

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

С. Л. КУРИЛИН

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ РАБОТ

Учебно-методическое пособие

Часть 2

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ

Одобрено методической комиссией электротехнического факультета

Гомель 2009

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2
К93

Рецензент – зав. кафедрой химии д-р . техн. наук,
профессор А. С. Неверов (УО «БелГУТ»).

Курилин, С. Л.

К93 Электротехнические материалы и технология электромонтажных работ :
учеб.- метод. пособие. В 3 ч. Ч. 2. Диэлектрические и магнитные матери-
риалы / С. Л. Курилин ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос.
ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 92 с.
ISBN 978-985-468-588-5 (ч. 2)

Приведены общие сведения о поляризации и электрическом пробое диэлек-
триков, о намагничивании ферро- и ферритмагнетиков. Описаны электроизоля-
ционные материалы, активные диэлектрики и магнитные материалы.

Предназначено для студентов электротехнического факультета специаль-
ности 1-37 02 04 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном
транспорте»

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2

Учебное издание

КУРИЛИН Сергей Леонидович

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ
ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ РАБОТ**

Часть 2

Диэлектрические и магнитные материалы
Учебно-методическое пособие

Редактор Т. М. Р и з е в с к а я. Технический редактор В. Н. К у ч е р о в а

Подписано в печать 22.06.2009 г. Формат 60x84^{1/16}. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 5,35. Уч.-изд. Л. 5,37. Тираж 350 экз.
Зак. № Изд. № 25

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта
ЛИ № 02330/0133394 от 19.07.2004 г.
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34

ISBN 978-985-468-588-5 (ч. 2)
ISBN 978-985-468-450-5

© Курилин С. Л., 2009
© Оформление. УО «БелГУТ», 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Электроизоляционные материалы	4
1.1 Электропроводность диэлектриков.....	4
1.2 Поляризация диэлектриков и диэлектрические потери.....	7
1.3 Диэлектрическая проницаемость материала и угол потерь.....	10
1.4 Пробой изоляции и электрическая прочность диэлектрика.....	14
1.5 Электрический пробой газа в однородном поле.....	15
1.6 Особенности пробоя газа в неоднородном поле.....	18
1.7 Изоляционные газы и жидкости.....	19
1.8 Особенности пробоя твёрдой изоляции.....	22
1.9 Получение и применение полимеров	24
1.10 Неполлярные полимеры	27
1.11 Полярные полимеры	29
1.12 Волокнистые изоляционные материалы.....	31
1.13 Электроизоляционные лаки и компаунды	31
1.14 Композиционные пластмассы и слоистые пластики	33
1.15 Эластомеры	35
1.16 Стёкла	35
1.17 Керамика	40
1.18 Слюда и слюдяные материалы	43
1.19 Асбест и асбестовые материалы	44
1.20 Неорганические диэлектрические плёнки	45
1.21 Нагревостойкость электроизоляционных материалов.....	45
2 Активные диэлектрики	47
2.1 Сегнетоэлектрики	47
2.2 Применение сегнетоэлектриков	49
2.3 Электрооптические кристаллы	52
2.4 Пьезоэлектрики	53
2.5 Пироэлектрики	56
2.6 Электреты	57
2.7 Материалы для твёрдотельных лазеров.....	58
2.8 Жидкие кристаллы.....	59
3 Магнитные материалы	62
3.1 Классификация веществ по магнитным свойствам.....	62
3.2 Доменная структура и намагничивание ферромагнетиков.....	65
3.3 Петли гистерезиса и магнитные характеристики материала.....	69
3.4 Особенности магнитных свойств ферримагнетиков.....	73
3.5 Материалы для постоянных и низкочастотных магнитных полей.....	75
3.6 Высокочастотные магнитомягкие материалы.....	79
3.7 Магнитные материалы с прямоугольной петлёй гистерезиса и магнитострикционные.....	82
3.8 Материалы для постоянных магнитов.....	85
3.9 Магнитные плёнки для записи информации.....	89
Список литературы.....	92

1 ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Электроизоляционные материалы окружают и отделяют друг от друга токоведущие части электрических устройств, элементы схемы или конструкции, находящиеся под различными электрическими потенциалами. Изоляция обкладок конденсаторов позволяет получать требуемые значения электрической ёмкости.

Для изоляции применяют газы, жидкости и твёрдые вещества. По химическому составу электроизоляционные материалы подразделяют на: органические, элементоорганические и неорганические. Твёрдые материалы классифицируют на основе особенностей их строения. Это полимеры и эластомеры (каучуки), волокна (пропитанные), лаки и компаунды, стёкла, кристаллы и плёнки, а также композиции диэлектриков волокнистого и кристаллического строения с аморфным связующим.

Под действием электрического поля диэлектрик поляризуется, кроме того, через него протекает небольшой ток сквозной проводимости. От этого тока, но в основном от потерь энергии при замедленных видах поляризации, диэлектрик нагревается, что может привести к пробое. Пробой возможен также в результате ударной ионизации и электрохимического старения.

1.1 Электропроводность диэлектриков

В диэлектрике различают токи сквозной проводимости и токи смещения связанных зарядов (при замедленных видах поляризации их называют токами абсорбции, от лат. *absorbeo* – поглощаю). Сумма токов сквозной проводимости и абсорбции называется током утечки.

Электропроводность диэлектрика характеризуется только током сквозной проводимости. Для исключения токов абсорбции её измеряют при постоянном напряжении через 1 минуту после его подачи (за это время токи абсорбции спадают практически до нуля).

Электропроводность диэлектриков возрастает при нагреве и повышении влажности. У твёрдых материалов различают объёмную и поверхностную электропроводность. Для численной оценки качества изоляционных материалов можно использовать значения его удельной объёмной электрической проводимости – объёмной γ_v , См/м (сименс, делённый на метр), и поверхностной γ_s , См. На практике чаще используют обратные величины – удельные объёмное ρ_v и поверхностное ρ_s электрические сопротивления.

Удельное объёмное электрическое сопротивление ρ_v , Ом·м (ом, умноженный на метр), численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно выделенного из исследуемого материала, если ток проходит от одной грани этого куба к противоположной.

Удельное поверхностное электрическое сопротивление ρ_s , Ом, численно равно сопротивлению квадрата любых размеров, мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит от одной стороны этого квадрата к противоположной.

При длительной работе под напряжением сквозной ток через твёрдые или жидкие диэлектрики с течением времени может изменяться – уменьшаться или увеличиваться. Уменьшение сквозного тока со временем говорит о том, что электропроводность материала обусловлена ионами посторонних примесей, она уменьшается за счёт электрической очистки образца. Увеличение тока со временем свидетельствует об участии в нём зарядов, которые являются структурными элементами самого материала и о протекающем в диэлектрике необратимом процессе старения, способном постепенно привести к разрушению – пробое диэлектрика.

Электропроводность газов при небольших значениях напряжённости электрического поля пренебрежимо мала. Поэтому воздух можно рассматривать как совершенный диэлектрик, до тех пор, пока не создадутся условия для ударной ионизации.

Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул жидкости. В **неполярных** жидкостях электропроводность определяется наличием диссоциированных примесей, в том числе влаги (от лат. *dissociatio* — разъединение). Очистка непо-

лярных жидких диэлектриков от примесей заметно повышает их сопротивление. В **полярных** жидкостях электропроводность зависит не только от примесей; иногда она вызывается диссоциацией молекул самой жидкости. С увеличением температуры возрастает степень диссоциации и подвижность ионов, а следовательно, и электропроводность. Полярные жидкости по сравнению с неполярными всегда имеют повышенную проводимость, чем больше диэлектрическая проницаемость, тем выше проводимость. **Сильнополярные** жидкости отличаются настолько высокой проводимостью, что рассматриваются уже не как диэлектрики, а как проводники с ионной электропроводностью.

Электропроводность твёрдых тел обусловлена как передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей, а в сильных полях – также движением электронов. Собственная электропроводность твёрдых тел, её зависимость от температуры определяются структурой вещества и его составом. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей удельной проводимостью, чем кристаллы с многовалентными ионами. В анизотропных кристаллах удельная проводимость неодинакова по разным его осям. Например, в кварце удельная проводимость в направлении, параллельном главной оси, примерно, в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном этой оси. В кристаллических телах с молекулярной решёткой (сера, алмаз) проводимость мала и определяется примесями. Проводимость твёрдых **пористых** диэлектриков значительно увеличивается при наличии в них влаги. Высушивание материалов повышает их электрическое сопротивление, но под воздействием влажной среды сопротивление вновь уменьшается. Для уменьшения гигроскопичности (поглощения влаги) и влагопроницаемости пористые изоляционные материалы подвергают пропитке.

Поверхностная электропроводность твёрдых диэлектриков обусловлена наличием влаги, загрязнением и различными дефектами поверхности диэлектрика. Вода обладает значительной проводимостью. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы обнаружить заметную электропроводность, которая определяется в основном толщиной этого слоя. Однако поскольку сопротивление адсорбированной плёнки влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, удельную поверхност-

ную проводимость обычно рассматривают как характеристику самого диэлектрика.

Наличие загрязнения относительно мало сказывается на поверхностной проводимости гидрофобных диэлектриков (от гидро... и греч. *phobos* – страх, боязнь). Это неполярные диэлектрики, чистая поверхность которых неспособна смачиваться водой. Однако загрязнения сильно влияют на проводимость гидрофильных диэлектриков. (от гидро... и греч. *phileo* – люблю). К ним относят ионные и полярные диэлектрики со смачиваемой поверхностью, особенно если они частично растворимы в воде. Под действием воды на поверхности таких диэлектриков образуется плёнка электролита. Высокой поверхностной проводимостью обладают также объёмно-пористые материалы, в них процесс поглощения влаги в глубь материала стимулирует образование плёнки на его поверхности.

С целью уменьшения поверхностной электропроводности материала применяют различные приёмы очистки его поверхности – промывку спиртом и водой, кипячение в дистиллированной воде. Для сохранения поверхностного сопротивления изделий из керамики и стёкол в условиях высокой влажности, их покрывают плёнками гидрофобных (водоотталкивающих) кремнийорганических лаков.

При постоянном напряжении качество изоляционного материала характеризуется значениями удельных объёмного ρ_v и поверхностного ρ_s сопротивлений. Потери энергии, вызванные протеканием малых постоянных токов сквозной проводимости, невелики.

1.2 Поляризация диэлектриков и диэлектрические потери

Поляризацией вещества называют смещение связанных зарядов.

Поляризация возникает под действием внешнего электрического поля, однако у сегнетоэлектриков наблюдается самопроизвольная (спонтанная) поляризация, а пьезоэлектрики могут поляризоваться под действием механических напряжений.

Различают несколько механизмов поляризации, для их моделей применяют резисторы и конденсаторы как показано на рисунке 1.1, а.

Элементы, соответствующие необязательным механизмам поляризации и потерь, показаны пунктиром.

Ёмкость C_0 соответствует конденсатору, между обкладками которого вакуум. Резистор $R_{пр}$ соответствует потерям энергии от токов

сквозной проводимости (эти потери не зависят от частоты приложенного напряжения, а с ростом температуры возрастают по экспоненциальному закону).

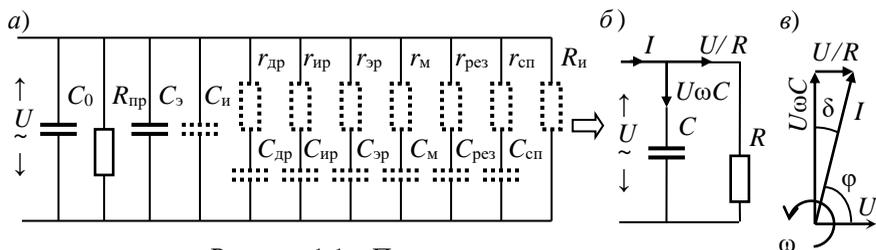


Рисунок 1.1 – Поляризация диэлектрика:
 а – моделирование механизмов поляризации и потерь;
 б – схема замещения; в – векторная диаграмма

Электронная поляризация ($C_э$) представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Происходит мгновенно (за время около 10^{-15} с) и без потери энергии. Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков. Значение диэлектрической проницаемости вещества с чисто электронной поляризацией, численно равно квадрату показателя преломления света.

Ионная поляризация ($C_и$) характерна для твёрдых тел с ионным строением и обусловлена упругим смещением связанных ионов на расстояния, меньшие периода решётки. Происходит быстро (за время около 10^{-13} с) и без потери энергии.

Дипольно-релаксационная поляризация ($C_{др}$, $r_{др}$) свойственна полярным жидкостям и представляет собой замедленный поворот дипольных молекул в направлении электрического поля, что требует преодоления некоторого противодействия. Поэтому дипольно-релаксационная поляризация связана с потерями энергии и нагревом диэлектрика, это отражено на рисунке 1.1, а в виде последовательно включенного с конденсатором $C_{др}$ активного сопротивления $r_{др}$. После снятия электрического поля ориентация частиц постепенно ослабевает вследствие теплового движения. Время релаксации – это промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных диполей уменьшается в $e \approx 2,7$ раза. При нагреве молекулярные силы ослабевают, что должно облегчить дипольно-релаксационную поляризацию. Однако в то же время возрастает

энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля. Поэтому зависимость диэлектрической проницаемости ϵ от температуры характеризуется наличием максимума.

В вязких жидкостях сопротивление поворотам молекул настолько велико, что при быстропеременных полях диполи не успевают ориентироваться в направлении поля, и способность к поляризации уменьшается с увеличением частоты приложенного напряжения.

Дипольно-релаксационная поляризация свойственна полярным жидкостям; однако этот вид поляризации может наблюдаться также и в **твёрдых полярных органических веществах**. Но в этом случае поляризация обычно обусловлена уже поворотом не самой молекулы, а имеющихся в ней полярных радикалов по отношению к молекуле. Таковую поляризацию называют также **дипольно-радикальной**. Примером вещества с этим видом поляризации является целлюлоза, полярность которой объясняется наличием гидроксильных групп –ОН и кислорода.

Ионно-релаксационная поляризация ($C_{ир}$, $r_{ир}$) наблюдается в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов, например в неорганических стёклах, и связана с необратимой потерей энергии. В этом случае на фоне хаотических тепловых движений слабо связанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля получают избыточные перебросы в направлении поля и смещаются на расстояния, превышающие постоянную решётки. После снятия поля ионы постепенно возвращаются к центрам равновесия.

Электронно-релаксационная поляризация ($C_{эр}$, $r_{эр}$) возникает за счёт возбуждения тепловой энергией избыточных «дефектных» электронов или дырок. Она характерна для диэлектриков, приближающихся по свойствам к полупроводникам. Для этого механизма следует отметить относительно высокую способность к поляризации, а также наличие максимума при определённой температуре.

Резонансная поляризация ($C_{рез}$, $r_{рез}$) наблюдается в диэлектриках при световых частотах. Она зависит от физико-химических особенностей вещества, может относиться к собственной частоте электронов или ионов (при очень высоких частотах) или к характеристической частоте дефектных электронов (при более низких частотах). Резонансные потери наблюдаются в газах и твёрдых телах, если частота электрического поля совпадает с частотой собственных колебаний

частиц. Они выражаются в интенсивном поглощении энергии электромагнитного поля и используются для накачки лазеров.

Миграционная поляризация (C_m, r_m) является дополнительным механизмом поляризации, проявляющимся в твёрдых телах неоднородной структуры при наличии в них проводящих и полупроводящих вкраплений. Эта поляризация проявляется при наиболее низких частотах и связана со значительными потерями электрической энергии. Причинами возникновения такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоёв с различной проводимостью и т. д. При внесении неоднородных материалов в электрическое поле свободные электроны и ионы проводящих и полупроводящих включений перемещаются в пределах каждого включения, которое становится подобным огромной поляризованной молекуле. В граничных слоях слоистых материалов и в приэлектродных слоях может быть накопление зарядов медленно движущихся ионов, что создает эффект миграционной поляризации.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация ($C_{сп}, r_{сп}$) существует у группы твёрдых диэлектриков, обладающих такими же особенностями поляризации, как и сегнетова соль ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), а потому получивших название **сегнетоэлектриков**. У сегнетоэлектриков наблюдается доменная структура, а зависимость заряда от напряжения (кулонвольтовая характеристика) имеет форму петли гистерезиса (подробнее см. разд. 2).

Резистор $R_{и}$ соответствует потерям на **ионизацию**, происходящую при коронных разрядах и также в газовых включениях внутри жидких и твёрдых диэлектриков.

1.3 Диэлектрическая проницаемость материала и угол потерь

Эквивалентная схема замещения диэлектрика, в котором существуют различные механизмы поляризации, представлена на рисунке 1.1, б в виде соединённых параллельно конденсатора C и резистора R .

Способность различных материалов поляризоваться в электрическом поле складывается из различных механизмов и характеризуется значением **относительной диэлектрической проницаемости**

$$\varepsilon = C / C_0,$$

где C – ёмкость конденсатора, заполненного диэлектриком;

C_0 – ёмкость конденсатора того же размера в вакууме.

Диэлектрическая проницаемость материала ϵ формируется за счёт различных механизмов поляризации и зависит от температуры и частоты, её изменение при нагреве характеризуется **температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости ТК ϵ** , измеряемым в K^{-1} (в долях на градус Кельвина). Для газов, неполярных жидкостей и твёрдых диэлектриков характерен отрицательный ТК ϵ , что объясняется их расширением при нагреве. Для полярных жидких и твёрдых изоляционных материалов характерен положительный ТК ϵ , т. к. подвижность диполей при нагреве увеличивается, однако возможны и участки с отрицательным ТК ϵ . Численные значения ТК ϵ для большинства изоляционных материалов находятся в пределах от миллионных до тысячных долей на кельвин.

Диэлектрическими потерями называют энергию электрического поля, затрачиваемую на нагрев диэлектрика. При переменном напряжении потери энергии в диэлектрике намного больше, чем при постоянном, здесь основной причиной нагрева является периодическое изменение поляризации диэлектрика. Если напряжения и токи синусоидальны, то их можно представить в виде проекций на вертикальную ось векторов, вращающихся против часовой стрелки с угловой частотой ω (радиан в секунду, s^{-1})

$$\omega = 2 \pi f,$$

где f – частота колебания, Гц.

Рисунок 4.1, *в* является векторной диаграммой, а точки проекции концов векторов на вертикальную ось координат описывают осциллограммы на ленте, протягиваемой в горизонтальном направлении.

Протекание синусоидального тока через конденсатор сопровождается его периодической перезарядкой. В идеальном конденсаторе C напряжение отстаёт от тока на четверть периода, т. е. на 90° (электрических). На векторной диаграмме рисунка вектор ёмкостного тока, равного $U\omega C$, повернут относительно напряжения U на 90° против часовой стрелки, т. е. в сторону опережения. В реальном диэлектрике угол ϕ сдвига фаз между током и напряжением немного меньше, т. к. присутствует ток утечки через сопротивление R изоляции, равный U/R и совпадающий по фазе с напряжением U . **Углом потерь** энергии в материале диэлектрика называют угол δ , дополняющий угол сдвига фаз ϕ между напряжением и током до 90° . Для оценки качества изоляционного материала используют **тангенс угла**

диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. Значение тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ показывает, какая часть от энергии, запасаемой в изоляционном материале в процессе поляризации, теряется, т. е. расходуется на его нагрев. Чем меньше угол δ и его тангенс, тем меньше энергии теряется за 1 цикл переполаризации, следовательно, такой материал можно применять при более высокой частоте.

Потери энергии конденсатора вызывают его нагрев и могут привести к тепловому разрушению. Если конденсатор используется в колебательном контуре, то потери препятствуют острой настройке на резонанс. Они проявляются через снижение добротности контура и ускоренное затухание колебаний. Потери в изоляции проводов линий связи уменьшают дальность передачи сигналов. Оценка диэлектрических потерь имеет важное значение не только для высокочастотных устройств, но и для материалов, используемых в установках высокого напряжения. Особенно она важна в высоковольтных высокочастотных устройствах, поскольку мощность диэлектрических потерь пропорциональна квадрату действующего значения приложенного к диэлектрику напряжения. Мощность потерь в изоляции P , Вт,

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta,$$

где ω – угловая частота, с^{-1} ;

C – эквивалентная ёмкость изоляции, Ф;

U – действующее значение напряжения, В;

δ – угол диэлектрических потерь, $\operatorname{tg} \delta = 1/(R\omega C)$;

R – эквивалентное сопротивление изоляции, Ом.

Следует помнить, что параметры C и R схемы замещения определяются при определённых значениях частоты тока и температуры изоляции, и при других режимах будут иными.

Мощность потерь, отнесенную к единице объёма диэлектрика, называют удельными потерями и измеряют в ваттах на кубометр.

Характер проявления диэлектрических потерь различен в зависимости от агрегатного состояния электроизоляционных материалов: газообразного, жидкого, твёрдого.

В газах наблюдаются **ионизационные** потери при высоких напряжениях и, чаще всего, в неоднородном поле, когда напряжённость в отдельных местах превосходит некоторое критическое значение в газе. Ионизация воздуха в порах твёрдой органической изо-

ляции сопровождается образованием озона и оксидов азота, что вызывает её химическое разрушение.

В чистых **неполярных жидкостях** диэлектрические потери обусловлены только **электропроводностью** и пренебрежимо малы. У хорошо очищенного нефтяного трансформаторного масла $\operatorname{tg} \delta = 0,001$ при $\varepsilon = 2,3$.

В **полярных жидкостях** потери в основном поляризационные. Удельная электропроводность полярных жидкостей при комнатной температуре составляет 10^{-10} – 10^{-11} См/м, а дипольно-релаксационные потери, наблюдаемые при переменном напряжении, значительно превосходят потери от электропроводности, ввиду чего полярные жидкости используют только на промышленной частоте.

