/2$ . Причина запаздывания напряжения заключается в том, что до тех пор, пока ток течет в одном и том же направлении, заряд на обкладках конденсатора растет. Величина тока  $I$  достигает максимума и начинает убывать, заряд же, а следовательно, и напряжение на обкладках  $U$  всё еще продолжает расти, достигая максимума в тот момент, когда сила тока становится равной нулю. Затем ток изменяет свое направление и начинается убывание зарядов на обкладках.

Из (2.7) следует, что ток через конденсатор возрастает при увеличении частоты поля  $\omega$  и ёмкости конденсатора  $C_0$ . Величина  $R_C = 1/\omega C_0$  называется ёмкостным сопротивлением. Соответственно ток  $I$  в (2.6), текущий через вакуумный конденсатор, ёмкость которого определяется только геометрическими параметрами конденсатора, называют ёмкостным током и обозначают  $I_{\text{ёмк}}$ .

При введении диэлектрика между обкладками конденсатора его ёмкость за счёт процессов поляризации увеличится и величина тока станет больше. Если бы диэлектрик был идеальный (без потерь мощности), то ток через конденсатор был бы чисто реактивным и опережал бы напряжение точно на  $90^\circ$  (рис. 2.4, а). При этом полностью отсутствовало бы запаздывание процессов поляризации и индукция  $D$  изменялась бы в фазе с полем. В реальных диэлектриках из-за рассеяния мощности будет наблюдаться запаздывание поляризации,

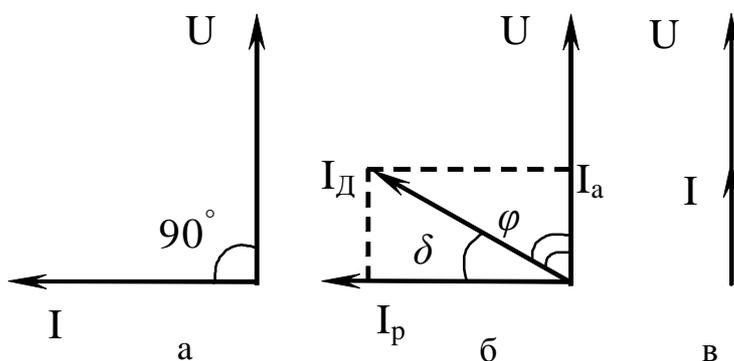


Рис. 2.4. Диаграммы тока и напряжения для находящихся под синусоидальным переменным напряжением:  
а — идеального диэлектрика;  
б — диэлектрика с потерями; в — проводника

максимальные значения поля и поляризации уже не будут совпадать во времени и электрическая индукция  $\mathbf{D}$  будет изменяться не в фазе с полем. Соответственно угол сдвига фаз  $\varphi$  на векторной диаграмме между током и напряжением в конденсаторе будет несколько меньше  $90^\circ$  (рис. 2.4, б).

Синусоида полного тока через конденсатор может быть разложена на две составляющие:

- активную  $I_A$ , обусловленную переходом части электрической энергии поля в тепловую при поляризации и совпадающую по фазе с напряжением  $U$ ;
- реактивную  $I_P$ , опережающую  $U$  на угол  $\pi/2$ .

Поскольку в реальном диэлектрике всегда присутствует сквозной ток проводимости, а поляризационные процессы описываются токами абсорбции, то более точная векторная диаграмма будет иметь вид, представленный на рис. 2.5.

Через диэлектрик текут три синусоидальных тока;

1 – ёмкостный ток  $I_{\text{ёмк}}$ , опережающий напряжение на  $\pi/2$ , равный  $I_0$  в формуле (2.7);

2 – сквозной ток проводимости (утечки)  $I_{\text{скв}}$  (2.3), характеризующий проводимость в обычном проводнике;

3 – ток абсорбции  $I_{\text{абс}}$  с активной составляющей  $I'_{\text{абс}}$ , совпадающей по фазе с напряжением  $U$  и характеризующей потери в диэлектрике за счёт поляризационных процессов, и реактивной  $I''_{\text{абс}}$ , опережающей  $U$  на угол  $\pi/2$ . Наличие тока абсорбции приводит к увеличению как активной проводимости, так и ёмкости.

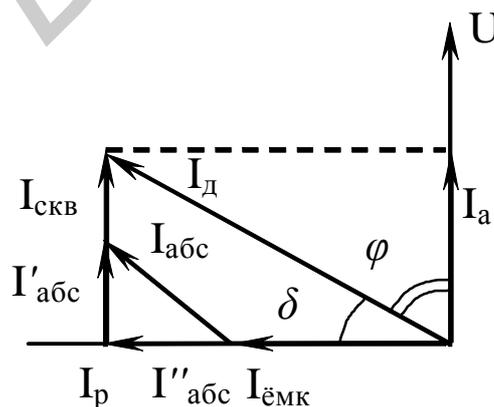


Рис. 2.5. Векторная диаграмма токов и напряжения с учетом токов абсорбции и утечки

Таким образом, значение угла сдвига фаз  $\varphi$  характеризует конденсатор с точки зрения потерь в диэлектрике. В конденсаторах с высококачественным диэлектриком значение  $\varphi$  близко к  $\pi/2$ , поэтому более наглядным параметром потерь будет угол  $\delta$ , дополняющий угол  $\varphi$  до  $\pi/2$  (см. рис. 2.4,б). Угол  $\delta$  называется углом диэлектрических потерь. Очевидно, что

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p} = \frac{P_a}{P_p}, \quad (2.8)$$

где  $I_p$  – общий ёмкостный ток;

$I_a$  – активная составляющая тока в конденсаторе с диэлектриком (рис. 2.5);

$P_a$  – активная мощность потерь, т.е. мощность, расходуемая на нагрев;

$P_p$  – реактивная мощность — мощность, накопленная за период колебаний.

В случае вакуумного конденсатора – ток через него чисто ёмкостный –  $I_{\text{ёмк}}$ , равный в данном случае  $I_p$  и определяемый выражением (2.8). При наличии диэлектрика между обкладками конденсатора общий ёмкостный (реактивный) ток  $I_p$  можно получить из (2.7), учитывая изменившуюся емкость:

$$I_p = U_0 \cdot \omega \cdot C. \quad (2.9)$$

Отношение общего ёмкостного тока  $I_p$  в конденсаторе с диэлектриком к ёмкостному току  $I_{\text{ёмк}}$  в конденсаторе без диэлектрика, так же, как отношение активной составляющей  $I_a$  к  $I_{\text{ёмк}}$ , зависит от свойств диэлектрика и поэтому является его характеристиками.