В **твёрдых веществах**, в зависимости от их состава и строения, возможны все виды диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери в особо чистых **неполярных** веществах с молекулярной структурой ничтожно малы. Полиэтилен, фторопласт, полистирол и другие полимеры широко применяют в качестве высокочастотной изоляции, в том числе и высоковольтной.

Полярные полимеры – поливинилхлорид, эпоксидные компаунды, кремнийорганические и фенолформальдегидные смолы, целлюлоза и другие из-за дипольно-релаксационной поляризации отличаются повышенными потерями и применяются в основном на промышленной частоте 50 Гц.

Диэлектрические потери в веществах с **ионной** структурой зависят от особенностей упаковки ионов в кристаллической решётке.

В веществах с плотной упаковкой ионов в отсутствие примесей, искажающих решётку, диэлектрические потери весьма малы. При повышенных температурах в этих веществах обнаруживаются потери на электропроводность. К веществам данного типа относятся слюда и другие кристаллические неорганические соединения, имеющие большое значение в производстве электротехнической керамики, например, корунд, входящий в состав ультрафарфора.

К диэлектрикам, имеющим кристаллическую структуру с неплотной упаковкой ионов, относится ряд кристаллических веществ, характеризующихся релаксационной поляризацией, вызывающей повышенные диэлектрические потери. Многие из них входят в состав изоляторного фарфора и огнеупорной керамики.

Диэлектрические потери в квазиаморфных веществах с ионной структурой (неорганических стёклах) в большой степени зависят от их состава ($\text{tg}\delta$ от 0,0002 до 0,01). При совпадении частоты напряжения с частотой колебаний ионов происходят резонансные потери.

Сегнетоэлектрики переполяризуются по петле гистерезиса, поэтому для них характерны весьма большие значения тангенса угла диэлектрических потерь, достигающие 0,1.

1.4 Пробой изоляции и электрическая прочность диэлектрика

Находясь в электрическом поле, диэлектрик может потерять свойства изоляционного материала, если напряжённость поля превысит некоторое критическое значение. Явление образования проводящего канала под действием электрического поля называют **пробоём**. Если произошел пробой газовой изоляции, то благодаря высокой подвижности молекул пробитый участок после снятия напряжения восстанавливается. Жидкий диэлектрик также может восстановить свои изоляционные свойства, но частично, так как загрязняется из-за распада части молекул. Пробой твёрдых диэлектриков приводит к необратимому разрушению изоляции.

Значение напряжения, приводящего к пробую изоляции, называют **пробивным напряжением** $U_{\text{пр}}$. Значение пробивного напряжения зависит от толщины диэлектрика h и формы изоляционной детали, а также конфигурации электродов и параметров приложенного напряжения – полярности, частоты, амплитуды. Поэтому оно характеризует не столько свойства материала, сколько способность конкретного изоляционного изделия противостоять воздействию конкретного электрического поля. Характеристикой самих материалов, удобной для их сравнения, является электрическая прочность. **Электрической прочностью** называют напряжённость $E_{\text{пр}}$, соответствующую пробивному напряжению $U_{\text{пр}}$ в однородном электрическом поле. Однородным называют поле, в каждой точке которого напряжённость имеет одно и то же значение и направление. Однородное поле может быть получено между плоскими электродами с закруглёнными краями, а также между сферами, если расстояние между ними не превышает их диаметра. Электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ измеряется в вольтах, делённых на метр,

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/h,$$

где $U_{пр}$ – пробивное напряжение;
 h – расстояние между электродами.

На практике используют единицу измерения $\text{kВ/мм} = \text{МВ/м}$.

По механизму нарушения изоляции различают **электрический**, **электротепловой** и **электрохимический** пробой.

Электрический пробой происходит в результате развития процессов **ударной** и **фотонной** ионизации материала диэлектрика. Этот процесс характерен для газов, однако его можно наблюдать в особо чистых неполярных жидкостях и твёрдых веществах.

Причиной **теплого пробоя** является разогрев материала из-за диэлектрических потерь. Он характерен для полярных жидкостей и твёрдых материалов с неплотной упаковкой атомов, содержащих подвижные ионы или группы ионов.

Однако, чаще всего, причиной выхода изоляции из строя является **электрохимический пробой**, происходящий в результате её старения – постепенного необратимого ухудшения свойств из-за различных химических реакций, особенно вызванных воздействием высокого напряжения.

1.5 Электрический пробой газа в однородном поле

Пробой газа в однородном поле происходит в результате развития стримера путём ударной и фотонной ионизации (рисунок 1.2.)

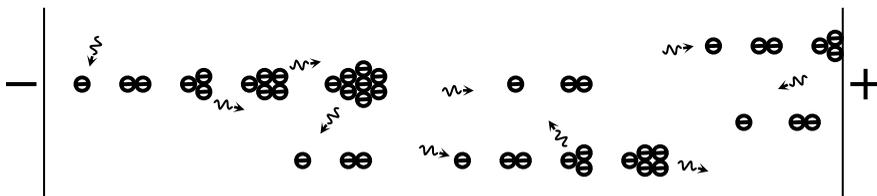


Рисунок 1.2 – Фотонно-ударный механизм развития стримера при лавинном пробое газа в однородном электрическом поле

Небольшое количество свободных электронов образуется в газе под действием солнечных и космических излучений либо радиоактивного излучения Земли. Содержащиеся в газе электроны находятся в беспорядочном тепловом движении. При воздействии напряжённости электрического поля электрон начинает двигаться с ускорением, приобретая дополнительную энергию. Дополнительная энергия элек-

трона сообщается атомам или молекулам газа, с которыми он сталкивается. Если энергия достаточно велика, при столкновении электрона с атомом происходит его ионизация, т. е. расщепление на электрон и положительный ион. Значения энергии ионизации различных газов лежат в пределах от 4 до 25 эВ. В результате ударной ионизации число свободных электронов и ионов лавинообразно нарастает.

Если в процессе ускорения электрон не смог набрать энергию, достаточную для ионизации атома, он переводит атом в возбужденное состояние, изменяя структуру его электронной оболочки. В следующий момент этот «возбужденный» атом возвращается в спокойное состояние, отдавая свою избыточную энергию в форме излучения – испускает фотон. Заметим, что направление движения испускаемых фотонов не зависит от электрического поля, а скорость близка к скорости света. При поглощении фотона другим атомом возможна его ионизация. Внутренняя фотонная ионизация газа, благодаря большой скорости распространения излучения, приводит к особо быстрому развитию стримеров – каналов с повышенной проводимостью газа. Схема, представленная на рисунке 1.2, поясняет, почему рост электропроводящего канала (стримера) происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины. Волнистыми линиями изображены пути фотонов. Фотоны обгоняют лавину и ионизируют частицы газа. Зарождается новая лавина. Нагоняя друг друга, отдельные лавины сливаются в сплошной канал ионизированного газа.

Экспериментально установлен **закон Пашена** – зависимость пробивного напряжения от $p \times h$ (произведения давления p на расстояние между электродами h). График этой зависимости изображён на рисунке 1.3, *а*.

На графике виден явно выраженный минимум и две восходящие ветви. Анализируя закон Пашена, следует отметить, что минимальное напряжение, при котором может произойти пробой воздуха, составляет около 300 В.

Разделим обе координаты на h и получим зависимость электрической прочности $E_{пр}$ от давления p при неизменном расстоянии между электродами, изображённую на рисунке 1.3, *б*. При увеличении давления электрическая прочность газа возрастает в результате уменьшения расстояния между молекулами и, соответственно, длины свободного пробега электронов. При малых давлениях увеличение электрической прочности объясняется уменьшением вероятности столк-

новения электронов с молекулами газа на их пути к положительному электроду.

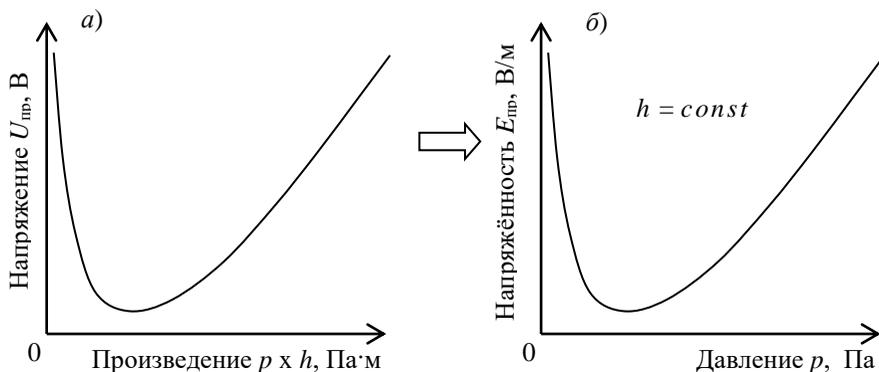


Рисунок 1.3 – Закон Пашена (а) и зависимость электрической прочности от давления (б)

Из графиков следует два вывода:

1 При проектировании высоковольтного оборудования следует учитывать толщину возможных разрядных промежутков.

2 Для увеличения электрической прочности газовой изоляции следует либо откачивать газы до вакуума, либо сжимать их повышенным давлением.

При нормальном давлении 1 см воздуха пробивается при напряжении около 30 кВ, что можно использовать для проверки наличия высокого напряжения, например в телевизорах и мониторах с электронно-лучевыми трубками.

Электрическая прочность газа зависит от его химического состава. Особо высокая электрическая прочность у тяжелых газов, содержащих фтор и хлор. Во внешней электронной оболочке галогенов не хватает всего одного электрона, и они легко захватывают свободный электрон, выключая его из процесса ионизации. Инертные газы обладают пониженной электрической прочностью, что используется при образовании плазмы в газоразрядных приборах. Ещё меньше электрическая прочность паров металлов, из которых наибольшее техническое применение нашли пары ртути и натрия.

1.6 Особенности пробоя газа в неоднородном поле

Пробой газа в неоднородном поле происходит при меньшем напряжении, чем в однородном. Для исследования этого процесса используют поле между остриём и плоскостью. Зависимость пробивного напряжения от расстояния при различной полярности электродов показана на рисунке 1.4. Вблизи острия напряжённость поля выше, чем на удалении, и если она достигает критических значений, на острие возникает **частичный разряд (ЧР)**, сопровождаемый свечением и негромким звуком. Свечение на концах мачт в грозу назвали «огнями святого Эльма», это же явление можно наблюдать на острых шпилях зданий и громоотводах.

Частичным разряд называют потому, что вдали от острия условия ударной ионизации не соблюдаются, и пробоя не происходит. Однако фотонная ионизация происходит во всём объеме разрядного промежутка, что приводит к значительному уменьшению пробивного напряжения, особенно при положительной полярности острия.

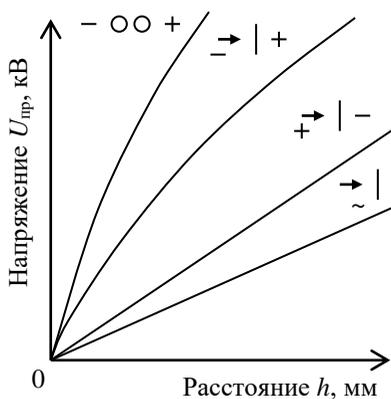


Рисунок 1.4 – Пробой газа в неоднородном поле

В результате ионизации вблизи острия образуются электроны и ионы. При положительной полярности острия электроны быстро нейтрализуются на нём, а малоподвижные положительно заряженные ионы создают объёмный заряд, который фактически является продолжением острия и сокращает эффективную длину разрядного промежутка. При отрицательной полярности острия объёмный положительный заряд играет роль экрана, сглаживающего неоднородности поля в разрядном промежутке.

При возрастании напряжения в неоднородном поле вначале возникает частичный разряд вблизи острия. По мере увеличения напряжения корона переходит в искровой разряд.

О вреде частичных разрядов:

- 1 Уменьшают напряжение пробоя изоляционного промежутка.

2 При ЧР образуются активные газы, разрушающие изоляцию.

Под действием этих газов, особенно озона, в присутствии воды в твёрдой изоляции развиваются **водяные дендриты (водные триинги)**, прорастающие вглубь материала подобно корням деревьев, что со временем приводит к пробое изоляции.

3 Электрическая энергия ЧР переходит в тепловую и световую.

4 Частичные разряды являются источником радиопомех.

Искусство проектировщика высоковольтного оборудования – сгладить неоднородности поля, чтобы не было частичных разрядов.

Поверхностный пробой (перекрытие изоляции) можно наблюдать при испытании и эксплуатации твёрдых диэлектриков с высокой электрической прочностью. В случае поверхностного пробоя структура твёрдого диэлектрика не нарушается, однако пробивное напряжение вдоль поверхности твёрдого диэлектрика значительно меньше, чем в воздухе при той же длине разрядного промежутка, особенно при повышенной влажности и загрязнении этой поверхности.

Для предотвращения поверхностного пробоя необходимо по возможности увеличивать длину разрядного пути вдоль поверхности твёрдого диэлектрика. Этому способствует создание ребристой поверхности изоляторов, проточка разного рода канавок, изготовление конструкций с «утопленными» электродами. Повышение рабочих напряжений достигается также сглаживанием неоднородностей электрического поля за счёт изменения формы электродов или оптимизации конструкции изолятора, а также за счёт нанесения на поверхность изолятора полупроводящих покрытий или диэлектрических плёнок с повышенной диэлектрической проницаемостью.

1.7 Изоляционные газы и жидкости

Для высоковольтной изоляции наиболее широкое применение находит **элегаз** (электрический газ, гексафторид серы SF₆). Он инертен по отношению к меди и алюминию, химически стоек до 800 °С. Электрическая прочность элегаза в 2,5 раза больше, чем у воздуха, что позволяет значительно уменьшить объём и массу газонаполненного электрооборудования, по сравнению с воздушным.

Элегаз применяется в герметизированных распределительных устройствах, конденсаторах, трансформаторах, выключателях и высоковольтных кабелях. Газонаполненные (элегазовые) кабели просты

по своей конструкции, имеют малые емкостные (зарядные) токи. Трансформаторы с элегазовым заполнением взрывобезопасны. В высоковольтных выключателях элегаз применяется благодаря его высоким дугогасящим свойствам.

Основные недостатки: опасны разряды в элегазе в присутствии органической изоляции, так как образуются химически очень активные и ядовитые вещества; сравнительно высокая стоимость. В целях удешевления газовой изоляции часто применяют элегаз в смеси с более дешёвым азотом.

Перспективны **перфторированные углеводороды**, в молекулах которых все атомы водорода заменены фтором. От CF_4 до C_4F_{10} в нормальных условиях являются газами с электрической прочностью большей, чем у воздуха в 6–10 раз, а также **фреон** CCl_2F_2 – в 2,5 раза.

Жидкие диэлектрики, благодаря большей плотности, отличаются более высокими значениями электрической прочности, чем газы.

Пробой технически чистых жидкостей объясняют частичным перегревом жидкости и вскипанием её в местах наибольшего количества примесей, что приводит к образованию газового мостика, по которому и происходит пробой.

Наибольшее распространение получило **трансформаторное масло** – жидкость от почти бесцветного до тёмно-жёлтого цвета, представляющая собой смесь различных углеводородов. Получается из нефти посредством её ступенчатой перегонки с последующей тщательной очисткой от химических примесей. Основные области применения трансформаторного масла – силовые маслonaполненные трансформаторы и высоковольтные масляные выключатели.

Заполняя поры волокнистой изоляции, масло существенно повышает её электрическую прочность, улучшает отвод тепла от обмоток и сердечников, а в масляных выключателях способствует гашению электрической дуги, возникающей между расходящимися контактами.

При работе в электрических устройствах масло постепенно ухудшает свои характеристики (старее), становится более тёмным. В нём образуются загрязняющие продукты – кислоты, смолы как растворимые в масле, так и не растворимые – “ил”, который осаждаётся на дно бака и на погруженные в масло детали, значительно ухудшая отвод тепла. Кроме того, образующиеся кислоты разрушают изоляцию обмоток и вызывают коррозию металлов.

Скорость старения масла возрастает при доступе воздуха (окисление кислородом, озоном), повышении температуры, соприкосновении масла с некоторыми металлами (медь, железо, свинец и т. д.), воздействии света и электрического поля высокой напряжённости, а особенно под воздействием дуги.

Регенерация масла, т. е. удаление из масла продуктов старения, осуществляется обработкой его адсорбентами (особые типы глин или искусственные материалы), поглощающими влагу и примеси полярного характера. Для замедления старения масла применяются воздухоочистительные фильтры, ингибиторы (антиокислительные присадки), используется азотная защита и т. д. Для удаления влаги производят термическую сушку трансформаторного масла.

По своим электрическим характеристикам хорошо очищенное от примесей и влаги трансформаторное масло имеет свойства неполярного диэлектрика: $\epsilon = 2,2 \dots 2,3$; $\operatorname{tg} \delta \leq 0,003$; $\rho = 10^{12} \dots 10^{13}$ Ом·м (характеристики приведены для $t = 20$ °С и $f = 50$ Гц).

Практически важные свойства трансформаторного масла нормируются стандартом ГОСТ 982 – 80. К ним относятся: кинематическая вязкость, температура вспышки паров, температура застывания и кислотное число. Электрическая прочность трансформаторного масла стандартом не нормируется, но предусматривается правилами технической эксплуатации электростанций (ПТЭ).

Недостатком трансформаторного масла является его горючесть.

Конденсаторное масло служит для пропитки бумажных конденсаторов и отличается особо тщательной очисткой адсорбентами.

Кабельные масла используются для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей. Для увеличения вязкости в них добавляют какинофоль или синтетический загуститель.

Полиизобутилен низкой степени полимеризации отличается от нефтяных масел лучшими диэлектрическими свойствами, используется в бумажных конденсаторах и для пропитки бумажной изоляции кабелей (нестекающая изоляция).

Совол ($C_{12}H_5Cl_5$) представитель хлорированных углеводородов. Полярный диэлектрик с $\epsilon = 4,5 \dots 5$, применяется для пропитки изоляции бумажных конденсаторов. Совол не горюч, химически нейтрален ко всем видам изоляции и не окисляется на воздухе даже при небольшом нагреве. Однако из-за возможности образования токсичных

соединений при высокой температуре хлорированные углеводороды в технически передовых странах выводят из употребления.

Кремнийорганические жидкости нетоксичны, не гигроскопичны, нагревостойки. Применяются для пропитки конденсаторов, заливки маломощных трансформаторов и других устройств. Основу любого кремнийорганического диэлектрика составляет силоксановая цепь атомов – Si – O – Si – O – Si –. Кремнийорганические жидкости по своим электрическим характеристикам приближаются к неполярным диэлектрикам $\epsilon = 2,4...2,5$; $\text{tg}\delta = (2 \dots 3) \cdot 10^{-4}$; $\rho = 10^{11}... 10^{12}$ Ом·м; $U_{\text{пр}} \geq 45$ кВ (в стандартном разряднике при расстоянии между электродами 2,5 мм). Температура вспышки паров кремнийорганических жидкостей нормируется не ниже 300 °С, при более высоких температурах эти жидкости самовоспламеняются. Как и другие кремнийорганические диэлектрики, эти жидкости весьма дорогие.

Фторорганические жидкости имеют высокие электрические характеристики, ничтожно малую гигроскопичность и высокую нагревостойкость (200 °С и выше), очень высокую химическую стойкость, негорючи, дугостойки, взрывобезопасны. Обеспечивают интенсивный отвод тепла от обмоток и магнитопроводов, особенно в режиме «кипящей изоляции». Очень дорогие.

1.8 Особенности пробоя твёрдой изоляции

У **твёрдых** диэлектриков могут наблюдаться три основных механизма пробоя: 1) электрический; 2) тепловой; 3) электрохимический. Каждый из указанных механизмов пробоя может иметь место в одном и том же материале в зависимости от характера электрического поля, в котором он находится, – постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты; времени воздействия напряжения; наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор; толщины материала; условий охлаждения и т. д.

Электрический пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих начальных электронов в твёрдом теле создается электронная лавина. Развитие лавин сопровождается фотоионизацией (как в газах), которая ускоряет образование проводящего канала. Ускоренные полем электроны при столкновениях передают свою энергию узлам решётки и разогревают её вплоть до плавления. В разрядном канале создается значительное

давление, которое может привести к появлению трещин или полному разрушению изолятора. Электрический пробой имеет место там, где исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, нагревающих материал, а также отсутствует ионизация газовых включений. При этом электрическая прочность $E_{пр}$ может превышать 1000 МВ/м. Электрический пробой наблюдается у большинства диэлектриков при кратком (импульсном) воздействии напряжения.

Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество тепловой энергии, выделяющейся в диэлектрике за счёт диэлектрических потерь, превышает то количество энергии, которое может рассеиваться в данных условиях; при этом нарушается тепловое равновесие и процесс приобретает необратимый характер. Явление теплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих расплавлению, обугливанию и пр. Электрическая прочность при тепловом пробое является характеристикой не только материала, но и изделия из него.

Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с частотой напряжения, условиями охлаждения, температурой окружающей среды и др. Кроме того, «электротепловое» пробивное напряжение зависит от нагревостойкости материала; органические диэлектрики (например, полистирол) имеют более низкие значения электротепловых пробивных напряжений, чем неорганические (кварц, керамика) при прочих равных условиях вследствие их малой нагревостойкости. Типичными признаками теплового пробоя являются уменьшение пробивного напряжения по экспоненте с ростом температуры, а также временная задержка пробоя.

Разновидностью теплового пробоя можно считать **ионизационный** пробой. Он характерен для твёрдых пористых диэлектриков, обусловлен ионизацией газа в порах и особенно опасен в хрупких материалах, поскольку термомеханические напряжения могут преодолеть предел прочности материала и вызвать его растрескивание.

Тонкие плёнки обладают существенно более высокой электрической прочностью, чем массивные образцы благодаря упорядоченной структуре и лучшему охлаждению.

Электрохимический пробой электротехнических материалов наблюдается при повышенных температурах и высокой влажности.

При постоянном и переменном напряжении низкой частоты в материале развиваются процессы, приводящие к необратимому умень-

шению сопротивления изоляции (электрохимическое старение). Кроме того, электрохимический пробой можно наблюдать при высоких частотах, если в закрытых порах материала происходит ионизация газа, сопровождающаяся нагревом и восстановлением, например в керамике, оксидов металлов переменной валентности. Электрохимический пробой развивается во многих органических диэлектриках, особенно под действием частичных разрядов (см. выше). Частичные разряды (ЧР) происходят в местах наибольшей напряжённости электрического поля, там, где наблюдается его неоднородность. Разрушение изоляции происходит в виде специфических дефектов, которые раньше называли водяными дендритами (гр. *dendron* – дерево), а теперь используют термин водные триинги (англ. *tree* – дерево). Дендрит прорастает в изоляционный слой подобно корням дерева, при этом постепенно увеличивается мощность разряда, а эффективная толщина изоляции уменьшается, что, в конце концов, приводит к пробую. Процессы прорастания дендритов длятся годами и десятилетиями, современный уровень развития техники позволяет их контролировать, прогнозируя момент выхода электрооборудования из строя и оценивая остаточный ресурс службы.

1.9 Получение и применение полимеров

Полимерами называют высокомолекулярные соединения, молекулы которых состоят из большого числа структурно повторяющихся звеньев – мономеров. Молекулярная масса полимеров достигает 10^6 . Полимеризацией называют образование полимера из мономеров путём последовательного соединения мономеров в присутствии инициаторов.

Рассмотрим в качестве примера процесс полимеризации этилена $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ с молекулярной массой 28, который в нормальных условиях находится в газообразном состоянии. Структурную формулу **полиэтилена** можно записать в виде $[-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 -]_n$, где n – степень полимеризации, т. е. число молекул мономера, объединяющихся в молекулу полимера. По мере увеличения n полиэтилен становится все более вязкой жидкостью, а при $n = 1250$ и молекулярной массе 35000 представляет собой твёрдый диэлектрик.

В реальных условиях полимерные материалы – это смеси веществ с различной степенью полимеризации, так что практически

можно говорить лишь о средней степени полимеризации. К числу веществ, получаемых путём полимеризации, относятся полистирол, поливинилхлорид, полиизобутилен и полиметилметакрилат и др.

Высокомолекулярные соединения могут быть получены также путём реакции поликонденсации, связанной с взаимодействием функциональных групп мономеров с одновременным выделением воды или других низкомолекулярных веществ.

Полимерные материалы, полученные путём поликонденсации, как правило, обладают пониженными электрическими свойствами по сравнению с материалами, полученными по реакции полимеризации. Основной причиной этого является наличие в поликонденсационных диэлектриках остатков побочных низкомолекулярных веществ (воды, кислот, спирта), которые, распадаясь на ионы, увеличивают проводимость материала. Кроме того, молекулы конденсационных полимеров содержат полярные группы, что повышает их угол диэлектрических потерь и гигроскопичность.

Линейные и пространственные полимеры. В зависимости от пространственной структуры макромолекул полимеры делят на три основных типа – линейные, разветвлённые и пространственные. В линейных полимерах макромолекулы представляют собой цепочечные последовательности повторяющихся звеньев. При этом отношение длины молекулы к её поперечным размерам может достигать 1000.

В пространственных полимерах макромолекулы связаны в общую сетку. Типичными пространственными полимерами являются фенолоформальдегидные и эпоксидные смолы, а также сильно вулканизированный каучук (эбонит, эскапон).

Между свойствами линейных и пространственных полимеров имеются существенные различия. Как правило, линейные полимеры сравнительно гибки и эластичны, большинство из них при умеренном повышении температуры легко размягчается и расплавляется. Пространственные полимеры наоборот обладают большой жесткостью, их расплавление происходит при высоких температурах, а многие из них до достижения температуры плавления разрушаются химически (сгорают, обугливаются и т. п.). В связи с этими свойствами линейные полимеры в практике называют термопластичными материалами, а пространственные – терморективными.

Благодаря слабому межмолекулярному взаимодействию линейные полимеры в большинстве случаев обладают способностью набухать и растворяться в подходящих по составу растворителях с обра-

зованием вязких растворов, из которых затем получают прочные плёнки и волокна. Пространственные полимеры с трудом поддаются растворению, а значительная часть из них нерастворима.

Полимеры с гибкими макромолекулами регулярного строения обладают способностью образовывать кристаллическую фазу, которая характеризуется упорядоченным расположением молекул. В кристалле полимера макромолекулы плотно упакованы и им трудно проявлять свою гибкость. Такие полимеры обычно являются жесткими материалами с высокой прочностью.

Аморфные полимеры характеризуются отсутствием дальнего порядка в расположении макромолекул, хотя и в этом случае полимеры не являются полностью неупорядоченными.

Состав полимерных цепей. По химическому составу полимеры можно разделить на органические и элементоорганические. К органическим полимерам относят такие высокомолекулярные соединения, у которых главная цепь состоит из углерода или комбинации углерода с кислородом, азотом, серой и фосфором.

Элементоорганическими называют такие полимеры, главная цепь которых не содержит атомов углерода, но обрамляется органическими группами. Наиболее распространёнными представителями этих материалов являются кремнийорганические соединения (силиконы).

Электрические свойства. Строение макромолекул во многом определяет электрические свойства полимеров. Все химические связи углерода с другими элементами в той или иной степени полярны. Если молекула имеет симметричное строение, то дипольные моменты отдельных связей уравниваются друг друга, благодаря чему в целом вещество практически неполярно, гигроскопичность его ничтожно мала и поэтому оно имеет малое значение тангенса угла диэлектрических потерь и низкую удельную проводимость. Вещества с несимметрично построенными звеньями полимерных молекул полярны и обладают невысокими электрическими характеристиками.

Нагревостойкость. Большинство органических полимеров может длительно работать лишь при температурах ниже 100 °С. Выше этой температуры, как правило, происходит быстрое тепловое старение материала. Поэтому основной проблемой химии высокомолекулярных соединений всегда было создание более нагревостойких материалов при сохранении у них гибкости, эластичности и других свойств, характерных для органических веществ. В настоящее время

промышленностью производятся и весьма нагревостойкие высокомолекулярные материалы, например, фторсодержащие полимеры, кремнийорганические соединения, полиимиды.

1.10 Неполярные полимеры

Из неполярных полимеров наиболее важное техническое значение имеют полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен (фторопласт-4).

Полиэтилен – основной полимерный материал для высококачественной и высоковольтной изоляции. Применяя различные катализаторы, получают полиэтилены высокого, среднего и низкого давления, отличающиеся друг от друга степенью кристалличности и механической прочностью. В последнее время всё шире применяется изоляция из сшитого полиэтилена. Сшивание линейных молекул полиэтилена в пространственную структуру происходит при радиоактивном облучении и повышает механическую прочность и нагревостойкость.

Полипропилен обладает большей механической и электрической прочностью, а также нагревостойкостью.

Полистирол получают из мономера стирола $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{C}_6\text{H}_5$, который представляет собой легкую бесцветную синтетическую жидкость с характерным запахом.

Стирол легко полимеризуется даже при хранении на холоде. В темноте и при отсутствии катализаторов он постепенно превращается в твёрдую, прозрачную и бесцветную, как стекло, массу. В ряде случаев у изделий из полистирола намечается тенденция к постепенному образованию тончайших трещин. Чтобы предотвратить это явление и уменьшить хрупкость полистирола, к нему иногда добавляют некоторые виды синтетических каучуков.

Основные свойства неполярных диэлектриков приведены в таблице 1.1.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт-4, тефлон) получают путём полимеризации тетрафторэтилена $\text{F}_2\text{C} = \text{CF}_2$ (этилен, в молекуле которого все четыре атома водорода замещены атомами фтора).

Среди всех органических полимеров ПТФЭ выделяется высокой нагревостойкостью (около 300 °С) и очень высокой стойкостью к действию химических реагентов. Так, на него совершенно не дей-

ствуют серная, соляная, азотная и плавиковая кислоты, щелочи и т. п. По стойкости к химически активным веществам ПТФЭ превосходит золото и платину. Он негорюч, не растворяется ни в одном из известных растворителей, практически негигроскопичен и не смачивается водой и другими жидкостями.

Таблица 1.1 – Основные свойства неполярных полимеров

Свойства полимеров	Полиэтилен	Полистирол	Фторопласт-4
Удельное объёмное сопротивление, Ом·м	$10^{14} - 10^{16}$	$10^{14} - 10^{16}$	$10^{14} - 10^{16}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	2,3 – 2,4	2,5 – 2,6	1,9 – 2,2
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 Гц	$2 - 5 \cdot 10^{-4}$	$2 - 4 \cdot 10^{-4}$	$2 - 3 \cdot 10^{-4}$
Электрическая прочность, МВ/м	40 – 150*	20 – 110*	40 – 250*
Нагревостойкость, °С	105...130	75...80	~300
*Верхние пределы для материалов в виде плёнки.			

Высокие нагревостойкость и химическую стойкость политетрафторэтилена по сравнению с углеводородами можно объяснить тем, что атомы фтора более крупные, чем атомы водорода. Поэтому они экранируют углеродный скелет молекулы от внешнего воздействия. Сама оболочка из атомов фтора также проявляет инертность по отношению к внешним воздействиям из-за большой энергии связи фтора с углеродом.

При нагревании до температуры 415 °С ПТФЭ разлагается с выделением ядовитого газа – фтора. Но даже при этой температуре полимер не переходит в вязкотекучее состояние. Поэтому обычные методы формовки термопластичных масс для ПТФЭ непригодны. Он перерабатывается в изделия методом спекания. Предварительно из порошка формуют изделие путём прессования, а затем проводят спекание при температуре от 360 до 380 °С.

Благодаря малым потерям неполярные полимеры широко применяют в технике высоких и сверхвысоких частот.

Полиэтилен используют в качестве изоляции и оболочек телефонных, телевизионных и высоковольтных силовых кабелей. Полистирол и фторопласт используют как высокочастотные конструкционные материалы. Тонкие плёнки из полипропилена, полистирола и

политетрафторэтилена применяют для изготовления высокочастотных конденсаторов и кабелей. Ценным свойством таких плёнок является высокая электрическая прочность (200–250 МВ/м). Ударопрочный полистирол используют для изготовления корпусов электронных устройств.

1.11 Полярные полимеры

У полярных линейных полимеров из-за асимметрии строения молекул сильно выражена дипольно-релаксационная поляризация. Поэтому они обладают пониженными электроизоляционными свойствами по сравнению с неполярными полимерами, особенно на высоких частотах. Наиболее распространёнными материалами этой группы являются поливинилхлорид, полиэтилентерефталат (лавсан), полиметилметакрилат (органическое стекло) и полиамиды.

Изоляционные свойства полярных линейных полимеров можно охарактеризовать следующими усредненными параметрами:

- диэлектрическая проницаемость – от 3 до 6;
- удельное объёмное сопротивление от 10^{11} до 10^{14} Ом·м;
- $\text{tg}\delta$ на частоте 10^6 Гц – от 0,01 до 0,06;
- электрическая прочность – от 15 до 50 МВ/м.

Поливинилхлорид (ПВХ) – твёрдый продукт полимеризации газа винилхлорида $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{Cl}$, представляющего собой этилен, в молекуле которого один атом водорода замещен атомом хлора.

Благодаря сильным межмолекулярным взаимодействиям поливинилхлорид является материалом жестким и негибким. Для придания эластичности к ПВХ добавляют пластификаторы – органические полярные жидкости с высокой точкой кипения. Введение полярного пластификатора ухудшает электрические свойства полимера.

Полиэтилентерефталат (лавсан) – это термопластичный полимер, полученный из этиленгликоля и терефталевой кислоты. Он обладает значительной механической прочностью и достаточно высокой температурой размягчения.

Этот полярный диэлектрик применяют в виде волокон и плёнок.

Полиметилметакрилат (органическое стекло, плексиглас) при действии электрической дуги выделяет газы, помогающие её гашению.

Полиамиды отличаются особой прочностью и эластичностью. Особенно известен капрон, применяемый в виде волокон, тканей и литых изделий.

Поликарбонаты – особо прочные, твёрдые и прозрачные – применяют как основу лазерных и винчестерных дисков.

Полярные полимеры, по сравнению с неполярными, характеризуются примерно на два порядка большими потерями и проводимостью. Поэтому они используются как изоляционные и конструкционные материалы в основном на промышленной частоте. На повышенных и высоких частотах (например в технике связи) их применение ограничено из-за повышенного затухания электрических сигналов.

Поливинилхлоридный пластикат получил широкое применение в производстве монтажных проводов и силовых кабелей благодаря гибкости, достаточной прочности и высокой производительности наложения изоляции. Плёнки из лавсана используют в качестве несущей основы при изготовлении ленты и дискет для магнитной записи, а также для межслойной изоляции в обмотках трансформаторов и дросселей, рассчитанных на рабочую температуру до 150 °С. Конденсаторы из таких плёнок, по сравнению с бумажными, обладают большей рабочей температурой и меньшими размерами. Органическое стекло в основном применяется как декоративный материал в электро- и радиоаппаратуре. Капрон, благодаря хорошим термопластичным свойствам и высокой механической прочности, используют в производстве различных конструкционных деталей радиоаппаратуры (корпусы приборов, ручки и кнопки управления, клавиши переключения диапазонов, каркасы индуктивных катушек и т. п.). На основе полиамидов изготавливают эмальлаки, образующие прочные эластичные диэлектрические покрытия на металлических проводах.

Полимерные плёнки из-за упорядоченного расположения молекул обладают особо хорошими механическими и электрическими свойствами. Плёнки используют как основу магнитных носителей информации, а также для изоляции конденсаторов, обмоток высоковольтных машин, жил кабелей сверхвысокого напряжения и высокочастотных кабелей связи. Многие плёнки чувствительны к надрыву, поэтому наклеиваются на бумажные подложки.

1.12 Волокнистые изоляционные материалы

Большинство применяемых в электротехнике волокнистых материалов состоят из органического полимера – целлюлозы. Это дерево, бумага картон и хлопчатобумажные ткани. Диэлектрическая проницаемость целлюлозы $\epsilon \approx 6,6$; $\text{tg}\delta \approx 0,02$. Кроме целлюлозы в изоляционных целях используются материалы из шёлковых, искусственных, синтетических, стеклянных и асбестовых волокон. Благодаря упорядоченному строению волокно обладает особой прочностью и гибкостью. Общим недостатком волокнистых материалов является большая гигроскопичность. Поэтому в большинстве случаев волокнистая изоляция пропитана жидкими диэлектриками либо совместно с полимерами образует композиционные материалы.

Дерево применяют для изготовления штанг, рукояток, опорных и крепежных деталей масляных трансформаторов, опор линий электропередачи и связи.

Для изготовления электротехнических **бумаг** и **картонов** используют щелочную целлюлозу желтоватого цвета, имеющую большую прочность, чем белая кислотная. Выпускают следующие разновидности бумаг: кабельную – для изоляции жил силовых кабелей, телефонную – для кабелей связи, пропиточную – для изготовления гетинакса, конденсаторную, микалентную – для подложки микаленты. Картоны отличаются от бумаг большей толщиной.

Фибру изготавливают из слоёв бумаги, пропитанной раствором хлористого цинка. Применяют в качестве конструкционного дугогасящего материала.

Текстильные материалы применяют для изоляции обмоточных проводов и шин, а также для изготовления лакотканей и текстолитов.

1.13 Электроизоляционные лаки и компаунды

Лаки это растворы смол, битумов и высыхающих масел в летучих растворителях. При сушке лака растворитель улетучивается, а лаковая основа полимеризуется, образуя лаковую плёнку. По назначению лаки подразделяют на: пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные лаки служат для увеличения электрической и механической прочности, а также теплопроводности волокнистой изоляции. Путём пропитки лаком изготавливают лакоткани и лакобумаги.

Покровные лаки образуют механически прочную, гладкую, влагостойкую изоляционную плёнку на поверхности диэлектрика или металла. В полупроводящие лаки, применяемые для выравнивания электрического поля, добавляют сажу.

Клеящие лаки используют, например, для склеивания между собой листочков расщеплённой слюды при изготовлении миканитов или для приклеивания их к бумажным подложкам микаленты.

По составу различают лаки: бакелитовые, глифталевые, кремнийорганические, поливинилхлоридные, нитроцеллюлозные, масляные, битумные и др.

Компаундами называют смеси различных изоляционных веществ (смола, битумов и т. д.), которые переходят из жидкого состояния в твёрдое при остывании или благодаря вводимым в них отвердителям. В составе компаунда могут быть пластификаторы, наполнители, разбавители и т. д. По назначению компаунды делят на две основные группы: пропиточные и заливочные. Первыми пропитывают волокнистую изоляцию, а вторые используют для заполнения сравнительно больших полостей и промежутков между различными деталями с целью: защиты изоляции от увлажнения; увеличения пробивного напряжения; улучшения отвода тепла; повышения механической прочности.

Различают термопластичные и терморезистивные компаунды.

Термопластичные компаунды размягчаются при нагревании и отвердевают при охлаждении. К их числу относятся битумные компаунды, которые представляют собой сложные смеси углеводородов.

Терморезистивные компаунды необратимо отверждаются в результате химических реакций. Они, как правило, обладают более высокой нагревостойкостью по сравнению с термопластичными компаундами, так как при нагревании уже не размягчаются. Однако заливка терморезистивным компаундом практически исключает возможность ремонта детали или прибора в случае их повреждения. К числу терморезистивных относятся компаунды на основе поли-

эфирных, кремнийорганических и эпоксидных смол. Эпоксидные компаунды обладают малой усадкой при затвердевании, исключительной прочностью и весьма высокими влагозащитными свойствами.

Компаунды широко применяют для пропитки и заливки отдельных узлов электро- и радиоаппаратуры: трансформаторов, дросселей, конденсаторов. Их используют также для герметизации и опрессовки дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Некоторые разновидности эпоксидных компаундов обладают высокой оптической однородностью и прозрачностью к излучению в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, благодаря чему находят применение в качестве корпусов светодиодов.

1.14 Композиционные пластмассы и слоистые пластики

Композиционные пластмассы, предназначенные для изготовления изделий методом горячего прессования или литья под давлением, состоят из связующего вещества – полимера и наполнителей (древесная мука, очесы хлопчатника, каолин, кварцевый песок, асбестовое или стеклянное волокно и т. д.), а также красителей и пластификаторов. Исходное сырье тщательно измельчается и перемешивается. Прессование изделий из пластмасс обычно производят на гидравлических прессах, обеспечивающих создание достаточно большого давления. Если требуется одновременно нагрев и давление, то пластины пресса или сама пресс-форма снабжаются электронагревательным устройством. Изделия из терморепактивных пластмасс формуются путём прессования, для получения изделий из термопластичных пластмасс применяют литье под давлением.

В качестве связующего вещества используют соединения фенола, крезола, анилина, карбамида и меламина с формальдегидом, а также кремнийорганические и другие смолы.

Использование кремнийорганических смол позволяет получить пластмассы с нагревостойкостью 300 °С и более.

На основе различных смол с разными наполнителями выпускают десятки марок порошков для производства деталей радиоэлек-

тронной аппаратуры. Наполнитель удешевляет пластмассу, и в то же время улучшает механические характеристики изделия. В ряде случаев при введении наполнителя (например, кварцевой муки, талька и др.) наблюдается улучшение электрических свойств диэлектриков.

Широкое применение для изготовления изоляционных плат, в том числе и для печатного монтажа, нашли слоистые пластики – гетинакс и текстолит.

Гетинакс изготавливают из слоёв бумаги, пропитанной спиртовым или водно-спиртовым раствором резольной фенолформальдегидной смолы. Пропитанные листы бумаги сушат, собирают в пакеты и прессуют при температуре 150–160 °С, затем охлаждают под давлением. Слоистое строение гетинакса приводит к анизотропии свойств. Вдоль слоёв удельное объёмное сопротивление гетинакса в 50–100 раз, а электрическая прочность в 5–8 раз ниже, чем поперек. Перпендикулярно слоям электрическая прочность составляет около 30 МВ/м, $\epsilon = 6 \dots 7$, а $\text{tg}\delta = 0,04 \dots 0,08$ (на частоте 10^6 Гц). Гетинакс относится к числу сильнополярных диэлектриков, так как волокнистая основа и пропитка обладают полярными свойствами.

Текстолит – слоистый пластик, аналогичный гетинаксу, но при его изготовлении используют хлопчатобумажную ткань, либо ткани из синтетических волокон. Если в качестве наполнителя использовать ткань из стеклянных волокон, то получим материал под названием стеклотекстолит, а если асбест – асботекстолит. Связующим веществом в этих материалах служат эпоксидные или полиэфирные смолы.

Для изготовления печатных плат на гетинакс и текстолит (стеклотекстолит) с одной или с двух сторон приклеивают тонкие слои медной фольги толщиной 0,035–0,05 мм. Требуемый рисунок печатной схемы получают путём её травления в растворе хлорного железа.

1.15 Эластомеры

Эластомеры – это материалы на основе каучука (натурального или синтетического). Чистый каучук практически неполярен, его удельное сопротивление $\rho \approx 10^{14}$, $\varepsilon = 2,4$, $\text{tg}\delta = 0,002$. При добавлении серы и нагревании происходит вулканизация каучука. Если серы 1–3 % получают мягкую резину, если 30 % и более – эбонит. Резины применяют для изоляции гибких проводов, шнуров и кабелей, а также для защитных перчаток, галош, ковриков.

У обычных электроизоляционных резин, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 3 \dots 7$, $\text{tg}\delta = 0,02 \dots 0,1$, $\rho \approx 10^{13}$, $E_{\text{пр}} = 20 \dots 30$ МВ/м. Для защиты от старения под действием света в состав резины вводят сажу, что ухудшает её электрические свойства, однако защищает от разрушающего воздействия солнечных лучей. Чёрная резина применяется для оболочек кабелей.