Обозначим соответственно:

$$\varepsilon' = \frac{I_p}{I_{\text{ёмк}}} = \frac{I_p}{U_0 \cdot \omega \cdot C_0}, \quad (2.10)$$

$$\varepsilon'' = \frac{I_a}{I_{\text{ёмк}}} = \frac{I_a}{U_0 \cdot \omega \cdot C_0}.$$

Из (2.9) и (2.10) следует, что  $\varepsilon' = C/C_0$  – есть диэлектрическая проницаемость вещества в переменном электрическом поле; определяется механизмами поляризации, находящимися в фазе с меняющимся полем и характеризует способность диэлектрика накапливать энергию электрического поля в веществе. В свою очередь  $\varepsilon''$  описывает механизмы, которые вызывают отставание поляризации от приложенного поля на данных частотах, когда частицы вещества периодически ускоряются и тормозятся, пытаясь реагировать на изменение полярности поля.

Из (2.8) следует, что

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'},$$

поэтому  $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta$  называют фактором потерь.

Комплексная величина  $\varepsilon = \varepsilon' - i \varepsilon''$  называется комплексной диэлектрической проницаемостью. Её введение при изучении диэлектриков позволяет использовать уравнения электродинамики в форме, характерной для идеальных диэлектриков без потерь.

#### 2.1.4. Мощность диэлектрических потерь

Из рис. 2.5 видно, что общие потери в диэлектрике равны

$$P = U_0 \cdot I_a = U_0 \cdot I_p \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (2.11)$$

С учетом (2.11) имеем

$$P = U_0^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (2.12)$$

Мощность потерь возрастает пропорционально частоте и квадрату напряжённости электрического поля. Поэтому изоляционные диэлектрические материалы, предназначенные для работы при высоких частотах, должны иметь малое значение  $\operatorname{tg} \delta$ .

Формула (2.12) находит очень широкое применение. Даже в случае работы диэлектрика под несинусоидальным переменным напряжением, когда понятия сдвига фаз и угла диэлектрических потерь не имеют физического смысла, величина  $P/U_0^2 \omega C$  условно обозначается  $\operatorname{tg} \delta$  и называется тангенсом диэлектрических потерь.

Для определения потерь, приходящихся на единицу объема диэлектрика, выделим в диэлектрике куб с ребром, равным  $dx$ . Если электрическое поле входит перпендикулярно граням, то емкость конденсатора, образованного этим кубом, при  $h = dx$  и  $S = (dx)^2$  составит  $\varepsilon' \varepsilon_0 dx$ , а напряжение на нем будет равно  $E dx$ . Тогда удельные диэлектрические потери будут равны

$$P = \frac{dP}{dV} = \frac{dP}{(dx)^3} = E^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (2.13)$$

Для практических расчётов формулу (2.13) обычно используют в виде

$$P = E^2 \cdot f \cdot \frac{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}}, \quad (2.14)$$

где  $f = \omega/2\pi$ .

Из (2.13) и (2.14) следует, что при прочих равных условиях

диэлектрические потери тем больше, чем выше параметры материала  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$ , т.е. чем больше фактор потерь  $\varepsilon''$ .

Учитывая (2.4), для удельной активной проводимости данного диэлектрика при переменном напряжении можно получить

$$\sigma_a = \omega \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg}\delta = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' = f \cdot \frac{\varepsilon' \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg}\delta}{1,8 \cdot 10^{10}}. \quad (2.15)$$

Из (2.15) следует

$$\varepsilon'' = \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma_a}{\omega \cdot \varepsilon_0}.$$

При использовании уравнений электродинамики реальный диэлектрик, имеющий на частоте  $\omega$  проводимость  $\delta_a$ , заменяется «идеальным» с комплексной проницаемостью  $\varepsilon$ .

Наименьшая величина  $\operatorname{tg}\delta$  ( $10^{-6} - 10^{-4}$ ) наблюдается в диэлектриках с упругими механизмами поляризации (в ионных и ионно-ковалентных кристаллах – кварце, слюде, оксиде магния и в неполярных диэлектриках). Основное влияние на эти потери оказывает электропроводность диэлектрика, примеси, нарушения структуры ионных кристаллов. Чем чище и совершеннее диэлектрик, тем меньше его  $\operatorname{tg}\delta$ . В диэлектриках с релаксационной поляризацией в области максимума диэлектрических потерь величина  $\operatorname{tg}\delta$  составляет от  $10^{-2}$  до нескольких единиц. Так, в стеклах  $\operatorname{tg}\delta = 10^{-4} - 10^{-1}$ , а в ситаллах и сегнетоэлектриках  $\operatorname{tg}\delta = 10^{-3} - 10^{-2}$ . В сегнетоэлектриках диэлектрические потери могут быть велики на малых частотах и в отсутствие проводимости благодаря сегнетоэлектрическому гистерезису.

### 2.1.5. Температурно-частотные зависимости $\operatorname{tg}\delta$

Зависимость  $\operatorname{tg}\delta$  от частоты электрического поля и температуры диэлектрика определяется природой поляризационных процессов в диэлектрике.

Релаксационные и миграционные диэлектрические потери возрастают при приближении к частоте  $\omega_0$ , для которой справедливо равенство  $\omega_0 \tau = 1$ , где  $\tau$  – время релаксации. Эта частота соответствует такому периоду прикладываемого переменного поля, при котором достигаются наибольшие затраты энергии на преодоление частицами, участвующими в поляризации, сопротивления внутреннего трения

вещества. При более высоких частотах, как и при более низких,  $\text{tg}\delta$  уменьшается. С увеличением частоты уменьшается способность вещества к поляризации, а при уменьшении  $\omega$  энергия, затрачиваемая на установление поляризации, расходуется только в течение некоторой части периода изменения поля.

При нагревании диэлектрика максимум релаксационных диэлектрических потерь смещается к более высоким частотам из-за уменьшения  $\tau$ .

Резонансные потери, обусловленные упругими видами поляризации, занимают, как правило, узкую область частот вблизи резонансной частоты  $\omega_0$  и от температуры практически не зависят.

При уменьшении частоты величина диэлектрических потерь в идеальном диэлектрике стремится к нулю. В реальных диэлектриках из-за токов сквозной проводимости потери энергии имеют место даже в случае электростатического поля, причем их роль тем существеннее, чем меньше частота внешнего поля. С ростом частоты диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью диэлектрика, уменьшаются.

При повышении температуры диэлектрические потери в полярных диэлектриках существенно возрастают. Рост  $\text{tg}\delta$  происходит как вследствие увеличения проводимости сквозного тока диэлектрика, так и проводимости тока абсорбции. Поэтому температурная зависимость  $\text{tg}\delta$  полярных диэлектриков имеет вид, изображенный на рис. 2.6.

В неполярных диэлектриках рост  $\text{tg}\delta$  обуславливается увеличением только сквозной проводимости. При очень низких температурах диэлектрические потери у самых разнообразных диэлектриков, как правило, малы.