Из бутадиенового каучука, при нагреве до 200–300 °С без добавки вулканизирующих веществ получают эскапон (синтетический каучук Пономарёва), который имеет высокие электроизоляционные свойства: $\rho \approx 10^{15}$; $\varepsilon = 2,7 \dots 3$; $\text{tg}\delta = 0,0005$.

Хлоропреновый каучук (наирит, неопрен), отличается стойкостью к действию масла и бензина и озона и других окислителей, а также не поддерживает горения. Он используется для защитных оболочек кабелей.

Кремнийорганические (силиконовые) каучуки отличаются высокой нагревостойкостью (до 250 °С), устойчивостью к дуге и скользящим разрядам. Применяются для покрытия стеклопластиковых изоляторов. Недостатками силиконовых каучуков являются горючесть и невысокая механическая прочность.

1.16 Стёкла

Стекла это неорганические квазиаморфные системы оксидов.

Благодаря высокой химической устойчивости, а также дешевизне и доступности сырьевых компонентов, наибольшее распространение получили силикатные стекла (т. е. на основе диоксида кремния SiO_2). Для придания определенных свойств, а также из технологических соображений в состав силикатных стёкол вводят оксиды различных металлов.

Сырьем для изготовления стёкол служат следующие материалы: кварцевый песок SiO_2 , сода Na_2CO_3 , поташ K_2CO_3 , известняк CaCO_3 , доломит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, сульфат натрия Na_2SO_4 , бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, борная кислота H_3BO_3 , сурик Pb_3O_4 , полевого шпат $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O}$ и другие компоненты.

Сырьевые материалы измельчают, отвешивают в нужных соотношениях и тщательно перемешивают; полученную при этом шихту загружают в стекловарочную печь. В крупном производстве применяют ваннные печи, а для получения небольшого количества, стекла с точно выдержанным составом – горшковые печи. При нагреве шихта плавится, летучие составные части (H_2O , CO_2 , SO_3) из нее удаляются, а оставшиеся оксиды химически реагируют между собой, в результате чего образуется однородная стекломасса, которая и идет на выработку листового стекла или стеклянных изделий.

Лучшие оптические стёкла варят токами высокой частоты.

Формовку изделий из стекла осуществляют путём выдувания, центробежного литья, вытяжки, прессования, отливки и т. п. Необходимо отметить, что стеклообразное состояние материала получается лишь при быстром охлаждении стекломассы. В случае медленного охлаждения начинается частичная кристаллизация, стекло теряет прозрачность и механическую прочность.

Изготовленные стеклянные изделия подвергают отжигу, чтобы устранить опасные местные механические напряжения, возникшие при быстром и неравномерном остывании стекла, для чего изделие нагревают до высокой температуры, а затем медленно охлаждают.

Силикатные стекла по химическому составу, а в связи с этим и по электрическим свойствам (тангенсу угла диэлектрических потерь и удельной проводимости) можно подразделить на три группы:

1 Бесщелочные стекла обладают высокой нагревостойкостью, высокими электрическими свойствами, но из них трудно изготавливать изделия, особенно сложной конфигурации.

2 Щелочные стёкла легко обрабатываются при нагреве (технологичны), но имеют пониженные электрические свойства.

3 Щелочные стёкла с высоким содержанием тяжелых оксидов сочетают удовлетворительную обрабатываемость с хорошими электрическими свойствами.

Кварцевое стекло получают из чистого диоксида кремния при температурах выше 1700 °С. Такая стекломасса обладает очень узким интервалом размягчения и даже при температурах выше 1700 °С характеризуется высокой вязкостью. Поэтому из нее удастся получить изделия только простейшей конфигурации.

Кварцевое стекло обладает рядом замечательных свойств. Оно имеет наименьшее значение температурного коэффициента линейного расширения из всех известных веществ вообще. Высокая механическая прочность в сочетании с малым температурным коэффициентом линейного расширения обуславливают высокую стойкость кварцевого стекла к тепловым импульсам. Нагретое докрасна кварцевое стекло можно погружать в холодную воду, не вызывая его разрушения. Благодаря высокой нагревостойкости и химической инертности к действию большинства реактивов кварцевое стекло получило широкое применение в технологии производства чистых веществ в качестве конструкционного материала – реакторы, ампулы, лодочки, тигли и т. п.

Кварцевое стекло отличается высокой прозрачностью для излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области спектра вплоть до длины волны порядка 4 мкм. Поэтому оно является ценным оптическим материалом; из него изготавливают линзы, призмы, оптические окна, баллоны ламп ультрафиолетового излучения и др. По электрическим свойствам кварцевое стекло относится к очень хорошим высокочастотным диэлектрикам ($\epsilon = 3,8$; $\rho > 10^{16}$ Ом·м; $\text{tg}\delta = 0,0002$ на частоте 10^6 Гц).

Кратковременная электрическая прочность стёкол при электрическом пробое очень велика и в некоторых случаях может достигать 500 МВ/м. Пробой стёкол имеет тепловой характер.

Классификация стёкол по техническому назначению:

1 Электровакуумные. Определяющим параметром стёкол для изготовления из них баллонов электровакуумных приборов является температурный коэффициент линейного расширения. Он имеет очень важное значение при впайке металлической проволоки или ленты в стекло. По этому признаку электровакуумные стёкла подразделяют на «платиновые», «молибденовые» и «вольфрамовые». Названия определяются не составом стекла, а только тем, что значения α этих стёкол близки к α платины, молибдена, вольфрама.

Для высокочастотных приборов используют стекла с низкими диэлектрическими потерями.

2 Изоляторные. Стёкла легко металлизуются и используются в качестве герметизированных вводов в металлические корпуса различных приборов (конденсаторов, диодов, транзисторов) в виде стеклянной бусы, изолирующей металлические выводы прибора от фланца корпуса.

3 Цветные. Обычные силикатные стёкла прозрачны для излучения в видимой части спектра. Некоторые добавки придают стеклам соответствующую окраску: CaO – синюю, Cr_2O_3 – зеленую, MnO_2 – фиолетовую и коричневую, UO_3 – желтую и т. д., что используется при изготовлении цветных стёкол, светофильтров, эмалей и глазурей.

Стекло может быть использовано в качестве рабочего тела в твёрдотельных **лазерах**. Генерирующими центрами являются активные ионы, равномерно распределенные в диэлектрической прозрачной «матрице». В практике наиболее часто применяют баритовый крон ($\text{BaO} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$), активированный ионами неодима Nd^{3+} .

Из расплавленной стекломассы методом вытяжки через фильеру с последующей быстрой намоткой на вращающийся барабан можно получать тонкое **стекловолокно**, обладающее хорошей гибкостью и повышенной механической прочностью.

Весьма тонкие стеклянные волокна (диаметром 4–7 мкм) имеют настолько высокую гибкость, что могут обрабатываться способами текстильной технологии. Из стеклянных нитей, скрученных из отдельных волокон, ткнут стеклянные ткани, ленты и шланги. Преимуществами стеклянной волокнистой изоляции перед изоляцией из органических волокон являются высокая нагретостойкость, значительная механическая прочность, относительно малая гигроскопичность и хорошие электроизоляционные свойства. Для производства стекловолокна используют щелочные алюмосиликатные и бесщелочные алюмоборосиликатные стекла.

Тонкие стеклянные волокна используют как **световоды** для передачи света между источником и приёмником излучения. Отдельные волокна могут быть соединены в световые кабели (жгуты) с внутренними межволоконными светоизолирующими покрытиями. Совокупность методов и средств передачи световой информации с помощью тончайших волокон получила название во-

локонной оптики, которая является важной составной частью оптоэлектроники.

Волоконные устройства имеют ряд преимуществ перед линзовыми. Они отличаются компактностью и надёжностью. С их помощью можно осуществить поэлементную передачу изображения с достаточно высокой разрешающей способностью, причём передача изображения возможна по искривленному пути. Существенным моментом является скрытность передачи информации и высокая помехозащищённость оптического канала связи, в котором сами волокна играют роль световодов, т. е. служат направляющими системами — канализируют свет от источника к приёмнику информации. Направляющее действие волокон достигается за счёт эффекта многократного полного внутреннего отражения. С помощью волоконных жгутов легко осуществить преобразование оптического изображения, его кодирование и дешифровку. Световые кабели из волокон с коническим сечением могут усиливать освещённость объектов за счёт концентрации светового потока, уменьшать или увеличивать изображение.

Специальные технологические приемы (осаждение плёнок на подложку, ионное легирование, ионный обмен) позволяют изготовить плоские световоды для оптических интегральных схем.

Ситаллы – это стеклокристаллические материалы, получаемые путём почти полной стимулированной кристаллизации стёкол специально подобранного состава. Они занимают промежуточное положение между обычными стёклами и керамикой. Ситаллы отличаются от стёкол тем, что в основном имеют кристаллическое строение, а от керамики – значительно меньшим размером кристаллических зёрен.

По внешнему виду ситаллы представляют собой плотные материалы от белого и светло-бежевого до коричневого цвета. Они отличаются повышенной механической прочностью, могут иметь как очень маленький, так и большой коэффициент линейного расширения, высокую теплопроводность и удовлетворительные электрические характеристики. По техническому назначению ситаллы можно подразделить на установочные и конденсаторные. Установочные ситаллы широко используют в качестве подложек гибридных интегральных микросхем и дискретных пассивных элементов (например, тонкоплёночных резисторов). Достоинством ситалловых кон-

денсаторов являются повышенной электрической прочностью по сравнению с керамическими.

1.17 Керамика

Керамическим диэлектрикам присущи многие положительные свойства: высокая нагревостойкость, отсутствие у большинства материалов гигроскопичности, хорошие электрические характеристики при достаточной механической прочности, стабильность характеристик и надёжность, стойкость к воздействию излучения высокой энергии, развитию плесени и поражению насекомыми. Сырьё для производства основных керамических изделий доступно и дешёво. Преимуществом керамики является возможность получения заранее заданных характеристик путём изменения состава массы и технологии обжига.

Керамический материал состоит из двух фаз – кристаллической и стекловидной. Кристаллическую фазу образуют различные химические соединения или твёрдые растворы этих соединений. Основные свойства керамики – диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, температурный коэффициент линейного расширения – во многом зависят от особенностей кристаллической фазы.

Стекловидная фаза представляет собой прослойки стекла, «связывающие» кристаллическую фазу. Технологические свойства керамики (температура спекания, степень пластичности керамической массы при формовании) определяются в основном количеством стекловидной фазы. От её содержания зависят также механическая прочность, плотность, степень пористости и гигроскопичность материала. Некоторые виды радиокерамики вообще не содержат стекловидной фазы.

Наличие газов в закрытых порах приводит к снижению механической и электрической прочности керамических изделий, а также вызывает диэлектрические потери при повышенной напряжённости поля вследствие их ионизации.

Технологическая, схема керамического производства включает в себя следующие операции: 1) тонкое измельчение и тщательное смешивание исходных компонентов; 2) пластификация массы и образование формовочного полуфабриката; 3) формование заготовок из пластифицированной массы; 4) высокотемпературный обжиг.

В процессе обжига происходит усадка изделий, т. е. уменьшение их размеров, поэтому допуски на размеры керамических изделий, особенно крупногабаритных, сравнительно велики (до 5 %).

По техническому назначению керамические диэлектрические материалы можно подразделить на установочные и конденсаторные. Установочную керамику применяют для изготовления разного рода изоляторов и конструкционных деталей; опорных, проходных, подвесных, антенных изоляторов радиоустройств, подложек интегральных микросхем, ламповых панелей, внутриламповых изоляторов; корпусов резисторов, каркасов индуктивных катушек, оснований электрических печей и др.

Из керамики изготавливают свыше 50 % всех конденсаторов.

По электрическим свойствам установочную и конденсаторную керамику подразделяют на низкочастотную и высокочастотную.

Из низкочастотных установочных материалов наиболее распространён изоляторный **фарфор**. Сырьем для его изготовления служат специальные сорта глины, кварцевый песок и полевой шпат.

Из-за большого содержания щелочных оксидов в стеклофазе материал обладает значительными диэлектрическими потерями на высоких частотах.

Промежуточное положение между высокочастотными и низкочастотными диэлектриками занимает **радиофарфор**.

Улучшение его электрических свойств по сравнению с изоляторным фарфором достигается путём введения в состав исходной шихты оксида бария, резко снижающего диэлектрические потери и проводимость стекловидной фазы. Удельное сопротивление радиофарфора на два порядка выше, чем у изоляторного фарфора.

Дальнейшим усовершенствованием радиофарфора является **ультрафарфор**, относящийся к группе материалов с высоким содержанием глинозёма (более 80 % Al_2O_3).

Ультрафарфор является высокочастотным диэлектриком, в котором сочетаются низкие диэлектрические потери с высокой механической прочностью и удовлетворительными для промышленного производства технологическими параметрами.

Корундовая керамика с содержанием глинозёма 95–99 % получила название **алюминоксида**.

Этот материал отличается низкими диэлектрическими потерями в диапазоне радиочастот и при повышенных температурах, облада-

ет весьма высокой нагревостойкостью (до 1600 °С), а также большой механической прочностью и хорошей теплопроводностью. Удельная теплопроводность алюминоксида в 10–20 раз выше, чем изоляторного фарфора. Керамика из алюминоксида используется в качестве изоляторов в корпусах полупроводниковых приборов и подложек интегральных микросхем.

Разновидностью алюминоксида является **поликор**, обладающий особо плотной структурой. В отличие от обычной корундовой керамики поликор прозрачен, поэтому его применяют для изготовления колб некоторых специальных источников света.

Керамика **брокерит** на основе оксида бериллия ВеО обладает наиболее высокой теплопроводностью среди всех неметаллических материалов. К тому же она имеет высокие электрические параметры: $\rho = 10^{16}$ Ом·м, $\operatorname{tg}\delta < 3 \cdot 10^{-4}$ (на частоте 1 МГц). Брокеритовую керамику применяют для подложек интегральных микросхем и в особо мощных приборах СВЧ.

Недостатком этого материала является токсичность порошкообразного ВеО, что требует соблюдения строгих мер техники безопасности на всех этапах технологического цикла изготовления керамических изделий.

Цельзиановую керамику используют для изготовления каркасов высокостабильных индуктивных катушек, изоляторов и высокочастотных конденсаторов большой реактивной мощности.

Характерными особенностями цельзиановой керамики является повышенная по сравнению с другими керамическими материалами электрическая прочность (до 45 МВ/м) и сравнительно небольшая механическая прочность.

Стеатитовую керамику получают на основе природного минерала – талька, который отличается высокой пластичностью. Преимуществами стеатитовой керамики являются её малая абразивность и незначительная усадка при обжиге (1,0–1,5 %). Поэтому из неё можно изготавливать мелкие детали с повышенной точностью размеров.

Стеатит применяют в качестве высокочастотных проходных изоляторов, опорных плат, изолирующих колец, деталей корпусов полупроводниковых приборов, а также в виде пористой вакуумной керамики для внутриламповых изоляторов.

Конденсаторная керамика может иметь диэлектрическую проницаемость с повышенным ($\epsilon = 10 \dots 230$) и высоким ($\epsilon > 900$) значениями. В первом случае, при частоте 1 МГц, $\text{tg}\delta$ не превышает 0,0006, т. е. керамика принадлежит к высокочастотным диэлектрикам, во втором, при частоте 1000 Гц, $\text{tg}\delta = 0,002 \dots 0,025$, и такую керамику относят к низкочастотным диэлектрикам.

Конденсаторную керамику используют соответственно для производства низкочастотных и высокочастотных конденсаторов низкого и высокого напряжений. Желательно, чтобы все конденсаторные материалы имели малую зависимость ёмкости от температуры.

Специальными материалами для высокочастотных конденсаторов являются «титанатовые» керамические диэлектрики (**тиконды**).

Керамика с большим содержанием рутила или титанатов кальция и стронция характеризуется пониженной электрической прочностью (8–12 МВ/м), подвержена электрохимическому старению при длительной выдержке под постоянным напряжением и не обладает температурной стабильностью ϵ . Основу низкочастотной конденсаторной керамики составляют титанат бария и твёрдые растворы с сегнетоэлектрическими свойствами. Благодаря доменной поляризации конденсаторная **сегнетокерамика** обладает весьма высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 900 \dots 8000$), которая однако не отличается температурной стабильностью и зависит от частоты и напряжённости электрического поля. Лучшей стабильностью отличаются титаноциркониевая, лантановая и станнатная керамика.

1.18 Слюда и слюдяные материалы

Слюда обладает исключительно ценными качествами: высокой электрической прочностью, нагревостойкостью, гибкостью, теплопроводностью. Встречается в природе в виде кристаллов, легко расщепляющихся на пластинки. Водные алюмосиликаты – мусковит $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и флогопит $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Кроме того в состав слюды могут входить соединения железа, натрия, кальция и др. Мусковиты бесцветные или имеют оттенки – красноватый, зеленоватый и др., по электрическим и механическим свойствам лучше. Флогопиты тёмные – янтарные, золотистые, коричневые до чёрных, но встречаются и светлые. Наилучшие элек-

трические свойства – перпендикулярно слоям. Применяется для изоляции мощных высоковольтных электрических машин и высоковольтных высокочастотных конденсаторов. При нагреве до нескольких сотен градусов из слюды выходит кристаллическая вода, она вспучивается и теряет прозрачность, электрические и механические свойства ухудшаются.

Кроме пластин самой слюды применяют материалы на её основе: миканиты, слюдиниты, слюдопласты, микалекс.

Миканиты – листовые материалы, склеенные из отдельных лепестков слюды с помощью клеящего лака или сухой смолы. Их используют в качестве различных изоляционных прокладок, например между коллекторными пластинами электродвигателей. Пластины миканита используют также в качестве конструктивных изоляционных элементов например внутри электронно-вакуумных приборов.

При изготовлении **микаленты на** подложку из стеклоткани или особо прочной бумаги с двух сторон приклеивают пластинки слюды с перекрытием. Из отходов слюды с использованием различных связующих изготавливают **слюдинитовые** и **слюдопластовые** бумаги. **Микалекс** это пластмасса, в которой наполнитель – отходы слюды, а связующее – легкоплавкое стекло.

Синтетическая слюда фторфлогопит применяется для изготовления штампованных деталей, способных работать при температуре от минус 200 до плюс 800 °С. В её структуре атомы кислорода частично заменены на атомы фтора.

1.19 Асбест и асбестовые материалы

Асбест – название группы минералов, обладающих волокнистым строением. Хризотилковый $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Залегают в каменных породах в виде жил, состоящих из параллельных друг другу волокон (горный лён). Длина волокон асбеста достигает нескольких сантиметров. Нагревостойкость асбеста превышает 400 °С.

Из асбеста изготавливают пряжу, ленты, ткани, бумаги, картоны и другие изделия. Ленты из асбеста с высоким содержанием магнетита используют в электрических машинах высокого напряжения для улучшения картины электрического поля. В качестве наполнителя асбест входит в состав термостойких пластмасс. Из него изготавливают **асбогетинакс**, **асботекстолит**.

Асбоцемент – материал холодной прессовки, в котором наполнителем является асбест, а связующим – цемент, применяется для распределительных щитов, искрогасящих камер, труб кабельной канализации. Следует помнить о канцерогенности асбеста.

1.20 Неорганические диэлектрические плёнки

Оксидные плёнки на поверхности некоторых металлов, в частности алюминия, широко применяются в качестве изоляции электролитических конденсаторов. Диэлектрическая проницаемость оксида алюминия около 10. Более перспективны танталовые (ϵ около 27) и ниобиевые (ϵ примерно 40) оксидные конденсаторы. Толщину оксидных плёнок можно наращивать с помощью химических и электрохимических процессов.

Из оксидированного алюминия изготавливают также различные катушки без дополнительной межвитковой и межслойной изоляции. Недостатками оксидной изоляции являются её малая гибкость и заметная из-за пористости плёнки гигроскопичность. Если не требуется особая нагревостойкость, оксидную изоляцию можно пропитать и покрыть лаком. Температура плавления оксида алюминия 2050 °С.

Оксидные плёнки кремния используют в качестве изоляции в микросхемах. Оксид гафния наилучший материал для изоляционных подложек и плёнок нанoeлектронных устройств.

1.21 Нагревостойкость электроизоляционных материалов

По наибольшей температуре длительной эксплуатации электроизоляционных материалов их подразделяют на **7 классов нагревостойкости**:

У (до 90 °С) – волокнистые материалы на основе целлюлозы и шёлка (пряжа, ткани, бумаги, картоны, древесина), а также большинство термопластичных полимерных материалов;

А (до 105 °С) – материалы из органических волокон, пропитанных лаками, компаундами либо погруженных в жидкий диэлектрик, а также полиамиды и поливинилацетаты;

Е (до 120 °С) – термореактивные полимерные материалы, а также полиэфир, полиуретан и эпоксидные смолы;

В (до 130 °С) – материалы с большим содержанием неорганических компонентов и органическими связующими;

Г (до 155 °С) – неорганические вещества с эпоксидными, кремнийорганическими и термореактивными связующими повышенной нагревостойкости;

Д (до 180 °С) – материалы, получаемые при использовании кремнийорганических смол особо высокой нагревостойкости;

Е (выше 180 °С) – чисто неорганические материалы, а также фторопласт и полиимиды.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1 В каких единицах измеряется электропроводность и сопротивление диэлектрика?

2 Назовите и охарактеризуйте механизмы поляризации диэлектриков.

3 Какие потери происходят в изоляции? Как их оценивают?

4 Назовите причины пробоя изоляции. Что такое электрическая прочность?

5 Как происходит пробой газа в однородном поле?

6 В чём особенности пробоя газа в неоднородном поле?

7 Назовите и охарактеризуйте изоляционные газы и жидкости.

8 В чём особенности пробоя твёрдой изоляции?

9 Чем различаются реакции полимеризации и поликонденсации?