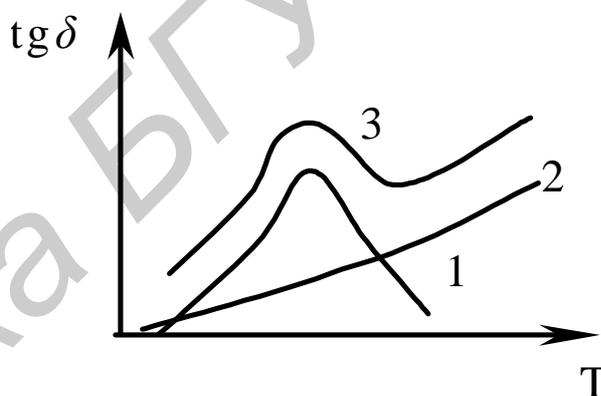


Рис. 2.6. Характер температурной зависимости  $\text{tg}\delta$  для полярного диэлектрика:

- 1 – чисто релаксационные потери;
- 2 – потери за счёт сквозной проводимости;
- 3 – результирующая кривая диэлектрических потерь

### 2.1.6. Применение и классификация диэлектриков

Диэлектрические материалы в электронной технике используются прежде всего как *электроизоляционные* материалы. Они являются

основой, объединяющей элементы любого прибора или устройства в конструктивное целое. Для этого необходимы диэлектрики с большим удельным сопротивлением, малым углом диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ , высокой электрической прочностью  $E_{\text{пр}}$ . Желательно также, чтобы их диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  была мала.

В конденсаторах пассивные (и активные) диэлектрики служат для увеличения электрической ёмкости: емкость конденсатора, заполненного диэлектриком, возрастает в  $\epsilon$  раз. Конденсаторные диэлектрические материалы, как правило, должны иметь большую  $\epsilon$ , малый  $\text{tg}\delta$  и высокую температурную стабильность свойств. Среди диэлектрических материалов выделяют следующие группы.

**Пьезоэлектрики** (греч. *piezo* – давяю; пьезоэлектрические материалы) – анизотропные кристаллические материалы (диэлектрики и полупроводники), в которых при механических деформациях возникает электрическая поляризация – *прямой пьезоэффект*. Пьезоэлектрики обладают также и *обратным пьезоэффектом*: они деформируются под влиянием внешнего электрического поля.

Пьезоэффектом обладают монокристаллы, не имеющие центра симметрии, поликристаллические диэлектрики и другие материалы, содержащие пьезоэлектрические текстуры. Величину пьезоэффекта характеризуют главным образом *пьезомодулем*  $d$ , представляющим собой коэффициент пропорциональности между векторами напряженности механического поля и поляризации.

Поляризация может присутствовать в материале еще до механической деформации (пирозлектрики) и может возникать только вследствие деформирования. Возникающая поляризация может быть упругой и может сопровождаться изменением структуры. Пьезоэффект, как правило, возрастает с ростом полярности пьезоэлектрического материала. Малополярные пьезоэлектрики с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  1 – 3,5 имеют небольшие пьезомодули  $d = (2 - 5)$  пКл/Н. К этому типу пьезоэлектриков относятся монокристаллический кварц,  $\text{NaClO}_3$ ,  $\text{NaBrO}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaBr}$ ,  $\text{NiSO}_4$  и др. Полярные пьезоэлектрики с  $\epsilon$  10 – 30 имеют  $d$  до 40 пКл/Н. К ним относятся турмалин, тартрат калия, сульфат лития.

Пьезоэлектриками являются также сегнетоэлектрики, обладающие достаточно высокими значениями  $\epsilon$  100 – 10000 и  $d$  до 600 пКл/Н, однако отличающиеся большими электрическими и механическими потерями и заметной температурной зависимостью этих свойств. К таким пьезоэлектрикам относятся сегнетова соль (тетрагидрат тартрата

калия-натрия), дигидрофосфаты калия и аммония, триглицинсульфат, а также монокристаллы типа перовскита, например титанаты бария и свинца.

Наибольшее распространение в ультразвуковой технике получили пьезокерамические материалы – пьезокерамика, представляющая собой поляризованные сегнетоэлектрические материалы. Основа таких пьезоэлектриков – твёрдые растворы титаната бария и кальция или цирконата-титаната свинца (ЦТС). Последний обладает  $\epsilon$  до 3500 и  $d$  до 500 пКл/Н. Получают пьезокерамические материалы по технологии производства керамики: исходные материалы синтезируют из соответствующих оксидов при 800 – 1000 °С, из них затем готовят пресспорошки (для полусухого прессования) или шликер (для горячего литья под давлением). Полученные заготовки обжигают при 1000 – 1500 °С, режут и шлифуют. Образцы поляризуют в постоянном электрическом поле напряженностью 1,5 – 3,0 кВ/мм при 100 – 200 °С, вследствие чего у них появляются пьезоэлектрические свойства. Помимо значительного пьезоэффекта пьезокерамика характеризуется стабильностью, большой механической прочностью и устойчивостью к внешним воздействиям, простотой и невысокой стоимостью изготовления пьезоэлементов различной конфигурации.

Пьезоэффектом обладают многие материалы растительного и животного происхождения, например, коллаген, древесина, а также синтетические полимеры – поливинилиденфторидная пьезопленка ( $d = 15 - 25$  пКл/Н), сополимеры винилиденфторида с трифтор- и тетрафторэтиленом и полимерные композиции с наполнителями в виде порошка сегнетоэлектрической керамики.

Пьезоэлектрики применяют в качестве электроакустических и электромеханических преобразователей в ультразвуковой технике (для преобразования звуковых колебаний в электрические и наоборот), гидрофонах и других устройствах, в ВЧ- и СВЧ-технике.

**Пирозлектрики** (греч. пур – огонь) – кристаллические диэлектрики, обладающие спонтанной поляризацией  $P$  (дипольным моментом единицы объёма) в отсутствие электрического поля и других внешних воздействий. Обычно наблюдается не сама поляризация (она компенсируется полями свободных электрических зарядов, натекающих на поверхность кристалла изнутри и извне), а её изменение  $\Delta P$  при быстром изменении температуры  $\Delta T$  (пирозлектрический эффект). Плотность возникающего поверхностного заряда  $\sigma = p\Delta T$ ; коэффициент пропорциональности  $p$  называется пирозлектрической константой. При

изменении температуры на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  поверхностная плотность заряда, как правило, не превышает нескольких сотен единиц в системе СГС (несколько  $\text{мКл}/\text{м}^2$  в СИ).

Пироэлектриками могут быть лишь нецентросимметричные кристаллы. Типичный пироэлектрик – турмалин, природный или синтетический монокристалл алюмосиликата, содержащего атомы бора. В нем при изменении температуры на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  возникает электрическое поле  $E = 400\text{ В}/\text{см}$ . К пироэлектрикам относят кристаллы моногидрата сульфата лития, титаната бария, тростникового сахара и др.