10 В чём различие свойств линейных и пространственных полимеров?

11 Какие полимеры используют в высокочастотной изоляции и почему?

12 Какую роль играют волокна в электрической изоляции?

13 Какие вещества используют для пропитки волокнистой изоляции?

14 Назовите основные преимущества эпоксидных компаундов. Каков механизм их отверждения?

15 Как и для каких целей используются изделия из композиционных пластмасс и слоистые пластики?

16 Что такое эластомеры? Для чего их применяют?

17 Какие виды стёкол нашли наиболее широкое применение в электронной технике и для каких целей?

18 В чём сходство и различие между ситаллом и стеклом? Какова технология изготовления ситаллов и для каких целей они применяются?

19 Каковы операции технологического цикла при изготовлении керамических изделий? В чём преимущества керамического производства?

20 Приведите примеры установочных керамических диэлектриков. Назовите области их применения.

21 Чем различаются высокочастотная и низкочастотная конденсаторная керамика?

22 Для каких целей используются в электротехнике слюда и асбест?

23 Какие неорганические плёнки используют для изоляции?

24 Назовите и охарактеризуйте классы нагревостойкости изоляции.

2 АКТИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Диэлектрики, электрическими и оптическими свойствами которых можно управлять с помощью электрических, магнитных, световых, тепловых и механических воздействий, называют активными.

В отличие от пассивных диэлектриков, от которых требуется стабильность свойств, требования к активному материалу совершенно противоположные: чем сильнее изменяются его свойства при внешних воздействиях, тем лучше активный элемент может выполнять функции управления энергией или преобразования информации.

Активные диэлектрики позволяют осуществить генерацию, усиление, модуляцию электрических и оптических сигналов, а также запоминание и преобразование информации. Следует отметить, что резкой границы между активными и пассивными диэлектриками не существует. Иногда один и тот же материал в различных условиях его эксплуатации может выполнять либо пассивные функции изолятора или конденсатора, либо активные функции управляющего или преобразующего элемента.

К числу активных диэлектриков относят: сегнето-, пьезо- и пироэлектрики; электреты; материалы лазерной электроники; жидкие кристаллы; электро-, магнито- и акустооптические материалы; диэлектрические кристаллы с нелинейными оптическими свойствами и другие материалы. Свойствами активных диэлектриков могут обладать не только твёрдые, но также жидкие и даже газообразные вещества (например, активная среда газовых лазеров). По химическому составу это могут быть органические и неорганические материалы. По строению и свойствам активные диэлектрики можно подразделить на кристаллические и аморфные, полярные и неполярные. Из всего многообразия активных диэлектриков в настоящем разделе рассмотрены лишь те, которые нашли широкое практическое применение.

2.1 Сегнетоэлектрики

Сегнетоэлектриками называют вещества, обладающие спонтанной (самопроизвольной) поляризацией. Это значит, что отдельные участки их структуры имеют собственные электрические моменты, вызванные смещением ионов или полярных групп атомов. При этом

моменты соседних участков взаимно ориентируются в одном направлении в пределах макроскопической области, называемой **доменом**. Направлению электрических моментов у разных доменов различны, поэтому суммарная поляризованность образца в целом может быть равна нулю. Внешнее электрическое поле изменяет направления электрических моментов доменов, что создает эффект очень сильной поляризации. Этим объясняются свойственные сегнетоэлектрикам сверхвысокие значения диэлектрической проницаемости (до сотен тысяч). Следствием доменного строения сегнетоэлектриков является нелинейная зависимость их электрической индукции от напряжённости электрического поля, а также петля электрического гистерезиса на кулонвольтовой характеристике.

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация достаточно широко распространена. В настоящее время известно несколько сотен химических соединений, в том числе и твёрдых растворов, обладающих свойствами сегнетоэлектриков. Температура перехода в спонтанно поляризованное состояние (точка Кюри) у различных сегнетоэлектриков составляет от нескольких кельвинов (например, у ниобата свинца $\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ $T_K = 15 \text{ K}$) до полутора тысяч кельвинов (например, у ниобата лития LiNbO_3 $T_K = 1483 \text{ K}$), а спонтанная поляризованность находится в пределах от 10^{-5} до 3 Кл/м^2 .

Вещества, электрические моменты соседних участков которых направлены встречно (антипараллельно), называют **антисегнетоэлектриками**. В их кристаллах электрические моменты соседних элементарных ячеек оказываются уравновешенными, следовательно, спонтанная поляризованность каждого домена равна нулю. Однако при нагреве выше температуры Кюри это равновесие нарушается и антисегнетоэлектрики могут обладать высокой диэлектрической проницаемостью. Примерами антисегнетоэлектриков являются цирконат свинца PbZrO_3 , ниобат натрия NaNbO_3 , дигидрофосфат аммония $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ и др.

Структура сегнетоэлектрических кристаллов разнообразна. По типу химической связи и строению все сегнетоэлектрики подразделяют на ионные и дипольные.

У ионных сегнетоэлектриков характерным структурным элементом кристаллической решётки является кислородный октаэдр, внутри которого компактный атом титана или иного элемента может занимать несколько устойчивых положений. К ионным сегнетоэлек-

трикам относятся титанат бария BaTiO_3 , титанат свинца PbTiO_3 , ниобат калия KNbO_3 , ниобат лития LiNbO_3 , танталат лития LiTaO_3 . йодат калия KIO_3 , барий-натриевый ниобат $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ или сокращенно – «банан» и др.

У кристаллов дипольных сегнетоэлектриков имеются готовые полярные группы атомов, способные занимать различные положения равновесия. К дипольным сегнетоэлектрикам относятся сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, триглицинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$, дигидрофосфат калия KH_2PO_4 , нитрит натрия NaNO_2 и др. Именно в кристаллах сегнетовой соли впервые были обнаружены особенности поведения диэлектриков, обусловленные спонтанной поляризацией. Отсюда произошло название всей группы материалов со специфическими свойствами – сегнетоэлектрики.

Ионные и дипольные сегнетоэлектрики существенно различаются по физическим свойствам и особенностям применения.

2.2 Применение сегнетоэлектриков

В техническом применении сегнетоэлектриков наметилось несколько направлений, важнейшими из которых следует считать:

- 1) изготовление малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной ёмкостью;
- 2) использование нелинейности поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств;
- 3) использование сегнетоэлементов в счётно-вычислительной технике в качестве ячеек памяти;
- 4) использование кристаллов сегнето- и антисегнетоэлектриков для модуляции и преобразования лазерного излучения;
- 5) изготовление пьезо- и пироэлектрических преобразователей.

Конденсаторная сегнетокерамика, как и любой диэлектрик, для производства обычных конденсаторов должна иметь большую величину диэлектрической проницаемости с малой зависимостью от температуры, незначительные потери, небольшую зависимость ϵ и $\text{tg}\delta$ от напряжённости электрического поля (малую нелинейность), высокие значения удельного сопротивления и электрической прочности. Вблизи точки Кюри диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика максимальна, но нестабильна. Одним из важнейших методов получения оптимальных свойств в заданном температурном ин-

тервале является использование твёрдых растворов и смесей различных кристаллов. Изменением концентрации компонентов в твёрдом

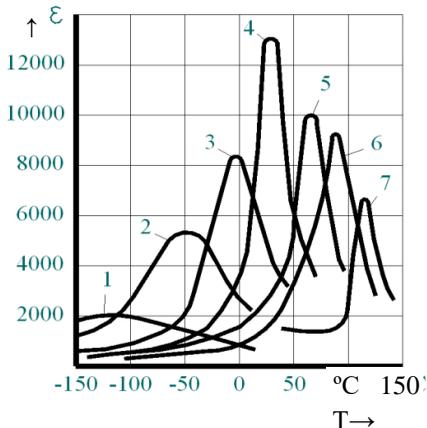


Рисунок 2.1 – Графики зависимости ϵ твёрдых растворов $\text{BaTiO}_3+\text{BaZrO}_3$ от температуры при $f=1$ кГц:

1 – 60 % BaTiO_3 ; 2 – 70 %; 3 – 75 %;
4 – 80 %; 5 – 85 %; 6 – 90 %; 7 – 100 %

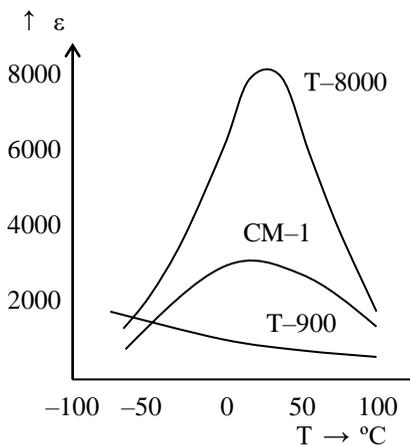


Рисунок 2.2 – Зависимость ϵ конденсаторной сегнетокерамики от температуры

растворе можно регулировать значения диэлектрической проницаемости, смещать температуру Кюри (рисунок 2.1), изменять нелинейность поляризации и т. д.

В твёрдых растворах, по сравнению с простыми веществами, можно получить более сглаженные температурные зависимости ϵ , что имеет важное значение для производства конденсаторов. В большинстве случаев конденсаторные сегнетокерамические материалы содержат несколько кристаллических фаз. При «размытом» фазовом переходе нелинейные свойства диэлектриков выражены сравнительно слабо.

Графики зависимости диэлектрической проницаемости ϵ от температуры для некоторых сегнетокерамических материалов, применяемых при изготовлении малогабаритных конденсаторов различных типов, приведены на рисунке 2.2.

Материал T-900 ($\epsilon \approx 900$) представляет собой твердый раствор титанатов стронция SrTiO_3 и висмута $\text{Bi}_4\text{TiO}_{12}$. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры выражена слабо, т. к. точка Кюри $t_k = -140$ °C расположена в области отрицательных температур.

Материал СМ-1 (ϵ около 3000) на основе титаната бария с добавкой оксидов циркония и висмута, обладает сглаженной зависимостью диэлектрической проницаемости от температуры. Из него изготавливают низковольтные малогабаритные конденсаторы.

Материал Т-8000 (ϵ около 8000) для изготовления конденсаторов, в том числе и высоковольтных, работающих в нешироком интервале температур. Представляет собой твердый раствор $\text{BaTiO}_3 + \text{BaZrO}_3$. Отличается высоким значением диэлектрической проницаемости при комнатной температуре (вблизи точки Кюри).

Материалы для варикондов. Вариконды предназначены для управления параметрами электрических цепей за счёт изменения их ёмкости при воздействии нескольких напряжений, приложенных одновременно и различающихся по значению и частоте.

В простейшем случае им приходится работать при одновременном воздействии постоянного и переменного (синусоидального) электрических полей, причём $E_{\sim} \gg E_{\sim}$.

Одна из основных характеристик варикондов – коэффициент нелинейности K , определяемый как отношение максимального значения диэлектрической проницаемости при некоторой, характерной для данного материала напряжённости электрического поля к начальному значению диэлектрической проницаемости. Численное значение коэффициента нелинейности для различных марок варикондов может быть от 4 до 50.

Нелинейные конденсаторы, обычно в тонкоплёночном исполнении, являются основой разнообразных радиотехнических устройств – параметрических усилителей, низкочастотных усилителей мощности, фазовращателей, умножителей частоты, модуляторов, стабилизаторов напряжения, управляемых фильтров и других устройств. Основной кристаллической фазой в таких материалах являются твёрдые растворы $\text{Ba}(\text{Ti} + \text{Sn})\text{O}_3$ или $\text{Pb}(\text{Ti} + \text{Zr} + \text{Sn})\text{O}_3$.

Сегнетоэлектрики с ППГ. Благодаря диэлектрическому гистерезису сегнетоэлектрики можно применять для запоминания информации. Здесь необходим материал с возможно более прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), что характерно, например, для монокристаллов триглицинсульфата – ТГС – $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$.

В отсутствие внешнего поля сегнетоэлектрик с ППГ имеет два устойчивых состояния, соответствующих различным направлениям остаточной электрической индукции. Одно из этих состояний в за-

поминающей ячейке означает хранение единицы, а другое – хранение нуля. Подавая внешнее напряжение различной полярности, сегнетоэлектрик можно переводить из одного состояния в другое. На этом основаны запись, считывание и стирание информации. Считывание информации можно осуществить без её разрушения, например, оптическим методом или измерением сопротивления тонкой полупроводниковой плёнки, нанесенной на поверхности сегнетоэлектрика. Время переключения ячейки из сегнетоэлектрического монокристалла зависит от его размера и при толщине в несколько десятых долей миллиметра составляет несколько микросекунд.

В сегнетокерамике процесс переполяризации в отдельных зёрнах происходит независимо, и время прорастания доменов определяется размерами зёрен, которые можно уменьшить до нескольких микрометров. В этом случае быстроедействие выше, чем в монокристаллах, хотя прямоугльность петли гистерезиса ухудшается.

2.3 Электрооптические кристаллы

Кристаллы ряда сегнето- и антисегнетоэлектриков обладают ярко выраженным электрооптическим эффектом, под которым понимают изменение показателя преломления среды, вызванное внешним статическим электрическим полем. Если изменение показателя преломления пропорционально первой степени напряжённости, то электрооптический эффект называют линейным (или эффектом Поккельса). Если же это изменение пропорционально квадрату напряжённости поля, то электрооптический эффект называют квадратичным (или эффектом Керра).

Электрооптические свойства сегнетоэлектрических кристаллов используются для модуляции лазерного излучения. Разнообразные конструкции электрооптических модуляторов света созданы на базе кристаллов ниобата лития LiNbO_3 , дигидрофосфата калия KH_2PO_4 и его дейтерированного аналога KD_2PO_4 (дидейтеро-фосфат калия). Весьма перспективно применение в качестве электрооптического материала прозрачной сегнетокерамики системы ЦТСЛ – твёрдые растворы цирконата-титаната свинца с оксидом лантана.

Электрооптический эффект усиливается с приближением температуры сегнетоэлектрика к точке Кюри. Здесь возможна эффективная модуляция света небольшими напряжениями.

Материалы нелинейной оптики. При воздействии мощных световых пучков, создаваемых с помощью лазеров, во многих сегнето- и антисегнетоэлектриках проявляются нелинейные оптические эффекты, в основе которых лежит зависимость показателя преломления от напряжённости поля самой световой волны. Нелинейность оптических свойств сегнетоэлектрических кристаллов позволяет осуществить генерацию гармоник лазерного излучения, смешение и преобразование частот оптических сигналов. Большой практический интерес представляет преобразование инфракрасного излучения лазеров (обычно с $\lambda = 1,06$ мкм) в видимый свет. Высокую эффективность такого преобразования обеспечивают кристаллы KN_2PO_4 (дигидрофосфат калия), LiNbO_3 (ниобат лития), LiIO_3 (йодат лития), $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ (барий-натриевый ниобат, «банан») и др.

2.4 Пьезоэлектрики

К пьезоэлектрикам относят диэлектрики, которые обладают сильно выраженными пьезоэлектрическими эффектами. **Прямой** пьезоэлектрическим эффектом называют явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. Это изменение может быть продольным и поперечным; возникающий на каждой из поверхностей диэлектрика электрический заряд строго пропорционален механическому усилию. При **обратном** пьезоэлектрическом эффекте происходит изменение размеров диэлектрика под действием электрического поля. Пьезоэлектричество было открыто братьями Кюри в 1880 г.

Пьезоэффекты наблюдаются лишь в веществах с гетерополярной химической связью, т. е. пьезоэлектриками могут быть либо ионные, либо сильнополярные диэлектрики. Вторым необходимым условием существования пьезоэффекта является отсутствие центра симметрии в структуре диэлектрика. В противном случае деформация вызывает симметричное смещение положительных и отрицательных зарядов, и электрический момент не возникает. Пьезоэлектриками могут быть лишь вещества с высоким удельным сопротивлением. В достаточно проводящих средах пьезоэлектрическая поляризация быстро компенсируется свободными носителями заряда. Поскольку любой диэлектрик обладает некоторым током утечки, все применения пьезоэффекта связаны с переменными быстропотекающими процессами.

Известно более тысячи веществ, обладающих пьезоэлектрическими свойствами, в том числе все сегнетоэлектрики, однако практически применяют ограниченный круг материалов. Важнейшим пьезоэлектриком является монокристаллический кварц, крупные прозрачные кристаллы которого называют «горный хрусталь».

Плоскопараллельная полированная кварцевая пластинка с электродами и держателем представляет собой пьезоэлектрический резонатор, т. е. является колебательным контуром. Резонансная частота колебаний зависит от толщины пластины и направления кристаллографического среза. Преимуществами кварцевых резонаторов являются малый $\text{tg}\delta$ и высокая механическая добротность (т. е. очень малые механические потери). В лучших кристаллах кварца механическая добротность может составлять 10^6 – 10^7 . Это обеспечивает высокую частотную избирательность кварцевых резонаторов. Если в таком резонаторе возбудить колебания на резонансной частоте, то их затухание будет происходить в течение длительного времени. Кварцевый пьезоэлемент, вставленный в схему электрического генератора, навязывает ему собственную резонансную частоту.

Благодаря высокой добротности кварцевые резонаторы используются в качестве фильтров с высокой избирательной способностью, а также для стабилизации и эталонирования частоты генераторов (например, в радиолокационных станциях, в электронных часах и т. п.). Ввиду ограниченных запасов природного кварца основные потребности пьезотехники удовлетворяют искусственно выращиваемыми кристаллами.

Помимо кварца в различных пьезопреобразователях применяют кристаллы сульфата лития $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, сегнетовой соли, дигидрофосфата аммония, а также ниобат и танталат лития, которые превосходят кварц по добротности в диапазоне высоких частот и СВЧ. Для придания пьезоэлектрических свойств сегнетоэлектрические кристаллы LiNbO_3 и LiTaO_3 переводят в монокристаллическое состояние путём отжига в сильном электрическом поле при температуре несколько ниже точки Кюри.

Наиболее широкое применение в качестве пьезоэлектрического материала находит сегнетоэлектрическая **пьезокерамика**.

В обычном состоянии сегнетокерамика не проявляет пьезоактивности, поскольку является изотропной средой вследствие хаотического расположения отдельных кристаллических зёрен и деления их

на домены с различным направлением спонтанной поляризованности. Однако, если подвергнуть сегнетокерамику воздействию сильного электрического поля, то поляризованность доменов получит преимущественную ориентацию в одном направлении. После снятия поля сохраняется устойчивая остаточная поляризованность, материал становится текстурованным.

По своим свойствам поляризованный сегнетокерамический образец близок к однодоменному кристаллу и обладает высокой пьезоактивностью.

Основным материалом для изготовления пьезокерамических элементов являются твёрдые растворы $\text{PbZrO}_3 + \text{PbTiO}_3$ (цирконат-титанат свинца или сокращенно ЦТС). Эта керамика широко используется для создания мощных ультразвуковых излучателей в широком диапазоне частот для целей гидроакустики, дефектоскопии, механической обработки материалов.

Такие ультразвуковые генераторы применяются также в химической промышленности для ускорения различных процессов (эмульсификаторы, полимеризаторы, стерилизаторы и т. п.) и в полупроводниковой технологии для эффективной отмывки и обезжиривания полупроводниковых пластин с помощью ультразвуковой ванны.

Из пьезокерамики делают малогабаритные микрофоны, телефоны, громкоговорители (высокочастотные), детонаторы (для оружия), различные устройства поджига в газовых системах. Пьезокерамические элементы можно использовать в качестве датчиков давлений, деформаций, ускорений и вибраций. Двойное преобразование энергии (электрической в механическую и наоборот) положено в основу работы пьезорезонансных фильтров, линий задержки и пьезотрансформаторов.

Пьезотрансформаторы предназначены для получения высокого напряжения. Их обычно выполняют в виде пластины или бруска, одна половина которого (возбудитель колебаний) поляризуется по толщине, а другая половина (генератор) – по длине бруска (рисунок 2.3). Переменное электрическое поле, подводимое к зажимам возбудителя, вызывает резонансные механические колебания по длине бруска. В свою оче-

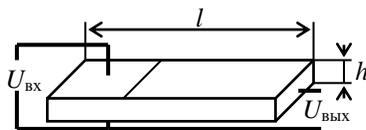


Рисунок 2.3 – Схема высоковольтного пьезоэлектрического трансформатора

редь, механические колебания, возникающие в генераторной части, приводят к появлению выходного электрического напряжения. Трансформаторы могут быть изготовлены для работы в на частоте 10–500 кГц. На более высоких частотах их размеры оказываются слишком малыми, а на низких – большими. Коэффициент трансформации напряжения, пропорциональный отношению l/h , может достигать значений 50 и более. Пьезокерамические трансформаторы используют в схемах питания электронно-лучевых трубок, газоразрядных приборов, счётчиков Гейгера и для генерирования высоковольтных импульсов. Преимуществами таких источников питания являются отсутствие магнитного поля, простота и надёжность конструкции, малая масса и габариты.

Кроме керамики ЦТС для изготовления различных пьезоэлектрических преобразователей применяют керамические материалы на основе твёрдых растворов $\text{BaNb}_2\text{O}_6 + \text{PbNb}_2\text{O}_6$ и $\text{NaNbO}_3 + \text{KNbO}_3$. Последние разработаны специально для высокочастотных преобразователей (10–40 МГц).

2.5 Пирозлектрики

К **пирозлектрикам** относят диэлектрики, обладающие сильной зависимостью спонтанной поляризованности от температуры.

Каждый участок пирозлектрика можно представить как конденсатор ёмкостью C (пропорциональной диэлектрической проницаемости ϵ), в котором при напряжении U запасена энергия $W_c = CU^2/2$. При нагреве ϵ и ёмкость C резко уменьшаются, а энергия не может измениться мгновенно, поэтому создаётся импульс напряжения.