Все пироэлектрики являются и пьезоэлектриками, т.е. в них возникает поляризация при механическом сжатии (или растяжении) в определенных направлениях. Но не все пьезоэлектрики обладают пироэлектрическим эффектом. Ниже точки Кюри пироэлектрики являются сегнетоэлектриками.

Пироэлектрики используют в качестве индикаторов и приемников теплового излучения, а также для измерения его интенсивности.

**Сегнетоэлектрики** (от назв. сегнетовой соли по фамилии синтезировавшего её П. Сеньета, (**P. Seignette**)) – моно- или поликристаллические полярные диэлектрики, обладающие в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризацией; разновидность пироэлектриков. Под действием внешнего электрического поля, упругих напряжений или при изменении температуры в сегнетоэлектриках меняются величина и направление спонтанной поляризации, механические, оптические и теплофизические свойства.

Структура сегнетоэлектриков характеризуется наличием *доменов* – областей с однонаправленной поляризацией в пределах одного домена; суммарная поляризация образца при этом может быть равна нулю. Доменная структура зависит от симметрии кристаллов и часто связана с природой и характером распределения их дефектов.

Действие внешнего электрического поля высокой напряжённости приводит к резкому возрастанию поляризации, обусловленному ориентацией доменов преимущественно по полю. Процесс ориентации обычно сопровождается изменением кристаллической структуры сегнетоэлектрика, причем энергетический барьер относительно невелик. Возрастание поляризации приводит к изменению величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , теплоёмкости, коэффициента

Таблица 2.1

## Свойства некоторых сегнетоэлектриков

Сегнетоэлектрик	Температура сегнетоэлектрического перехода $T_K, ^\circ\text{C}$	Максимальная спонтанная поляризация, $\text{мКл/м}^2$
Титанат бария $\text{BaTiO}_3$	133	250
Сегнетова соль $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	18, 24	2.5
Триглицидсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$	49	28
Ниобат лития $\text{LiNbO}_3$	1210	500
Цирконат-титанат свинца <sup>1</sup> $\text{Pb}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3 - \text{Pb}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$	180 – 300	—
Поливинилиденфторид $(-\text{CH}_2-\text{CF}_2-)$ <sup>2</sup>	Выше $T_{\text{шт}}$	$\leq 80$

термического расширения и других свойств сегнетоэлектриков. Зависимость поляризации в сегнетоэлектриках от напряженности электрического поля нелинейна и имеет вид *петли гистерезиса*.

При нагревании выше определенной температуры, называемой *точкой Кюри*  $T_K$ , спонтанная поляризация сегнетоэлектриков исчезает. В этой точке происходит сегнетоэлектрический переход из полярной фазы в неполярную (*параэлектрическую*). В области  $T_K$  температурная зависимость  $\epsilon$  достигает максимума, а величина остаточной поляризации  $P_0$  падает до нуля.

Сегнетоэлектрические свойства впервые были обнаружены у кристаллов сегнетовой соли – тетрагидрата тартрата калия-натрия  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , затем у дигидрофосфата калия  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Известно несколько сотен сегнетоэлектриков; свойства наиболее широко применяемых приведены в табл. 2.1.

Монокристаллические сегнетоэлектрики получают выращиванием (кристаллизацией) из растворов, расплавов, газовой или паровой фазы (по методам выращивания монокристаллов), керамические сегнетоэлектрики – по технологии керамики, пленочные сегнетоэлектрики – вакуумным напылением, шликерным литьём, а также по полярной технологии – экструзией с последующей ориентационной вытяжкой.

Сегнетоэлектрики в поляризованном состоянии отличаются высокими пиро- и пьезоэлектрическими свойствами и находят

<sup>1</sup> Поликристаллическая керамика группы перовскита.

<sup>2</sup> Частично (на 30 – 50 %) кристаллический полимер.

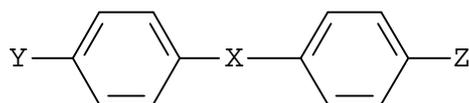
практическое применение в электроакустических и электромеханических преобразователях, приборах ночного видения, для создания нелинейных элементов, входящих в состав различных радиотехнических устройств, а также применяют для изготовления малогабаритных конденсаторов большой ёмкости.

**Жидкие кристаллы** – вещества, переходящие при определенных условиях (температура, давление, концентрация в растворе) в жидкокристаллическое состояние, которое является промежуточным между кристаллическим состоянием и жидкостью. По своим общим свойствам жидкие кристаллы можно разделить на две большие группы:

1. *Термотропные* жидкие кристаллы, образующиеся в результате нагревания твёрдого вещества и существующие в определенном интервале температур и давлений.

2. *Лиотропные* жидкие кристаллы, которые представляют собой двух- и более компонентные системы, образующиеся в смесях стержневидных молекул данного вещества (или нескольких веществ) и воды (или других полярных растворителей).

Как и обычные жидкости, жидкие кристаллы обладают текучестью, но при этом для них характерно спонтанное появление анизотропии свойств (оптических, электрических, магнитных и др.) при отсутствии трёхмерного дальнего порядка в расположении частиц (атомов, молекул). Поэтому жидкокристаллическое состояние часто называют также *мезоморфным (мезофазой)*. На диаграмме состояния температурный интервал существования жидких кристаллов ограничен температурой плавления твёрдых кристаллов и так называемой *температурой просветления*, при которой жидкокристаллические мутные образцы становятся прозрачными вследствие плавления мезофазы и превращения её в изотропную жидкость. Молекулы жидкокристаллических соединений обладают стержнеобразной или дискообразной формой и имеют тенденцию располагаться преимущественно параллельно друг другу. Так называемые термотропные жидкие кристаллы образуются при термическом воздействии на вещество. Такие жидкие кристаллы образуют, например, производные ароматические соединения, содержащие чередующиеся линейные и циклические группировки (бензольные кольца). Жидкокристаллическая фаза образуется чаще всего в том случае, если заместители в молекуле располагаются в параположении. Большое количество термотропных жидкокристаллических соединений может быть изображено общей формулой:



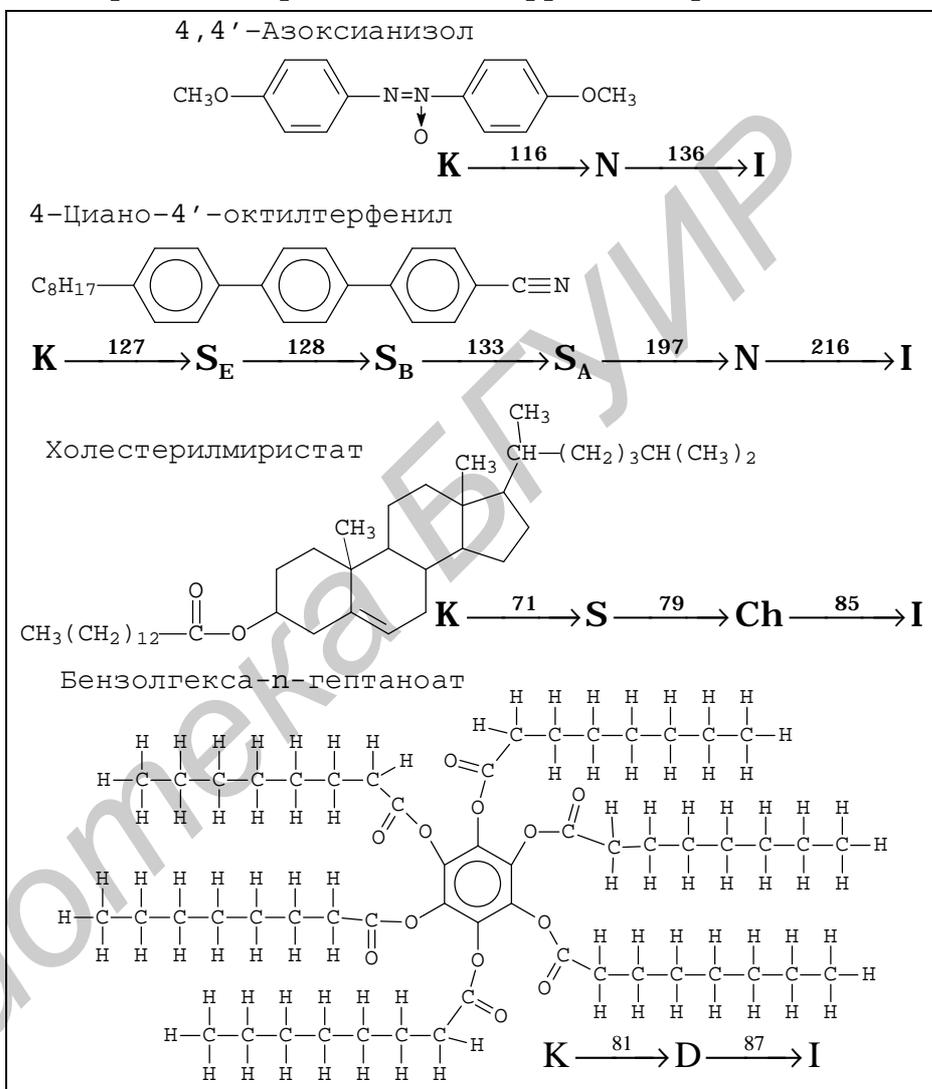
где **X** обычно представляет собой следующие группы:  $-\text{CH}=\text{N}-$ ,  $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ ,  $-\text{HC}=\text{CH}-$ ,  $-\text{C}=\text{C}-$ ,  $-\text{C}(\text{O})-$ ,  $\text{NH}-$ .

Концевыми группами **Y** и **Z** могут быть алкильные и алкоксильные группировки, галогены, циано-, нитро- и аминогруппы и др. Примеры некоторых жидких кристаллов приведены в табл. 2.2. Часто жёсткие фрагменты молекул, например, циклические группировки, определяющие существование мезофазы, называются «мезогенными». Наличие разветвлений в молекулах приводит к сужению температурного интервала существования мезофазы.

Лиотропные жидкие кристаллы образуются при растворении некоторых веществ в определённых растворителях. Например, водные растворы мыл, полипептидов, липидов, белков, ДНК и других образуют жидкие кристаллы в определённом интервале концентраций и температур. Для молекул этих веществ характерна, как правило, стержневидная форма, причём молекулы имеют на одном конце полярную группу, а большая часть стержня представляет собой гибкую гидрофобную углеводородную цепь. Такие вещества называются амфифилами (греч. амфи – с двух концов, филос – любящий, благорасположенный). Примером амфифилов могут служить фосфолипиды.

Вещества, имеющие амфифильные молекулы, как правило, плохо растворяются в воде, склонны образовывать агрегаты таким образом, что их полярные группы на границе раздела фаз направлены к жидкой фазе. При низких температурах смешивание жидкого амфифила с водой приводит к расслоению системы на две фазы. Одним из вариантов амфифилов со сложной структурой может служить система мыло-вода. Здесь имеется алифатический анион  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{n-2}\text{CO}_2^-$  (где

Жидкокристаллические фазы и температуры соответствующих переходов для некоторых соединений (соединение, тип жидких кристаллов<sup>1</sup> и температуры фазовых переходов, °С (цифры над стрелками))



$n \sim 12 - 20$ ) и положительный ион  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  и др. Полярная группа  $-\text{CO}_2^-$  стремится к тесному контакту с молекулами воды, тогда как неполярная группа (амфифильная цепь) избегает контакта с водой. Это явление типично для амфифилов. Поэтому структурными единицами лиотропных жидких кристаллов являются надмолекулярные образования различных типов, распределённые в среде растворителя и имеющие цилиндрическую, сферическую или другую форму.

В зависимости от характера расположения стержнеобразных молекул различают три основных типа жидких кристаллов — смектический,

<sup>1</sup> К — твёрдое кристаллическое состояние, I — изотропная жидкость (раслав), N — нематики, S ( $\text{S}_A$ ,  $\text{S}_B$ ,  $\text{S}_F$ ) — смектики, D — дискотики, Ch — холестерики.

нематический и холестерический. В смектических жидких кристаллах (их называют смектиками, обозначают **S**) молекулы располагаются в слоях. Центры тяжести удлинённых молекул находятся в равноотстоящих друг от друга плоскостях и подвижны в двух измерениях (на смектической плоскости). Длинные оси молекул могут располагаться как перпендикулярно к плоскости смектического слоя (ортогональные смектики, рис. 2.7, а), так и под некоторым углом к слою (наклонные смектики, рис. 2.7, б).

Кроме того, возможно упорядоченное и неупорядоченное расположение молекул в самих слоях. Все это обуславливает возможности образования различных полиморфных модификаций. Известно свыше десятка полиморфных смектических модификаций, обозначаемых буквами латинского алфавита (смектики А, В, С и т. д., или  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$  и т. д.). Формирование смектических фаз характерно для жидкокристаллических соединений, молекулы которых содержат длинные концевые алкильные или алкоксильные группы **Y** и **Z** с числом атомов углерода  $\geq 4 - 6$ . Нематические жидкие кристаллы (нематики **N**) характеризуются наличием ориентационного порядка, при котором длинные оси молекул расположены однонаправленно при беспорядочном расположении центров тяжести молекул (рис. 2.7, в).

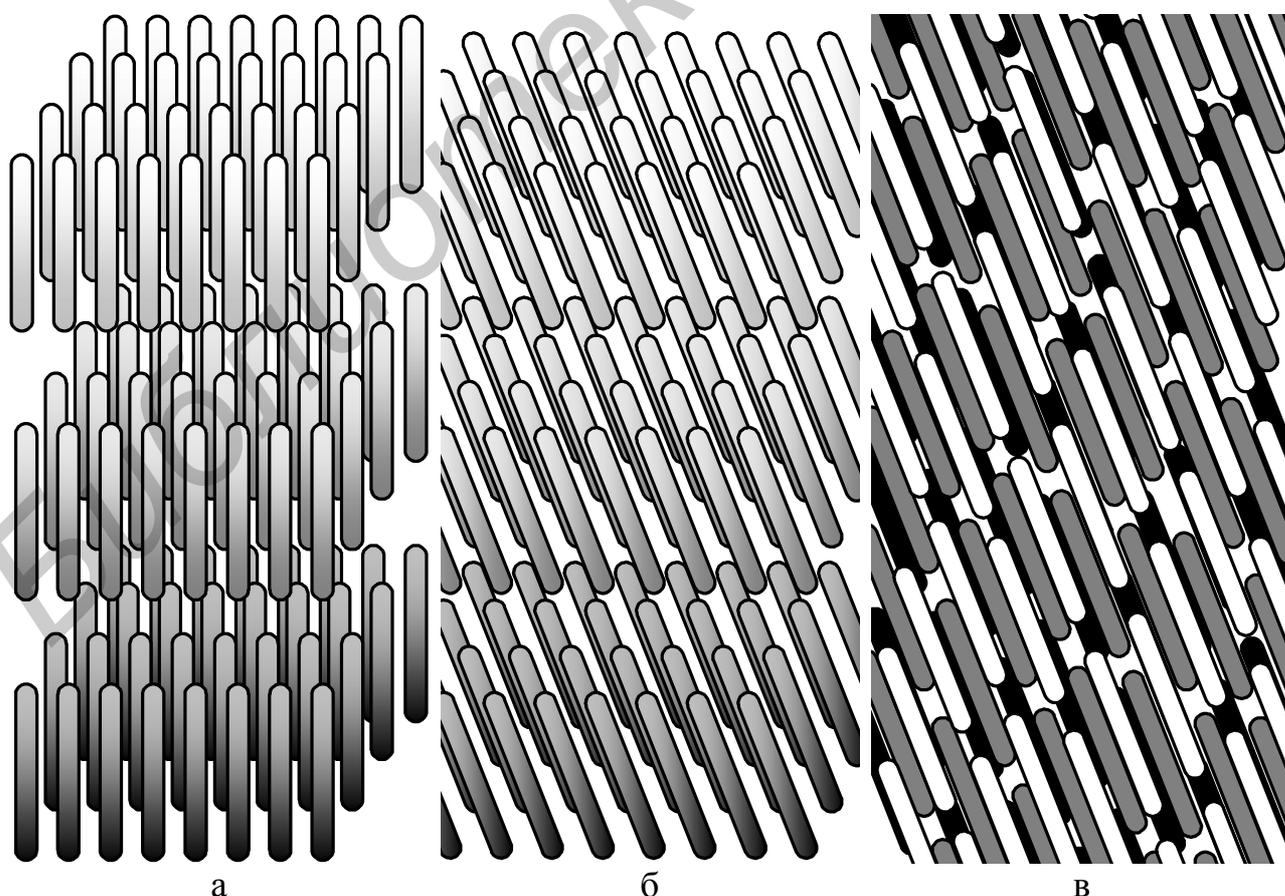


Рис. 2.7. Структура смектических (а и б) и нематических (в) жидких кристаллов:  
а — ортогональное; б — наклонное расположение молекул

Нематический тип жидких кристаллов образуют соединения, в молекулах которых имеются короткие или алкильные или алкоксильные группы (число атомов углерода  $\leq 3$ ).

Холестерический тип мезофазы (холестерики Chol) образуется двумя группами соединений: производными оптически активных стероидов, главным образом холестерина (отсюда название), и

нестероидными соединениями, принадлежащими к тем же классам соединений, которые образуют нематические жидкие кристаллы, но обладающими хиральностью (алкил-, алкокси-, ацилоксизамещенные азометины, производные коричной кислоты, азо- и азоксисоединения и др.). В холестерических жидких кристаллах молекулы расположены так же, как в нематических, но в каждом слое молекулы повернуты относительно их расположения в соседнем слое на определенный угол. В целом реализуется структура, описываемая спиралью (рис. 2.8). Вещества с дискообразными молекулами (дискотики D) могут образовывать жидкие кристаллы, в которых молекулы упакованы в колонки (имеется дальний порядок в ориентации плоскостей

дискообразных молекул) или расположены так же, как в нематиках (дальний порядок отсутствует)

(рис. 2.9, а, б).