Пирозлектрическими свойствами обладают некоторые линейные диэлектрики (например, турмалин, сульфат лития) и все сегнетоэлектрические материалы в монокристаллическом состоянии, для которого характерна одинаковая ориентация спонтанной поляризованности всех доменов. Значительный пирозэффект в сегнетоэлектриках используется для создания тепловых датчиков и приёмников лучистой энергии, предназначенных, в частности, для регистрации инфракрасного и СВЧ-излучения.

Специфическим свойством пирозлектрических фотоприёмников является отсутствие избирательности по спектру излучения. Существенное преимущество их состоит в том, что они не требуют охла-

ждения при детектировании излучения даже в далекой инфракрасной области спектра. Они обладают достаточно высоким быстродействием (способны работать в частотном интервале до 10 МГц), однако по чувствительности уступают полупроводниковым фотоприёмникам.

Максимальное проявление пирозлектрического эффекта наблюдаются в сегнетоэлектриках с точкой Кюри, близкой к комнатной температуре. К их числу относятся кристаллы ниобата бария-стронция $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$ и триглицинсульфата. Повышенной чувствительностью на высоких частотах характеризуются кристаллы ниобата $LiNbO_3$ и танталата $LiTaO_3$ лития. Пиро- и пьезоэлектрические свойства обнаружены у некоторых полимеров, в частности, у поляризованных плёнок поливинилденфторида и поливинилденхлорида, отличающихся простотой технологии изготовления, невысокой стоимостью и малой инерционностью пирозэффекта на высоких частотах.

2.6 Электреты

Электретом называют тело из диэлектрика, длительно сохраняющее поляризацию и создающее в окружающем его пространстве электрическое поле, т. е. электрет является формальным аналогом постоянного магнита, способным создавать электрическое поле в окружающем пространстве в течение многих месяцев и даже лет. К сожалению, время жизни электретов быстро уменьшается с повышением температуры и влажности окружающей среды. Термин электрет был предложен в 1896 г. английским физиком Хевисайдом, а первые образцы электретов были изготовлены японским исследователем Егучи из охлажденного в сильном электрическом поле расплава полярных диэлектриков: пальмового воска и канифоли в 1922 г.

Большой интерес представляют **фотоэлектреты** из материалов, у которых под воздействием света появляется электропроводность (сера, сульфид кадмия и др.). Фотоэлектреты могут длительно сохранять заряды в темноте и быстро разряжаются при освещении.

Обычно электрет имеет вид тонкой пластинки или полимерной плёнки из полиэтилентерефталата, поликарбоната, полиметилметакрилата и др. В условиях повышенной влажности наиболее стабильны электреты из политетрафторэтилена.

Электреты могут быть использованы для изготовления микрофонов и телефонов, измерения механических вибраций, в качестве пы-

леуловителей, дозиметров радиации, измерителей атмосферного давления и влажности, электрометров, в клавишах вычислительных машин, в электрофотографии и во многих других случаях.

2.7 Материалы для твёрдотельных лазеров

Лазер представляет собой источник оптического когерентного излучения, характеризующегося высокой направленностью и большой плотностью энергии.

Рабочее тело лазера изготавливают, как правило, в виде цилиндрического стержня, торцевые поверхности которого обрабатываются с высокой степенью точности. Активной средой служит кристаллическая или стеклообразная матрица, в которой равномерно распределены активные ионы (активаторы люминесценции). Все процессы поглощения и излучения света связаны с переходами электронов между уровнями активного иона; при этом матрица играет пассивную роль. Тип активного иона в основном определяет спектр излучения лазера. Оптический резонатор выполняют в виде двух плоскопараллельных зеркал. Одно из них полупрозрачно для вывода излучения из активного элемента. Для возбуждения активных ионов используется оптическая накачка с помощью мощных газоразрядных ламп.

Одним из наиболее освоенных материалов лазерной техники является рубин. Именно на рубине в 1960 г. был создан первый твердотельный лазер. Рубинами называют кристаллы α -корунда (Al_2O_3), в которых часть ионов алюминия замещена ионами хрома.

Искусственные кристаллы рубина обычно выращивают в печах по методу Вернейля, при котором тщательно размельченный порошок оксида алюминия с добавкой Cr_2O_3 медленно падает в пламя водородно-кислородной горелки. Отдельные частички порошка, проходя через пламя, расплавляются и затем кристаллизуются на затравочном кристалле, помещенном вне пламени. Полученную заготовку отжигают, а потом обрабатывают, придавая ей необходимые форму и размеры. Высококачественные кристаллы рубина могут быть получены и методом вытягивания из расплава.

Важнейшим материалом лазерной техники является иттрий-алюминиевый гранат, в кристаллической решётке которого часть ионов иттрия замещена ионами неодима (сокращенная форма записи

YAG: Nd³⁺). Низкая пороговая энергия возбуждения при комнатной температуре, высокая механическая прочность и хорошая теплопроводность дают возможность применять этот материал в лазерах, работающих в непрерывном и высокочастотном режимах.

Поскольку в спектре YAG: Nd³⁺ отсутствуют широкие полосы поглощения, то для увеличения эффективности оптической накачки обычно используют эффект **сенсibilизации**. В качестве сенсibilизатора вводят ионы Cr³⁺. Энергия накачки, поглощенная в широких полосах сенсibilизирующего иона Cr³⁺, резонансным безызлучательным путём передается активным ионам Nd³⁺. Сенсibilизация позволяет повысить коэффициент полезного действия до 5–7 % и довести мощность в непрерывном режиме генерации до сотен ватт.

По мощности излучения и значению коэффициента полезного действия лазеры YAG: Nd³⁺ + Cr³⁺ конкурируют с мощными лазерами на углекислом газе, отличаясь от последних значительно меньшими габаритами и более удобной для практического применения длиной волны излучения.

В настоящее время для твердотельных лазеров широко используют гадолиний-галлиевые гранаты (GGG), а также гадолиний-скандий-галлиевые (GSGG) и иттрий-скандий-галлиевые (YSGG). Активирование осуществляют неодимом ($\lambda = 1,06$ мкм) или европием ($\lambda = 2,79$ мкм). Находят применение также другие высокотемпературные соединения: алюминаты (например YAlO₃), молибдаты (например NaLa(MoO₄)₂), вольфраматы (например шеелит CaWO₄), флюорит CaF₂, а также оксидные и фтор-бериллатные стёкла.

Лазеры находят применение в системах оптической локации, в телевидении, голографии, информационно-измерительной технике и в медицине. С их помощью осуществляется дальняя космическая связь. Широкое распространение получила лазерная обработка оптически непрозрачных материалов: импульсная сварка, плавление, пайка, отжиг, сверление отверстий, резание и др.

2.8 Жидкие кристаллы

Жидкими кристаллами (ЖК) называют вещества, молекулы которых обладают подвижностью при сохранении упорядоченной структуры. Для них характерна зависимость оптических свойств от внешних факторов (температуры, давления, электрического поля и др.).

Эта зависимость открывает богатые возможности при изготовлении индикаторных устройств различного назначения.

Жидкие кристаллы были открыты в 1888 г. австрийским ботаником Ф. Рейнитцером. Однако широкое практическое применение эти вещества нашли сравнительно недавно. Специфика ЖК заключается в ограниченном температурном интервале существования мезофазы (т. е. жидкокристаллического состояния).

Жидкокристаллическое состояние образуют в основном органические соединения с удлинённой палочкообразной формой молекул. Значительную часть ЖК составляют соединения ароматического ряда, т. е. соединения, молекулы которых содержат бензольные кольца. По признаку общей симметрии все жидкие кристаллы подразделяются на три вида: смектические, нематические и холестерические.

Смектическая фаза отличается слоистым строением. Из-за высокой вязкости, смектические ЖК не нашли широкого применения.

В **нематической** фазе длинные оси молекул ориентированы вдоль одного общего направления, называемого нематическим директором. Для получения цветных изображений в ЖК вводят молекулы красителя, которые также имеют удлинённую палочкообразную форму. Область применения нематических жидких кристаллов – индикаторные устройства. К таким устройствам относятся дисплеи, крупноформатные табло, цифровые индикаторы для микрокомпьютеров, циферблаты электронных часов и цифровых измерительных приборов. Основными преимуществами таких индикаторов являются: хороший контраст при ярком освещении; низкая потребляемая мощность; совместимость с интегральными схемами по рабочим параметрам и конструктивному исполнению; сравнительная простота изготовления и низкая стоимость.

Холестерическая фаза на молекулярном уровне похожа на нематическую. Однако вся её структура дополнительно закручена вокруг оси винта, перпендикулярной молекулярным осям. Шаг винтовой спирали сильно зависит от внешних воздействий. При увеличении температуры спираль развивается, увеличивается расстояние между молекулярными слоями и, соответственно длина волны отражаемого света, который смещается в красную область. Изменение цвета жидкого кристалла при изменении температуры называют **термохромным** эффектом.

В результате получается цветовой термометр, который нашел различные применения. С помощью жидкокристаллических индикаторов можно зарегистрировать изменения температуры в тысячные доли градуса. Цветовые термоиндикаторы с успехом применяются для целей технической и медицинской диагностики. Они позволяют очень просто получить цветовую картину теплового поля. Этот же принцип используется для визуализации инфракрасного излучения и полей СВЧ.

Следует отметить, что в жидких кристаллах для индикации используется окружающий свет, благодаря чему их потребляемая мощность значительно меньше, чем в других индикаторных устройствах, и составляет 10^{-4} – 10^{-6} Вт/см². Это на несколько порядков ниже, чем в светодиодах, порошковых и пленочных электролюминофорах, а также в газоразрядных индикаторах. Недостатками устройств на жидких кристаллах являются невысокое быстродействие, а также подверженность процессам электро- и фотохимического старения.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 1 Какие диэлектрики называют активными? В чём их отличие от пассивных?
- 2 В чём особенности структуры сегнетоэлектриков?
- 3 Как объяснить диэлектрический гистерезис и нелинейность сегнетоэлектриков?
- 4 Что называют сегнетоэлектрической точкой Кюри?
- 5 Назовите наиболее важные применения сегнетоэлектриков.
- 6 Что такое прямой и обратный пьезоэффект? Где и как можно применить эти явления?
- 7 Что такое пироэлектрический эффект? Где и как его применяют?
- 8 Что такое электреты и фотоэлектреты? Где их применяют?
- 9 В чём различие между «жидким» и твёрдым кристаллом?
- 10 Как классифицируют и для чего применяют жидкие кристаллы?
- 11 Какие материалы используют в твёрдотельных лазерах?
- 12 Какие элементы используют в качестве активаторов и сенсibilизаторов лазерных материалов?

3 МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Магнитные свойства вещества обусловлены особенностями внутриатомного движения электронов. Под действием внешнего магнитного поля движение электронов изменяется, и вещество приобретает намагниченность. Некоторые вещества обладают собственной намагниченностью в пределах участков структуры, называемых доменами. Под действием внешнего магнитного поля намагниченность таких веществ изменяет своё направление.

В изотропной (однородной) среде намагниченность J_M , А/м, направлена согласно или встречно напряжённости внешнего магнитного поля H , А/м, и связана с ней соотношением

$$J_M = \pm k_M H,$$

где $\pm k_M$ – магнитная восприимчивость, безразмерная величина, характеризующая способность данного вещества намагничиваться.

Индукция магнитного поля B , Тл, является результатом совместного действия напряжённости внешнего поля H и собственной намагниченности J_M вещества. В изотропном веществе

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J_M = \mu_0 H \pm k_M \mu_0 H = \mu_0 (1 \pm k_M) H = \mu_0 \mu H,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная вакуума;

$\mu = (1 \pm k_M)$ – относительная магнитная проницаемость вещества.

Относительная магнитная проницаемость μ показывает, во сколько раз вещество изменяет (усиливает или ослабляет) магнитное поле по сравнению с полем в вакууме.

В анизотропном кристаллическом веществе намагниченность J_M направлена по одной из осей лёгкого намагничивания кристаллов (подразд. 3.2), а магнитная проницаемость μ зависит от их ориентации относительно внешнего магнитного поля.

3.1 Классификация веществ по магнитным свойствам

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно подразде-

лить на пять групп: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.

К **диамагнетикам** относят вещества, ослабляющие магнитное поле, у которых магнитная восприимчивость отрицательна, а магнитная проницаемость μ меньше 1. Диамагнитный эффект обусловлен небольшим уменьшением скорости вращения электронов при внесении атома в магнитное поле. Это уменьшение оказывает размагничивающее действие и проявляется во всех веществах, однако в большинстве случаев диамагнитный эффект маскируется другими более сильными магнитными эффектами.

Диамагнетиками являются инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и нефтепродукты), большинство полупроводников (кремний, германий, соединения III и V, II и VI главных подгрупп таблицы Менделеева) и органических соединений, щелочно-галоидные кристаллы, неорганические стекла, а также ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и др.). Магнитная проницаемость μ этих веществ незначительно (на 10^{-6} – 10^{-7}) меньше единицы и почти не зависит от температуры.

Ослабляя магнитное поле, диамагнетики выталкиваются из него. Вещества в сверхпроводящем состоянии совсем не пускают внутрь себя магнитное поле ($\mu = 0$) и являются идеальными диамагнетиками.

К **парамагнетикам** относят вещества с малой положительной магнитной восприимчивостью $k_M, = 10^{-3} \dots 10^{-6}$, слегка усиливающие магнитное поле (μ немного большей 1). Атомы парамагнетиков обладают небольшими собственными магнитными моментами. В отсутствие внешнего поля, из-за теплового движения, эти магнитные моменты распределены хаотично, так что в целом намагниченность вещества равна нулю. Под действием внешнего поля магнитные моменты атомов, поворачиваясь в том же направлении, усиливают его на доли процента. Тепловое движение противодействует магнитной упорядоченности, поэтому магнитная проницаемость парамагнетиков заметно зависит от температуры.

Парамагнетиками являются кислород, окись азота, щелочные и щелочноземельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов.

Усиливая магнитное поле, парамагнетики втягиваются в него.

К **ферромагнетикам** относят вещества с очень большой положительной магнитной восприимчивостью. Значение магнитной прони-

цаемости μ некоторых ферромагнетиков может превышать миллион и сильно зависит от напряжённости поля и температуры.

Свойства ферромагнетиков проявляют железо, никель, кобальт и некоторые редкоземельные металлы, атомы которых отличаются очень сильным собственным магнитным моментом. На внешнем электронном уровне этих элементов оказалось несколько электронов, которые определяют их свойства, как металлов. Однако внутренние оболочки этих элементов остались незаполненными и магнитные моменты электронов этих оболочек – нескомпенсированными. В 3-й электронной оболочке атома железа 4 электрона имеют нескомпенсированные магнитные моменты, в результате сложения которых атом железа представляет собой самый сильный из элементарных магнитов. Соседние атомы ферромагнетика спонтанно (самопроизвольно) ориентируют свои магнитные моменты в одном из направлений лёгкого намагничивания кристаллов в пределах области, называемой **доменом**. Магнитные моменты соседних доменов направлены по-разному, так что в общем объёме вещества они компенсируют друг друга, результирующая намагниченность равна нулю и вещество имеет минимум энергии. Однако под воздействием внешних магнитных полей магнитные моменты доменов легко изменяют своё направление, усиливая эти поля в сотни, тысячи, миллионы раз.

Атомы **антиферромагнетиков** также являются элементарными магнитами, однако их магнитные моменты направлены антипараллельно (встречно) и компенсируют друг друга. Магнитная восприимчивость антиферромагнетиков положительна, $k_M = 10^{-3} \dots 10^{-5}$; магнитная проницаемость μ немного больше 1 и сильно зависит от температуры. При нагревании антиферромагнетик переходит в парамагнитное состояние. Температура такого перехода, при которой исчезает магнитная упорядоченность, получила название точки Нееля.

Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Tm и др.). Типичными антиферромагнетиками являются простейшие химические соединения на основе переходных металлов.

В **ферримагнетиках** магнитные моменты также направлены антипараллельно, но это магнитные моменты разных атомов либо ионов, поэтому они не скомпенсированы. Ферримагнетики обладают высокой магнитной проницаемостью (до десятков тысяч), которая, как и у ферромагнетиков, зависит от напряжённости магнитного по-

ля и температуры. Свойствами ферромагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но, главным образом, – различные оксидные соединения, среди которых наибольший практический интерес представляют ферриты.

Диа-, пара- и антиферромагнетики можно объединить в группу слабомагнитных (немагнитных) веществ, тогда как ферро- и ферри-магнетики представляют собой сильномагнитные (магнитные) материалы.

3.2 Доменная структура и намагничивание ферромагнетиков

Экспериментально доказано, что особые свойства ферромагнетиков обусловлены их доменным строением. Это подтверждают фигуры Акулова, которые наблюдают под микроскопом, насыпав тонкий магнитный порошок на поверхность ферромагнитного материала – порошок собирается на границах между доменами. Домены представляют собой макроскопические области, намагниченные практически до насыщения в отсутствие внешнего магнитного поля. Спонтанная (самопроизвольная) намагниченность доменов обусловлена одинаковой ориентацией магнитных моментов всех атомов вдоль одной из осей лёгкого намагничивания кристаллов (рисунок 3.1).

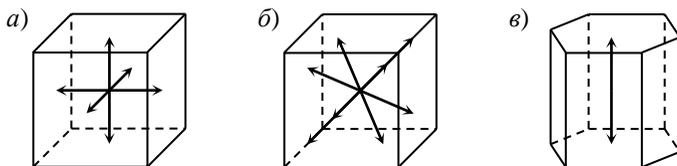


Рисунок 3.1 – Направления легкого намагничивания:
a – железа (шесть); *б* – никеля (восемь); *в* – кобальта (два)

Число таких направлений определяется симметрией решётки. Кубические кристаллы железа имеют шесть направлений лёгкого намагничивания – вдоль рёбер, кубические кристаллы никеля – восемь – по диагоналям куба, а гексагональные кристаллы кобальта – шестигранные призмы – всего два, вдоль оси призмы.

Геометрия доменной структуры ферромагнетика, т. е. характер разбиения его на домены определяется из условия минимума свободной энергии системы. Однодоменное состояние энергетически невыгодно, так как в этом случае на концах ферромагнетика возни-

кают магнитные полюса, создающие внешнее магнитное поле, которое обладает определённой потенциальной энергией (рисунок 3.2, *а*).

Если кристалл состоит из двух доменов с противоположной ориентацией магнитных моментов, то он обладает существенно меньшей магнитостатической энергией (рисунок 3.2, *б*).

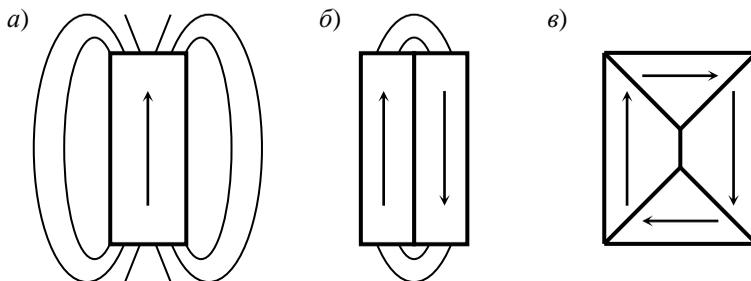


Рисунок 3.2 – Различные доменные структуры ферромагнетиков

Ещё более выгодной является структура с боковыми, замыкающими доменами, показанная на рисунке 3.2, *в*. В этом случае магнитный поток замыкается внутри образца, а за его пределами магнитное поле практически равно нулю. Следует учесть, что рисунки условные (плоские), а домены объёмные и замыкание магнитного потока происходит в трёхмерном пространстве. Размеры доменов составляют от 10^{-7} до 10^{-4} м. Возрастание индукции под действием внешнего поля обусловлено смещением доменных границ и поворотом магнитных моментов доменов (рисунок 3.3).

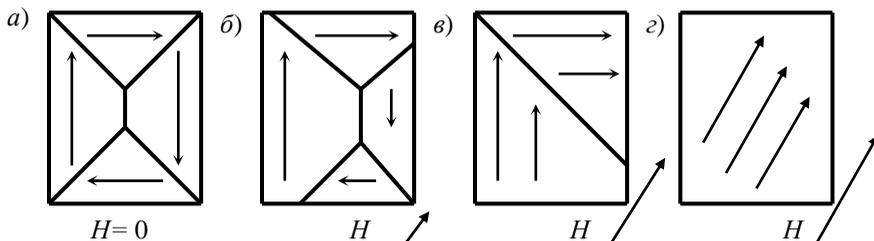


Рисунок 3.3 – Схема изменения ориентации спинов при намагничивании ферромагнетика:

а – поля нет; *б* – слабое поле; *в* – сильное поле; *г* – насыщение

Переходный слой, разделяющий два домена, намагниченные в разных направлениях, называют «стенкой Блоха». В пределах такого слоя происходит постепенное изменение ориентации спинов; плавный переход от одного направления магнитного момента к другому. Толщина стенок Блоха может достигать нескольких сот межатомных расстояний (например, в железе она составляет около 100 нм).

Начальная кривая намагничивания $B(H)$ представляет собой зависимость магнитной индукции предварительно размагниченного ферромагнетика от напряжённости внешнего магнитного поля, полученную при монотонном её увеличении (рисунок 3.4).

По начальной кривой намагничивания $B(H)$ легко определить значение **статической** магнитной проницаемости

$$\mu = B/(\mu_0 H).$$

Она пропорциональна тангенсу угла наклона прямой, проведенной из начала координат через соответствующую точку начальной кривой намагничивания. Зависимость $\mu(H)$ приведена на рисунке 3.4.