Своеобразная структура

жидкокристаллических соединений,

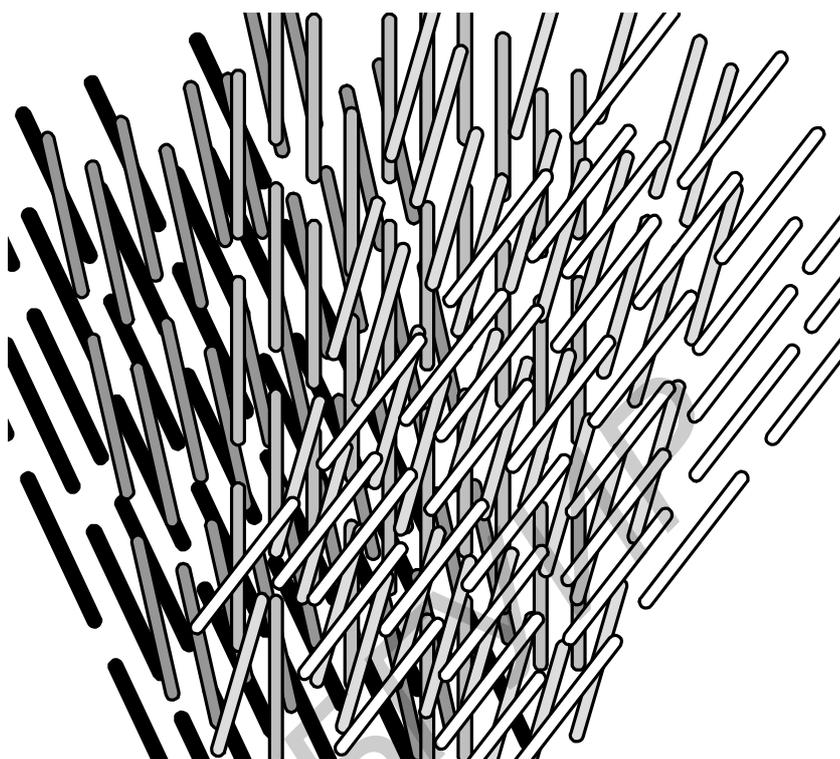


Рис. 2.8. Структура холестерических жидких кристаллов

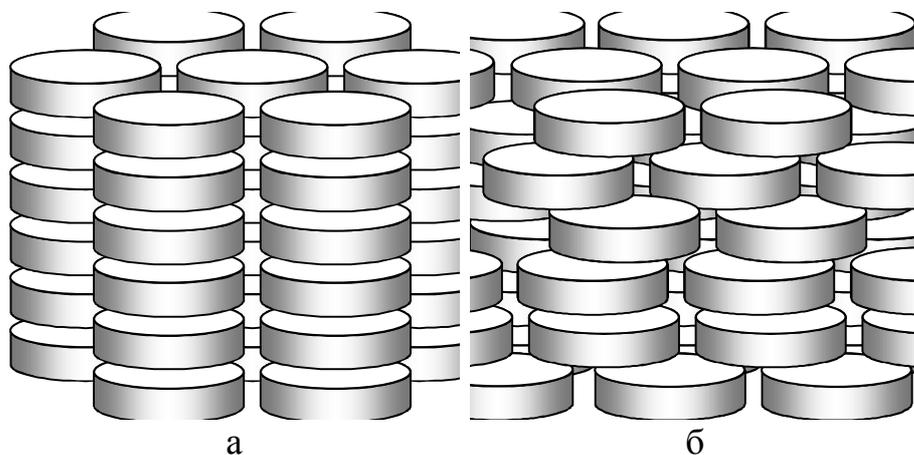


Рис. 2.9. Структура дискотических жидких кристаллов: а — колончатая фаза; б — нематическая фаза

обеспечивающая сочетание упорядоченности в расположении молекул с их высокой подвижностью, определяет широкие области практического использования жидких кристаллов. Направление преимущественной ориентации молекул, характеризуемое аксиальным единичным вектором, или директором, может легко изменяться под воздействием различных внешних факторов – температуры, механических напряжений, напряженности электрического и магнитного полей.

Непосредственная причина ориентации или переориентации директора – анизотропия вязкоупругих, оптических, электрических или магнитных свойств среды. В свою очередь изменение преимущественной ориентации молекул вызывает изменение оптических, электрических и других свойств жидких кристаллов, т.е. создает возможность управления этими свойствами посредством сравнительно слабых внешних воздействий, а также позволяет регистрировать указанные воздействия. Электрооптические свойства нематических жидких кристаллов широко используют в системах обработки и отображения информации, в буквенно-цифровых индикаторах (электронные часы, микрокалькуляторы, дисплеи и т.п.), оптических затворах и других светоклапанных устройствах. Преимущества этих приборов – низкая потребляемая мощность (порядка  $0,1 \text{ мВт/см}^2$ ), низкое напряжение питания (порядка единиц вольт), что позволяет, например, сочетать жидкокристаллические дисплеи с интегральными схемами и тем самым обеспечивать миниатюризацию индикаторных приборов (плоские телевизионные экраны). Спиральная структура холестериков определяет их высокую оптическую активность (которая на несколько порядков выше, чем у обычных органических жидкостей и твердых кристаллов) и способность селективно отражать циркулярно поляризованный свет видимого, ИК- и УФ-диапазонов. При изменении температуры, состава среды, напряженности электромагнитного поля изменяется шаг спирали, что сопровождается изменением оптических свойств, в частности цвета. Это позволяет определять температуру тела по изменению цвета жидких кристаллов, контактирующего с поверхностью тела. Жидкокристаллическая термография используется в технике для визуализации ИК-, СВЧ-излучений, в качестве неразрушающих методов контроля в микроэлектронике и других областях, в медицине – для диагностики ряда сосудистых и острых воспалительных заболеваний. Особое место среди жидкокристаллических веществ занимают полимеры. Термотропные полимерные жидкие кристаллы получают «химическим включением» мезогенных групп в состав линейных и гребнеобразных

макромолекул. Это позволяет не только значительно увеличить количество жидкокристаллических веществ, но и существенно расширить общие представления о природе жидкокристаллического состояния. На основе полимеров можно получать жидкокристаллические стёкла, плёнки, волокна и покрытия с заданными анизотропными свойствами. Мезогенные группы макромолекул легко ориентируются в мезофазе под действием внешних полей (механических, электрических, магнитных), а при последующем охлаждении полимера ниже температуры стеклования полученная анизотропная структура фиксируется в твёрдом состоянии.

Использование лиотропного жидкокристаллического состояния на стадии переработки жесткоцепных полимеров – новый путь получения высокопрочных высокомодульных полимерных материалов. Жидкие кристаллы открыты в 1888 г. Ф. Рейнитцером и О. Леманом. Число описанных жидких кристаллов превышает десятки тысяч и непрерывно увеличивается.

**Электреты** – диэлектрики, способные длительное время находиться в наэлектризованном состоянии после снятия внешнего воздействия, вызвавшего поляризацию, и образовывать вокруг себя электрическое поле; являются электрическими аналогами постоянных магнитов.

В качестве электретов используют монокристаллические (например галогениды щелочных металлов, корунд, сера) и поликристаллические (титанаты щелочноземельных металлов, фарфор, керамика, стёкла, ситаллы и др.) диэлектрики, полимеры (главным образом гомо- и сополимеры тетрафторэтилена, поливинилиденфторид, поликарбонаты, полиметилметакрилат, полиамиды), а также воски (пчелиный и карнаубский) и природные смолы. В зависимости от способа поляризации электреты разделяют на группы. *Термоэлектреты* поляризуются при нагревании диэлектриков в электрическом поле до температуры  $T_n$ , при которой полярные участки могут ориентироваться достаточно быстро. При последующем охлаждении в электрическом поле до некоторой температуры  $T_k$  подвижность полярных участков «замораживается» и они длительное время находятся в ориентированном состоянии с остаточной поляризацией  $P_0$ , величина которой прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости  $\epsilon_0$ :  $P_0 = \epsilon_0 \cdot \Delta\epsilon \cdot E_n$  где  $\Delta\epsilon = \epsilon_{T_n} \cdot \epsilon_{T_k}$  ( $E_n$  – напряженность внешнего электрического поля;  $\epsilon_{T_n}$  и  $\epsilon_{T_k}$  – диэлектрическая проницаемость соответственно при температурах  $T_n$  и  $T_k$ .) В полях высокой напряжённости происходит также инжекция носителей зарядов