Начальному участку I кривой $B(H)$ соответствует упругое (обратимое) смещение доменных границ. Намагниченность получается за счёт увеличения объёма тех доменов, магнитные моменты которых образуют наименьший угол с направлением внешнего поля. Размеры доменов с неблагоприятной ориентацией вектора спонтанной намагниченности при этом уменьшаются. После снятия слабого поля доменные границы возвращаются в прежнее положение; намаг-

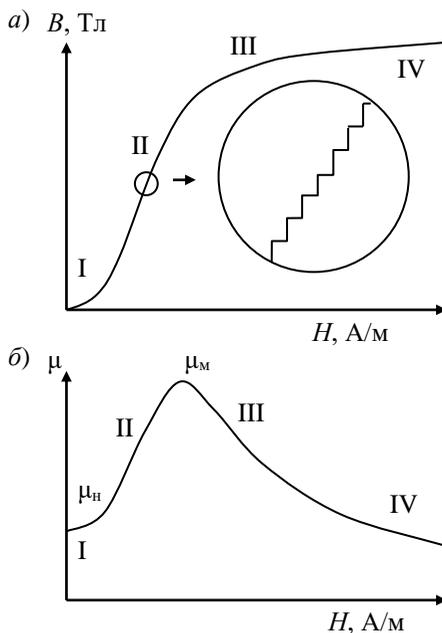


Рисунок 3.4 – Начальная кривая намагничивания (а) и зависимость магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля (б)

ниченность не сохраняется. Магнитная проницаемость вещества в слабых полях называется **начальной** μ_n .

При увеличении напряжённости (участок II) смещение доменных границ приобретает ступенчатый (необратимый) характер. Если намагничиваемый образец поместить внутри катушки, подключенной через усилитель к телефону, то можно слышать отдельные щелчки, обусловленные ЭДС, индуцируемой в катушке при резком изменении направления намагниченности доменов. Ступенчатый характер процесса намагничивания получил название эффекта Баркгаузена. На участке II ступенчатого смещения доменных границ кривая намагничивания $B(H)$ имеет наибольшую крутизну, здесь магнитная проницаемость достигает **максимального** (μ_m) значения.

Участок III более пологий, здесь увеличение напряжённости магнитного поля приводит к повороту намагниченности доменов от направления легкого намагничивания до направления поля, т. е. более трудного намагничивания, при этом магнитная проницаемость снижается. Когда все магнитные моменты доменов ориентированы вдоль поля, наступает магнитное насыщение. Значение **индукции насыщения** B_s соответствует пределу возможной намагниченности материала. Дальнейшее незначительное увеличение индукции на участке IV вызвано только слагаемым $\mu_0 H$ и сопровождается дальнейшим снижением статической магнитной проницаемости μ .

Нагревание ферромагнетика приводит к постепенной тепловой дезориентации спиновых магнитных моментов и уменьшению спонтанной намагниченности. Выше некоторой температуры происходит распад доменной структуры, спонтанная намагниченность исчезает и ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние. Температуру такого перехода называют магнитной точкой Кюри. В момент образования доменов у медленно остывающей стали наблюдается вспышка свечения, вызванная выделением энергии в результате упорядочения структуры. Характер температурной зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика оказывается неодинаковым в слабых и сильных полях. Для начальной μ_n и максимальной μ_m магнитной проницаемости наблюдаются отчётливые максимумы при температуре несколько ниже точки Кюри. Этот термомагнитный эффект используется при записи информации на магнитооптические диски. С усилением напряжённости температурный максимум маг-

нитной проницаемости менее заметен, а при насыщении магнитная проницаемость с увеличением температуры монотонно убывает.

Из всех ферромагнетиков наиболее высокой температурой Кюри ($T_k = 1131\text{ }^\circ\text{C}$) обладает кобальт. У железа она равна $769\text{ }^\circ\text{C}$, у никеля $358\text{ }^\circ\text{C}$, у гадолиния $18\text{ }^\circ\text{C}$.

3.3 Петли гистерезиса и магнитные характеристики материала

Если ферромагнетик намагнитить до насыщения B_s , а затем отключить внешнее поле, то индукция в нуль не обратится, а примет некоторое значение B_r , называемое **остаточной индукцией** (рисунок 3.5). Магнитный гистерезис (от греч. *hysteresis* – отставание) обусловлен процессами ступенчатого изменения намагниченности.

Значение остаточной индукции характеризует способность материала сохранять намагниченное состояние в отсутствии внешних намагничивающих сил. Чтобы скомпенсировать остаточную намагниченность, необходимо приложить внешнее магнитное поле с напряжённостью противоположного направления.

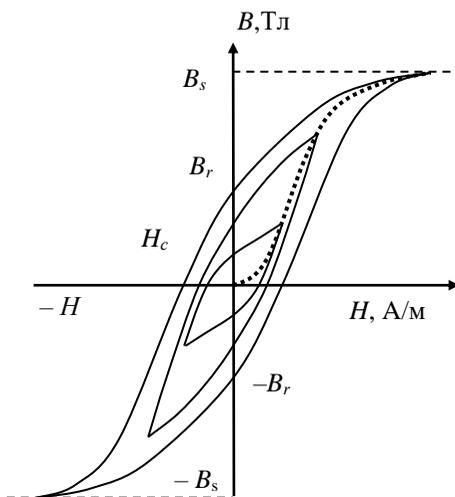


Рисунок 3.5 – Петли гистерезиса и основная кривая намагничивания

Коэрцитивной (сдерживающей) силой называют напряжённость размагничивающего поля H_c , при которой индукция в ферромагнетике, предварительно намагниченном до насыщения, обращается в нуль. Знак « \leftarrow » показывает, что напряжённость внешнего поля направлена навстречу остаточной намагниченности. Увеличение напряжённости поля до значений, больших H_c , вызывает перемагничивание ферромагнетика в обратном направлении вплоть до насыщения $-B_s$. При снятии внешнего поля индукция уменьшится

до $-B_r$. Прикладывая внешнее поле с напряженностью H_c и более, можно намагнитить материал до насыщения B_s . При перемагничивании ферромагнетика от B_s до $-B_s$ и снова до B_s получают **предельную петлю гистерезиса**. Перемагничивание материала не обязательно происходит до насыщения. При различных амплитудных значениях напряжённости внешнего поля получим петли, вершины которых образуют **основную кривую намагничивания** материала, изображённую пунктиром на рисунке 3.5. Для магнитомягких материалов (с малым значением H_c) она практически совпадает с начальной кривой намагничивания, показанной на рисунке 3.4.

Индукция насыщения B_s , остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c , вид и площадь петли гистерезиса являются основными параметрами материала, характеризующими возможности применения его для той или иной цели. Материалы с широкой петлёй гистерезиса используют для постоянных магнитов; узкой – для магнитомягких сердечников, работающих на промышленной и звуковых частотах; линейной – на ультразвуковых и радиочастотах, прямоугольной – для сердечников импульсных трансформаторов и хранения информации.

Работа магнитного материала в переменном поле характеризуется **динамической** магнитной проницаемостью μ_{\sim} . Для её определения используют основную кривую намагничивания и амплитудные значения напряжённости H_m и индукции B_m магнитного поля

$$\mu_{\sim} = B_m / (\mu_0 H_m).$$

Крутизна основной кривой намагничивания в каждой точке характеризуется производной dB_m/dH_m , если магнитная проницаемость определяется через тангенс угла наклона касательной, проведённой через эту точку, то её называют **дифференциальной**.

Нередко ферромагнетик используется при одновременном воздействии сильного постоянного и слабого переменного магнитных полей. Изменение магнитного состояния ферромагнетика в этих условиях характеризуется небольшой частной петлей гистерезиса. Отношение приращения индукции ΔB_{\sim} к приращению напряжённости поля ΔH_{\sim} при фиксированном подмагничивающем поле H_{\sim} называют **реверсивной** магнитной проницаемостью.

Перемагничивание ферромагнетиков в переменных полях сопровождается потерями энергии, вызывающими нагрев материала. Потери на перемагничивание складываются из потерь на гистерезис, на

вихревые токи и магнитное последствие (последним слагаемым обычно можно пренебречь). Потеря энергии на гистерезис в единице объёма вещества (в джоулях на кубический метр) за один цикл перемагничивания равна площади статической петли гистерезиса (полученной при медленном изменении магнитного поля). Мощность потерь на гистерезис пропорциональна частоте.

Вихревые токи возникают в плоскости, расположенной перпендикулярно магнитному полю (рисунок 3.6, *a*) за счёт ЭДС самоиндукции, пропорциональной скорости изменения магнитного потока. Мощность потерь от вихревых токов пропорциональна квадрату частоты. Частотный диапазон применения материала ограничивается именно вихревыми токами. Для уменьшения потерь на вихревые токи необходимо использовать магнитный материал с повышенным удельным сопротивлением и собирать сердечник из тонких листов, изолированных друг от друга (рисунок 3.6, *б*).

Вихревые токи экранируют внутренние слои сердечника, оказывая на него размагничивающее действие. Так как центральные части сердечника охватываются наибольшим числом вихревых токов, значение магнитной индукции там минимально. Вытеснение магнитного поля на поверхность проявляется тем сильнее, чем больше

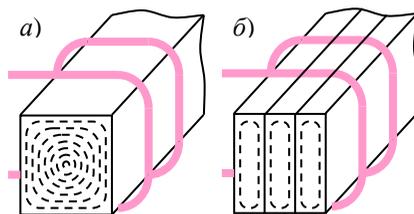


Рисунок 3.6 – Распределение вихревых токов в сердечнике: *a* – сплошном; *б* – шихтованном

частота его изменения, а также магнитная проницаемость и удельная проводимость намагничиваемой среды. Для оценки поверхностного эффекта используют понятие **глубины проникновения** Δ электромагнитного поля в вещество (например, для малоуглеродистой стали, глубина проникновения поля на частоте 50 Гц составляет 0,7 мм, а на частоте 10^6 Гц – всего лишь 0,005 мм).

Поскольку индукция неравномерно распределяется по сечению магнитопровода, для характеристики его свойств в переменных магнитных полях используют усредненную характеристику – эффективную магнитную проницаемость $\mu_{\text{эф}}$. С ростом частоты размагничи-

вающее влияние вихревых токов усиливается, а эффективная магнитная проницаемость уменьшается.

Затухание электромагнитной волны при её распространении в проводящей среде используют при создании электромагнитных экранов, служащих для защиты электронных схем и электроизмерительных приборов от внешних наводок, а также для защиты радиоэфира от помех, создаваемых генераторными устройствами. Для эффективной защиты толщина стенок экрана должна превышать, по крайней мере, глубину проникновения Δ электромагнитного поля в вещество. На радиочастотах практически непроницаемыми являются экраны из хорошо проводящих металлов – меди, латуни и алюминия. Однако на низких частотах такие экраны неэффективны, поскольку необходимы очень толстые стенки (например, на частоте 50 Гц у меди $\Delta = 1$ см). В этих случаях лучше использовать экраны из ферромагнитных материалов, особенно из пермаллоя или альсифера, обладающих весьма высокой магнитной проницаемостью.

Магнитострикция это изменение линейных размеров и формы ферромагнитного образца, вызванное искажениями кристаллической решётки под действием внешнего магнитного поля (рисунок 3.7).

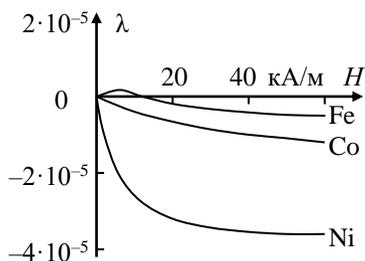


Рисунок 3.7 – Зависимость коэффициента магнитострикции от напряжённости внешнего поля

Внутренние напряжения, возникающие при этом в материале, препятствуют смещению доменных границ и затрудняют намагничивание в слабых полях. Коэффициент магнитострикции $\lambda = \Delta/l$ может быть положительным и отрицательным, т. е. размер образца вдоль намагничивающего поля может как увеличиваться, так и уменьшаться. Численное значение λ зависит от строения кристаллов,

температуры и напряжённости магнитного поля. Большой коэффициент магнитострикции никеля используют в излучателях ультразвуковых колебаний. Сплав железа с никелем – пермаллой – отличается очень высокой магнитной проницаемостью в слабых полях, так как практически не деформируется при намагничивании, ввиду разных

знаков коэффициентов магнитострикции Fe и Ni в левой части графиков рисунка 3.7.

Значение коэффициента магнитострикции λ_s , соответствующее магнитному насыщению, называют **константой магнитострикции**.

3.4 Особенности магнитных свойств ферромагнетиков

Ферромагнетики получили свое название от ферритов, под которыми понимают химические соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов. В настоящее время используют сотни различных марок ферритов, отличающихся по кристаллической структуре, химическому составу, магнитным, электрическим и другим свойствам. От парамагнетиков ферриты отличаются высокой магнитной проницаемостью вследствие доменного строения, от ферромагнетиков – существенно меньшей индукцией насыщения, т. к. магнитоактивные катионы находятся достаточно далеко друг от друга и разделены анионами кислорода.

Теоретическое объяснение особенностей магнитных свойств ферритов впервые было дано Л. Неелем. В соответствии с предложенной им теорией магнетизм ферритов проявляется как нескомпенсированный антиферромагнетизм двух подрешёток, $+J$ и $-J$ (рисунки 3.8). При нагревании ферритоматериала за счёт усиливающегося теплового движения уменьшается намагниченность

каждой из подрешёток. В зависимости от характера спада намагниченностей отдельных подрешёток при нагреве результирующая кривая $J(T)$ для разных материалов может принципиально различаться. При

нагреве некоторых ферритов разностная намагниченность J двух подрешёток может обращаться в нуль при температуре, называемой точкой компенсации T_c (рисунок 3.8, б). Здесь феррит превращается в антиферромагнетик, а при дальнейшем нагреве у него вновь появля-

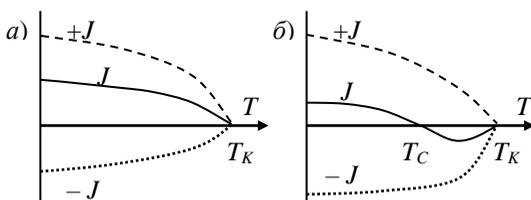


Рисунок 3.8 – Зависимость намагниченности насыщения ферритов от температуры:
а – без точки; б – с точкой компенсации

ется спонтанная намагниченность и он опять становится ферромагнетиком вплоть до точки Кюри T_k .

Частотные свойства ферритов. Благодаря низкой электропроводности и малым потерям на вихревые токи, магнитомягкие ферриты используют на высоких частотах. С увеличением частоты, из-за инерционности смещения доменных границ, магнитная проницаемость снижается, а потери на перемагничивание растут.

Для оценки возможности использования данного материала применяют понятия критической $f_{кр}$ и граничной $f_{гр}$ частот. За критическую обычно принимают такую частоту, при которой тангенс угла потерь $\text{tg}\delta$ возрастает до 0,1. Граничной считают частоту, при которой начальная магнитная проницаемость уменьшается до 0,7 от её значения в постоянном магнитном поле. Как правило, $f_{гр} > f_{кр}$.

Удобной характеристикой для сравнения магнитомягких ферритов по качеству (при заданных значениях индукции B и частоты f) является относительный тангенс угла потерь, под которым понимают отношение $\text{tg}\delta / \mu_n$.

Магнитные эффекты в ферритах СВЧ. Сверхвысокими называют частоты с длиной волны от 1 м до 1 мм. В аппаратуре и приборах, где используются электромагнитные волны диапазона СВЧ, необходимо управлять этими колебаниями: переключать поток энергии с одного направления на другое, изменять фазу колебаний, поворачивать плоскость поляризации волны, частично или полностью поглощать мощность потока.

Электромагнитная энергия СВЧ чаще всего передается по волноводам, представляющим собой полые или частично заполненные твёрдыми материалами металлические трубы. В качестве твёрдых материалов для управления потоком энергии в волноводах используют ферриты СВЧ и некоторые немагнитные активные диэлектрики. Магнитными характеристиками первых можно управлять с помощью внешнего магнитного поля, электрическими свойствами вторых – за счёт внешнего электрического поля.

Практическое применение ферритов СВЧ основано на: а) магнитооптическом эффекте Фарадея; б) эффекте ферромагнитного резонанса; в) изменении значения магнитной проницаемости феррита внешним магнитным полем за счёт нелинейности намагничивания.

Магнитооптический эффект Фарадея заключается в повороте плоскости поляризации высокочастотных колебаний в феррите,

намагниченном внешним полем. При этом энергия коммутируется – переключается в разные каналы.

Ферромагнитный резонанс наблюдается при совпадении частоты внешнего возбуждающего поля с собственной частотой электронов.

При резонансе резко возрастает поглощение энергии электромагнитной волны, распространяющейся в волноводе в обратном направлении; для волны прямого направления поглощение оказывается значительно меньшим. В результате получается высокочастотный вентиль. Вентильные свойства феррита проявляются в довольно узком интервале напряжённости постоянного поля ΔH , называемом шириной линии ферромагнитного резонанса.

3.5 Материалы для постоянных и низкочастотных магнитных полей

Условно магнитомягкими считают материалы, у которых коэрцитивная сила $H_c \ll 800$ А/м. Необходимо, однако, отметить, что у лучших магнитомягких материалов коэрцитивная сила может составлять менее 1 А/м. Основным компонентом большинства магнитных материалов является **железо**. Магнитные свойства различных видов чистого железа и железных сплавов приведены в таблице 3.1.

Среди элементарных ферромагнетиков железо обладает наибольшей индукцией насыщения (около 2,2 Тл). Магнитная проницаемость железа существенно зависит от содержания примесей и при очистке многократно возрастает с одновременным уменьшением коэрцитивной силы.

Технически чистое железо (армко-железо) изготавливают рафинированием (очисткой) чугуна в мартеновских печах или конвертерах, где примеси «выгорают» – окисляются и улетучиваются. Суммарное содержание примесей углерода, серы, марганца, кремния и других элементов в технически чистом железе не превышает 0,08–0,1 %. Вследствие низкого удельного сопротивления технически чистое железо используют в основном для изготовления магнитопроводов постоянного магнитного потока.

Электролитическое железо, содержащее менее 0,05 % примесей, получают путём электролиза раствора сернокислого или хлористого железа. При этом анод из технически чистого железа постепенно растворяется, а осаждённое на катоде железо (толщина

слоя 4–6 мм) после тщательной промывки снимают, измельчают в порошок в шаровых мельницах и подвергают вакуумному отжигу или переплавляют в вакууме.

Особо чистое **карбонильное** железо получают посредством термического разложения пентакарбонила железа согласно уравнению



Пентакарбонил железа представляет собой жидкость – продукт воздействия монооксида углерода на железо при температуре около 200 °С и давлении примерно 15 МПа.

Карбонильное железо имеет вид тонкого порошка, что удобно для изготовления прессованных магнитных сердечников. В карбонильном железе нет кремния, фосфора и серы, но есть углерод.

Свойства железа зависят не только от содержания примесей, но и от структуры материала, размера зёрен, наличия механических напряжений. Из таблицы 3.1 видно, что магнитные свойства даже очищенного железа далеки от свойств чистейшего монокристалла.

Таблица 3.1 – Некоторые свойства магнитомягких материалов

Материал	Магнитная проницаемость		Коэрцитивная сила, А/м	Индукция насыщения, Тл	Удельное сопротивление, нОм·м
	начальная	максимальная			
Технически чистое железо	250–400	3500–4500	50–100	2,18	100
Электролитическое железо	600	15000	30	2,18	98
Карбонильное железо	2–3 тыс.	> 20 тыс.	6,4	2,18	98
Монокристалл чистейшего железа	> 20 тыс.	До 1,5 млн	0,8	–	97
Электротехническая сталь	200–600	3–8 тыс.	10–65	1,95–2,02	200–600
Низконикелевый пермаллой	1,5–4 тыс.	15–60 тыс.	5–32	1,0–1,6	450–900
Высоконикелевый пермаллой	7–100 тыс.	50–300 тыс.	0,65–5	0,65–1,05	160–850
Супермаллой, 79 % Ni; 5 % Mo; 15 % Fe; 0,5 % Mn	100 тыс.	До 1,5 млн	0,3	0,8	600
Альсифер 5,6 % Al; 9,5 % Si остальное Fe	До 35 тыс.	117 тыс.	1,8	–	800

Кремнистая электротехническая сталь является основным магнитомягким материалом массового потребления. Введением в состав этой стали кремния, достигается повышение удельного сопротивления, что вызывает снижение потерь на вихревые токи. Легирование кремнием приводит также к увеличению значений начальной μ_n и максимальной μ_m магнитной проницаемости, уменьшению коэрцитивной силы H_c ; снижению потерь на гистерезис, уменьшению магнитной анизотропии и магнитоstriction. Кроме того, кремний способствует выделению углерода в виде графита и раскислению стали за счёт образования SiO_2 , который выделяется в виде шлака.

Свойства электротехнической стали значительно улучшаются при текстурировании – холодной прокатке с последующим отжигом. При прокатке рёбра кубических кристаллов железа ориентируются преимущественно вдоль направления движения ленты. Отжиг в водородной среде при температуре 900–1000 °С снимает внутренние механические напряжения, а также вызывает рекристаллизацию (укрупнение зёрен). Вдоль направления прокатки магнитная проницаемость существенно больше, а потери на гистерезис меньше. Эффективное использование текстурованных сталей возможно лишь при такой конструкции магнитопровода, когда магнитный поток целиком проходит вдоль направления легкого намагничивания. Легче всего это условие выполняется при использовании ленточных сердечников. Применение ленточных сердечников из текстурованной стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и габаритные размеры на 20–25 %, а в радиотрансформаторах – на 40 %.

Электротехническая сталь выпускается в виде рулонов, листов и ленты толщиной 0,05...1 мм с изоляционным покрытием или без него. С уменьшением толщины листов уменьшаются потери на вихревые токи. Однако в очень тонких листах наблюдается резкое увеличение коэрцитивной силы и потерь на гистерезис.

Тонколистовую электротехническую сталь маркируют 4 цифрами:

- первая (по виду прокатки): 1 – горячекатанная изотропная; 2 – холоднокатанная изотропная; 3 – холоднокатанная анизотропная;
- вторая (по содержанию кремния) – от 0 до 5 % (таблица 3.2);
- третья (по основной нормируемой характеристике) – от 0 до 7;
- четвёртая – порядковый номер стали.