(электронов, дырок), которые образуют поверхностные заряды со знаком, противоположным знаку поляризованного заряда. Эффективная поверхностная плотность зарядов составляет  $\sigma_{эф} = \sigma_p - P_0$ , где  $\sigma_p$  – инжектированный заряд. Поляризацию проводят также приложением электрического поля высокой напряженности (*электроэлектреты*), в коронном разряде (*коронозлектреты*), облучением пучком заряженных частиц (*радиационные электреты*), совместным воздействием электрического поля и электромагнитного излучения, например света (*фотоэлектреты*). В отсутствие внешнего электрического поля электреты получают при механической деформации полимеров (*механоэлектреты*), при трении (*трибоэлектреты*), химической сшивке и полимеризации (*хемозлектреты*). Деполяризация электретов при нагревании сопровождается возникновением токов термостимулированной деполяризации (ТСД), измерение которых позволяет с высокой чувствительностью определять температуры и характеристики релаксационных явлений диполей. Максимальная величина  $\sigma_{эф}$  и её неизменность во времени определяется не только химическим строением и электропроводностью диэлектрика, но и свойствами окружающей среды, например, пробивной прочностью воздуха, наличием вблизи заряженной поверхности противозэлектрода, на котором индуцируется противоположный заряд. Кроме обычных электретов, обладающих противоположными знаками зарядов с разных сторон (*биполярные электреты*), известны так называемые *моноэлектреты*, представляющие собой, например, полимерные плёнки (пластины) с зарядом одного знака с обеих сторон. Для таких диэлектрических плёнок толщиной 10 мкм при комнатной температуре  $\sigma_{эф} = 5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>; стабильность зарядов электретов во времени достигает десятков лет. Электреты применяются в качестве источников постоянного электрического поля в электретных микрофонах и телефонах, виброметрах, датчиках давления, фильтрах, дозиметрах, устройствах электрической памяти; фотоэлектреты используются в электрофотографии.

Чистые диэлектрики прозрачны в оптическом диапазоне. Вводя в диэлектрик соответствующие примеси, можно окрасить его, сделав непрозрачным для определенной области спектра (фильтры).

Диэлектрики с большими диэлектрическими потерями ( $\text{tg}\delta > 10^{-2}$ )

используют для изготовления деталей и покрытий, поглощающих радиоволны.

Явление диэлектрических потерь находит непосредственное применение в некоторых технологических процессах обработки диэлектриков или полупроводников в электрическом поле высокой частоты, например, при полимеризации, сушке и т.д.

## 2.2. Выполнение лабораторной работы

### 2.2.1. Задания по работе

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки и методики измерений лабораторной работы №1.

2. На частотах 100 Гц и 1 кГц определить температурные зависимости  $\varepsilon$ ,  $\operatorname{tg}\delta$  и  $G$  исследуемых образцов. Максимальная температура нагрева образцов  $< 150\text{ }^\circ\text{C}$ !

3. Результаты измерений и расчётные данные занести в таблицу вида 1.1.

4. Построить графики зависимостей  $\varepsilon(T)$ ,  $\operatorname{tg}\delta(T)$  и  $G(T)$  для частот 100 Гц и 1 кГц.

5. Используя измеренные значения  $G(T)$ , построить графики зависимостей  $\ln G - f(1/T)$  и определить параметры материалов  $G_0$  и энергии активации носителей заряда  $\Delta W$ .

6. По измеренным данным  $\varepsilon(T)$  и  $\operatorname{tg}\delta(T)$  рассчитать значения удельных диэлектрических потерь  $P$  в исследуемых материалах. Полученные результаты представить в виде таблиц и графиков.

### 2.2.2. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Расчётные формулы.
4. Экспериментальные и расчётные данные в виде таблиц.
5. Графические зависимости.
6. Анализ полученных результатов.
7. Выводы.

### 2.2.3. Контрольные вопросы

1. В результате каких процессов происходит образование носителей зарядов в диэлектриках?

2. В чём проявляется в диэлектриках взаимообусловленность

процессов поляризации и электропроводности?

3. Почему в большинстве случаев эффективная масса электронов и дырок в диэлектриках значительно больше, чем в полупроводниках?

4. Как влияет валентность ионов на величину электропроводности ионных кристаллов? В каких кристаллах выше электропроводность: NaCl или Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>?

5. Чем определяется электропроводность кристаллов с молекулярной решеткой (полиэтилен, графит и т.д.)?

6. Как влияет изменение температуры диэлектрика на подвижности носителей заряда в диэлектриках?

7. В каких случаях и почему прохождение электрического тока через диэлектрик не влияет на изменение его свойств?

8. Как влияет влажность среды на электроизоляционные свойства материалов? Почему?

9. Как влияет гигроскопичность диэлектриков на величину их диэлектрических потерь? Почему?

10. Какие свойства должен иметь диэлектрик при использовании его для изготовления конденсатора большой емкости, и какие – в случае его применения в качестве изолирующего материала? Почему?

11. Почему для электроизоляционных материалов желательно, чтобы их диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  была мала?

12. Почему при увеличении температуры изменяется значение  $\text{tg}\delta$  диэлектрика с ориентационным механизмом поляризации?

13. Почему беспримесные диэлектрики прозрачны для видимого света?

14. Жидкие кристаллы, их классификация, строение, основные свойства и применение.

15. Пьезоэлектрики, прямой и обратный пьезоэффекты, основные пьезоэлектрические материалы.

16. Электреты, группы материалов, способы получения, области применения.

## Литература

1. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – СПб.: Лань, 2004.
2. Блейкмор, Дж. Физика твёрдого тела / Дж. Блейкмор. – М.: Мир, 1988.
3. Рез, И. О. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике / И. О. Рез, Ю. М. Поплавко. – М.: Радио и связи, 1989.
4. Тареев, Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М., 1983.
5. Варфут, Л. Полярные диэлектрики и их применение / Л. Варфут, Д. Тейлор. – М., 1981.
6. Богородицкий, И. П. Материалы радиоэлектронной техники / И. П. Богородицкий, В. В. Пасынков. – М.: Высш. шк., 1969.
7. Жданов, Г. С. Физика твёрдого тела / Г. С. Жданов. – М.: Моск. ун-т, 1969.

Учебное издание

**ПОЗНЯК** Александр Анатольевич  
**ПОЛУБОК** Владислав Анатольевич

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Лабораторный практикум  
по дисциплине  
«Физико-химические основы микроэлектроники  
и технологии РЭС и ЭВС»  
для студентов специальности  
«Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»  
всех форм обучения

Редактор Т. П. Андрейченко  
Корректор Е. Н. Батурчик

---

Подписано в печать  
Гарнитура «Bookman».  
Уч.-изд. л. 2,3.

Формат 60x84 1/16.  
Печать ризографическая.  
Тираж 200 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л.  
Заказ 29.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6