Таблица 3.2 – Удельное сопротивление электротехнической стали

Вторая цифра марки стали	0	1	2	3	4	5
Содержание кремния, %	До 0,4	От 0,4 до 0,8	От 0,8 до 1,8	От 1,8 до 2,8	От 2,8 до 3,8	От 3,8 до 4,8
Удельное сопротивление, нОм·м	140	170	250	400	500	600

Из электротехнической стали разных марок изготавливают магнитные сердечники трансформаторов, измерительных приборов, электрических машин и т. п. Листы тонкого проката предназначены для использования в полях повышенной частоты (до 1 кГц).

Пермаллои — железоникелевые сплавы, обладающие весьма большой магнитной проницаемостью в области слабых полей и очень маленькой коэрцитивной силой. Пермаллои подразделяют на: высоко- и низконикелевые. Высоконикелевые пермаллои содержат от 72 до 80 % никеля, а низконикелевые – от 40 до 50 %. Высоконикелевые пермаллои дороже низконикелевых, у них меньшие значения удельного сопротивления и индукции насыщения, однако магнитная проницаемость значительно выше, чем у низконикелевых.

Наибольшая начальная и максимальная магнитные проницаемости получаются у сплава, содержащего 78,5 % Ni. Очень легкое намагничивание этого сплава в слабых полях вызвано практическим отсутствием у него анизотропии и магнитострикции. Для улучшения магнитных свойств сердечники из высоконикелевого пермаллоя отжигают с последующим медленным остыванием. При ударах и других механических воздействиях свойства сердечников ухудшаются. С целью механической защиты кольцеобразные ленточные сердечники из отожжённого высоконикелевого пермаллоя помещают в немагнитные защитные каркасы из пластмассы или алюминия.

Для придания пермаллоям необходимых свойств в их состав вводят ряд добавок – молибден, хром, медь, кремний, марганец.

Молибден и хром повышают магнитную проницаемость и удельное сопротивление пермаллоев, уменьшают чувствительность к механическим деформациям. Однако одновременно с этим снижается индукция насыщения. Медь увеличивает постоянство μ при изменении напряжённости магнитного поля, повышает температурную стабильность и удельное сопротивление, а также улучшает способность

к механической обработке. Кремний и марганец увеличивают удельное сопротивление.

Пермаллои применяют для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, трансформаторов звуковых и высоких частот, импульсных трансформаторов, дросселей, реле, магнитных усилителей и бесконтактных магнитных реле, а также для магнитных экранов. Диапазон параметров промышленных марок пермаллоев указан в таблице 3.1. Особо интересен сплав супермаллой с уникально высокой магнитной проницаемостью.

Альсиферы – тройные сплавы железа с кремнием и алюминием. Оптимальный состав альсифера: 9,5 % Si, 5,6 % Al, остальное – Fe.

По значениям основных параметров $\mu_n = 35400$; $\mu_m = 117000$; $H_c = 1,8$ А/м; $\rho = 0,8$ мкОм·м) альсиферы близки к высоконикелевым пермаллоям. Важная особенность альсифера заключается в том, что в зависимости от содержания кремния и алюминия его температурный коэффициент магнитной проницаемости может быть положительным, отрицательным или равным нулю. Сплав дешёвый, однако хрупкий, из-за чего изделия из альсифера – магнитные экраны, корпуса приборов и т. п. – изготавливают методом литья с толщиной стенок не менее 2–3 мм.

Благодаря хрупкости альсифер можно размалывать в порошок и использовать в составе высокочастотных сердечников.

3.6 Высокочастотные магнитомягкие материалы

Под высокочастотными понимают магнитомягкие материалы, которые можно использовать при частотах свыше килогерца.

По диапазону применения различают материалы для звуковых и ультразвуковых частот, низких и высоких радиочастот и для СВЧ.

По физической природе и строению высокочастотные магнитомягкие материалы подразделяют на магнитодиэлектрики и ферриты.

Кроме них при звуковых, ультразвуковых и низких радиочастотах можно использовать тонколистовые рулонные холоднокатаные электротехнические стали толщиной 25–30 мкм и пермаллои толщиной до 2–3 мкм, однако они имеют несколько повышенную коэрцитивную силу и высокую стоимость, а технология сборки магнитных цепей из них весьма сложна.

Магнитодиэлектрики получают путём прессования порошка карбонильного железа, альсифера или молибденового пермаллоя со связкой, образующей между зёрнами сплошную электроизоляционную пленку. В качестве связки применяют формальдегидные смолы, полистирол, стекло и другие диэлектрики. Магнитодиэлектрики отличаются стабильностью магнитной проницаемости во времени и при колебаниях температуры, малыми потерями на гистерезис и вихревые токи, а также имеют линейную зависимость индукции от напряжённости, однако значение их магнитной проницаемости невелико (10–250).

Из магнитодиэлектриков изготавливают сердечники для индуктивных катушек фильтров, генераторов, контуров радиоприёмников и трансформаторов звуковых и ультразвуковых частот. Сердечники на основе карбонильного железа отличаются достаточно высокой стабильностью, малыми потерями на гистерезис и вихревые токи, и используются в широком диапазоне частот. Альсиферовые магнитодиэлектрики самые дешёвые. Магнитодиэлектрики из молибденового пермаллоя имеют наибольшую магнитную проницаемость и наименьшие потери на гистерезис и вихревые токи.

Высокая стабильность магнитных свойств и линейность характеристики намагничивания являются преимуществами магнитодиэлектриков перед другими магнитомягкими материалами.

Ферриты представляют собой соединения окида железа Fe_2O_3 с оксидами переходных металлов (магнитных и немагнитных) в виде керамики и монокристаллов. По типу кристаллической решётки различают феррошпинели, феррогранаты, гексаферриты и ортоферриты. Магнитные свойства ферритов обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом элементов, составляющих решётку. Их широко применяют в радиоэлектронных изделиях благодаря большому (до 10^7 Ом·м) удельному сопротивлению. Для ферритов характерна относительно большая диэлектрическая проницаемость ϵ , зависящая от состава (у марганец-цинковых ферритов значение ϵ может достигать 1000). С повышением частоты диэлектрическая проницаемость всех марок ферритов уменьшается.

При изготовлении **ферритовой керамики** исходную смесь оксидов подвергают тщательному измельчению и перемешиванию в шаровых или вибрационных мельницах тонкого помола. Из полученной массы прессуют брикеты или гранулы, которые затем обжигают с

целью ферритизации – образования кристаллитов. Ферритизованный продукт вновь измельчают. Полученный таким образом ферритовый порошок пластифицируют поливиниловым спиртом или парафином и формуют из него изделия методом прессования в стальных пресс-формах. Отформованные изделия спекают при температуре 1100–1400 °С. В процессе спекания завершаются химические реакции образования кристаллитов, происходит их укрупнение, устраняется пористость, фиксируется форма изделий. Стоимость ферритовой керамики невелика.

Монокристаллы ферритов выращивают газоплазменным методом Вернейля.

Монокристаллы феррогранатов обычно получают кристаллизацией из раствора-расплава с применением оксифторида свинца $PbO+PbF_2$ в качестве растворителя.

Ферриты являются твёрдыми и хрупкими материалами, допускающими только шлифовку и полировку абразивными инструментами из порошка карбида кремния или синтетических алмазов.

Магнитомягкими ферритами являются марганец-цинковые, никель-цинковые, литий-цинковые, магниевые и некоторые другие ферриты, а также иттриевые ферриты – феррогранаты. Маркировка магнитомягких ферритов содержит численное значение начальной магнитной проницаемости μ_n , затем буквы НМ (низкая частота, марганец-цинковый), НН (низкая частота, никель-цинковый), либо буквы ВЧ (высокая частота) с цифрой, если это феррит СВЧ. Область применения различных марок ферритов зависит от магнитной проницаемости и рабочей частоты. Марганец-цинковые ферриты имеют наибольшие значения магнитной проницаемости (начальной μ_n – до 15 тысяч, максимальной μ_m – до 35 тысяч), а также индукции насыщения и температуры Кюри, но значения удельного сопротивления и рабочих частот невелики. Никель-цинковые ферриты отличаются более высоким удельным сопротивлением и лучшими частотными свойствами, но их магнитная проницаемость меньше (для марок НН μ_n достигает 800, μ_m – до 1500; для марок ВЧ μ_n – до 220, μ_m – до 360). У сверхвысокочастотных ферритов магнитная проницаемость ещё меньше.

Применение ферритов. Магнитомягкие ферриты широко применяются в качестве сердечников контурных катушек постоянной и переменной индуктивности; фильтров в аппаратуре радио- и провод-

ной связи, сердечников импульсных и широкополосных трансформаторов, трансформаторов развертки телевизоров, магнитных модуляторов и усилителей. Из них изготавливают также стержневые магнитные антенны, индуктивные линии задержки и другие детали и узлы электронной аппаратуры. Частотный диапазон применения различных марок ферритов определяется значениями критической $f_{кр}$ и граничной $f_{гр}$ частот. На частотах до 10^6 Гц применяют марганец-цинковые ферриты (НМ), а на частотах от 10^5 до 10^8 Гц – никель-цинковые (НН и ВЧ). На сверхвысоких частотах применяют магний-марганцевые ферриты с большим содержанием оксида магния, литий-цинковые ферриты и ферриты сложного состава (полиферриты), а в инфракрасном диапазоне – феррогранаты иттрия ($Y_3Fe_5O_{12}$) с частичным замещением ионов иттрия и железа ионами лантанидов и других металлов.

Марганец-цинковые ферриты с начальной магнитной проницаемостью 5000–15000 в слабых полях во многих случаях эффективно заменяют листовые ферромагнитные материалы – пермаллои и электротехническую сталь. В средних и сильных магнитных полях замена листовых ферромагнетиков ферритами нецелесообразна, поскольку у ферритов меньше индукция насыщения.

Монокристаллы магнитомягких ферритов нашли широкое применение при изготовлении магнитных головок для записи, воспроизведения и стирания аудио- и видеосигналов в магнитофонах. По сравнению с металлическими, ферритовые головки обладают большим удельным сопротивлением (что важно для уменьшения потерь) и большей твёрдостью.

3.7 Магнитные материалы с прямоугольной петлёй гистерезиса и магнитострикционные

Магнитные материалы с прямоугольной петлёй гистерезиса (ППГ) широко применяются в устройствах автоматики, вычислительной техники и связи. Прямоугольной петлёй гистерезиса обладают магний-марганцевые и литиевые ферриты со структурой шпинели, а также пермаллои с добавками марганца, содержащие в обозначении марки букву П. Сердечники импульсных трансформаторов с ППГ позволяют сформировать импульс тока из синусоидально изменяющегося напряжения или импульс напряжения из синусоидаль-

но изменяющегося тока. В случае передачи импульса через такой трансформатор прямоугольная петля гистерезиса сердечника способствует увеличению крутизны его фронтов. Сердечники из материала с ППГ имеют два устойчивых магнитных состояния, соответствующих различным направлениям остаточной магнитной индукции. Именно благодаря этой особенности их использовали в качестве элементов для хранения и переработки двоичной информации.

Основным параметром материала с ППГ является коэффициент прямоугольности петли $K_{\text{пу}}$, представляющий собой отношение остаточной индукции B_r к максимальной B_m , измеренной при $H = 5H_c$. Желательно, чтобы $K_{\text{пу}}$ был возможно ближе к единице. Для обеспечения быстрого перемагничивания сердечников они должны также иметь небольшой коэффициент переключения S_q , численно равный количеству электричества на единицу толщины сердечника, которое необходимо для перемагничивания его из одного состояния остаточной индукции в противоположное состояние максимальной индукции. Кроме того, материалы с ППГ должны обеспечивать малое время перемагничивания и возможно большую температурную стабильность магнитных характеристик.

Ферриты с ППГ в практике распространены шире, чем тонкие металлические ленты. Это объясняется тем, что технология изготовления ферритовых сердечников наиболее проста и экономична. Ферриты, предназначенные для коммутационных и логических элементов, имеют малое значение коэрцитивной силы (10–20 А/м), а используемые для хранения дискретной информации – повышенное (100–300 А/м). Прямоугольность петли гистерезиса феррита достигается путём выбора химического состава и условий спекания. При использовании ферритов следует учитывать изменение их свойств от температуры. При возрастании температуры от минус 20 до плюс 60 °С коэрцитивная сила у ферритов различных марок уменьшается в 1,5–2 раза, остаточная индукция – на 15–30 %, коэффициент прямоугольности – на 5–35 %. В микроминиатюрных электронных приборах используют плёнки из ферритов с ППГ, наносимые на подложки методом напыления в вакууме.

Ленточные микронные сердечники из **пермаллоев с ППГ** имеют лучшие магнитные свойства и более высокую температурную стабильность по сравнению с ферритовыми. В интервале температур от минус 20 до плюс 60 °С их свойства практически не изменяются.

Однако технология изготовления сердечников из ленты (прокатка до микронной толщины и термообработка, требующая вакуума или атмосферы инертного газа) значительно сложнее, чем спекание их из ферритов.

Магнитоотрицательные материалы. Магнитоотрицательными называют магнитные материалы, применение которых основано на явлении магнитоотрицательности и магнитоупругом эффекте, т. е. изменении размеров тела в магнитном поле и магнитных свойств материала под влиянием механических воздействий.

В качестве магнитоотрицательных материалов применяют чистые металлы, сплавы и различные ферриты. До начала 1960-х годов наиболее широко применяемым материалом для ультразвуковых излучателей являлся никель (константа магнитоотрицательности около $-3 \cdot 10^{-5}$); частично он сохраняет свое значение и в настоящее время, хотя постепенно вытесняется другими магнитоотрицательными материалами, а также пьезоэлектрической керамикой. Ценными свойствами никеля являются высокая стойкость к коррозии и малый температурный коэффициент модуля упругости.

Большой константой магнитоотрицательности (более 10^{-4}) обладает сплав платины с железом, однако он очень дорогой. У железокобальтовых (50 % Fe, 50 % Co) и железоалюминиевых (13 % Al, 87 % Fe, альфер) сплавов значения константы магнитоотрицательности меньше (соответственно, $7 \cdot 10^{-5}$ и $4 \cdot 10^{-5}$). Их недостатками являются хрупкость, затрудняющая механическую обработку, а также низкая антикоррозионная устойчивость, препятствующая использованию таких преобразователей в водной среде. Ферриты кобальта $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, железа $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и никеля $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ имеют следующие значения констант магнитоотрицательности: $-2 \cdot 10^{-4}$, $4 \cdot 10^{-5}$ и $-2 \cdot 10^{-5}$. Они очень устойчивы к коррозии, а благодаря высокому удельному сопротивлению являются высокочастотными материалами; их используют в виде монокристаллов либо в виде керамики. Наиболее широкое применение нашла магнитоотрицательная керамика на основе феррита никеля.

Из магнитоотрицательных материалов изготавливают сердечники электромеханических преобразователей (излучателей и приёмников) для электроакустики и ультразвуковой техники, сердечники электромеханических и магнитоотрицательных фильтров и резонаторов, линий задержки. Их используют также в качестве чувствительных

элементов магнитоупругих преобразователей, применяемых в устройствах автоматики и измерительной техники.

3.8 Материалы для постоянных магнитов

Постоянные магниты изготавливают из магнитотвёрдых материалов с широкой петлёй гистерезиса. Условно считают магнитотвёрдыми материалы с коэрцитивной силой $H_c > 4$ кА/м, однако, у лучших магнитотвёрдых материалов её значение достигает тысяч килоампер на метр. Свойства магнитотвёрдых материалов характеризуются кривой размагничивания, которая представляет собой «спинку» предельной петли гистерезиса – участок кривой между точками, соответствующими значениям остаточной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c (см. рисунок 3.5). Наилучшее использование магнита получается в той точке, для которой произведение индукции B на напряжённость H магнитного поля максимально. Разделив произведение BH_{\max} на два, получим максимальное значение энергии, которую может запасти единица объёма намагниченного материала

$$W_{\max} = BH_{\max}/2.$$

Максимальное значение удельной запаасаемой энергии W_{\max} выражается в килоджоулях на кубический метр и является наиболее важной характеристикой качества материалов, используемых для изготовления постоянных магнитов. Часто в справочниках указывается не W_{\max} , а максимальное произведение BH_{\max} , кДж/м³.

Для первых постоянных магнитов использовали стали, закаливаемые на мартенсит (углеродистые, легированные Cr, W, Co). Они обладают малыми H_c (4–12 кА/м) и W_{\max} (0,6–1,4 кДж/м³).

Литые магниты из высококоэрцитивных сплавов Fe-Ni-Al (альни) и Fe-Ni-Co-Al (альнико) имеют хорошие магнитные свойства и недороги. В тройной системе Fe+Ni+Al наибольшей удельной магнитной энергией обладает сплав, содержащий около 28 % Ni и 14 % Al (по массе), что соответствует интерметаллическому соединению Fe₂NiAl. Для улучшения в него добавляют кобальт, медь, титан и ниобий, а также подвергают текстурированию. Кристаллографическое текстурирование заключается в создании столбчатой макроструктуры путём направленной кристаллизации сплава за счёт особых условий теплоотвода. Магнитная текстура создается за счёт кристаллизации в

сильном магнитном поле, при этом оси легкого намагничивания кристаллов ориентируются в направлении поля. Магнитное текстурирование эффективно лишь для сплавов с высоким содержанием кобальта. Сочетание кристаллографической и магнитной текстур в литых магнитотвёрдых магнитах Fe+Ni+Co+Al позволяет поднять значение запасаемой энергии до 42 кДж/м³, коэрцитивной силы до 145 кА/м, а остаточной индукции до 1,4 Тл. Недостатком литых магнитов из высококоэрцитивных сплавов типа Fe+Ni+Al и Fe+Ni+Co+Al является трудность изготовления изделий точных размеров. Вследствие хрупкости и высокой твёрдости; из всех видов механической обработки они допускают обработку только путём шлифования.

Рабочая температура литых магнитов – до 550 °С.

Ферритовые магниты. Для постоянных магнитов используют бариевые и стронциевые ферриты с гексагональной кристаллической решеткой и кобальтовый феррит со структурой шпинели. Они характеризуются сравнительно низкими значениями B_r (0,19–0,42 Тл), весьма высокими H_c (130–350 кА/м) и W_{max} (3–18 кДж/м³) и высоким удельным электрическим сопротивлением, что позволяет применять их при высоких частотах переменного поля. Основные недостатки ферритовых магнитов – высокая твердость, хрупкость и ограниченный температурный диапазон использования. Наибольшее применение нашёл бариевый феррит $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ (ферроксдюр).

Промышленность выпускает два вида бариевых магнитов: марок БИ (бариевые изотропные) и марок БА (бариевые анизотропные). Технология производства магнитотвёрдых ферритов в общих чертах подобна технологии производства магнитомягких ферритов. Однако, чтобы получить мелкокристаллическую структуру, помол выполняют очень тонко (как правило, в водной среде), а спекают при относительно невысоких температурах (во избежание процесса рекристаллизации). Для изготовления анизотропных магнитов порошок бариевого феррита текстурируют. При этом изделие формируется из массы сметанообразной консистенции в сильном магнитном поле (с напряжённостью 650–800 кА/м). Отключение поля производится только после полного удаления из прессуемого порошка влаги и достижения необходимого давления в пресс-форме.

Магниты из феррита бария имеют коэрцитивную силу, достигающую 240 кА/м, что выше, чем у литых магнитов (145 кА/м), однако по остаточной индукции (0,38 Тл) и запасённой магнитной энергии

(12,4 кДж/м³) они уступают высококоэрцитивным сплавам (1,4 Тл и 40 кДж/м³). Бариевые магниты удобно изготавливать в виде шайб и тонких дисков, они отличаются высокой стабильностью по отношению к воздействию внешних магнитных полей и не боятся тряски и ударов. Плотность бариевого феррита 4,4–4,9 Мг/м³, что примерно в 1,5–1,8 раза меньше, чем плотность у литых сплавов (~7,3–7,8 Мг/м³); магниты получаются лёгкими. Удельное сопротивление бариевого феррита 10⁴–10⁷ Ом·м, его можно использовать при высоких частотах. По стоимости бариевые магниты дешевле литых почти в 10 раз. К недостаткам бариевых магнитов следует отнести низкую механическую прочность, большую хрупкость, сильную зависимость магнитных свойств от температуры. Кроме того, они обнаруживают необратимое изменение магнитных свойств после охлаждения до низких температур (–60 °С).

Кобальтовые магниты характеризуются большей температурной стабильностью по сравнению с бариевыми, однако стоят дороже.

Лучшими характеристиками обладают стронциевые магниты – запасённая энергия до 21 кДж/м³, остаточная индукция – до 0,45 Тл, коэрцитивная сила – до 400 кА/м.

Металлокерамические магниты получают путём прессования порошка, состоящего из измельчённых тонкодисперсных магнитотвёрдых сплавов, и дальнейшим спеканием при высоких температурах в присутствии жидкой фазы по аналогии с процессами обжига керамики. Для этих целей широко применяются интерметаллические соединения металлов группы железа с редкоземельными металлами. Распространены бинарные сплавы "редкая земля – кобальт", например SmCo₅ и квазибинарные соединения "2–17" типа R₂(CoFe)₁₇, где R означает РЗМ. На основе таких сплавов разработаны **самариевые и ниобиевые** магниты с высокими значениями H_c (640–1300 кА/м) и W_{max} (55–80 кДж/м³) при достаточно высоких B_r (0,77–1,0 Тл) и удовлетворительных характеристиках температурной стабильности. Магниты на основе SmCo₅ спекают при температуре порядка 1100 °С; жидкая фаза образуется за счёт сплава Sm+Co, добавляемого в определенных пропорциях в состав порошковой смеси. Мелкие детали при такой технологии получают достаточно точных размеров и не требуют дальнейшей обработки. Недостатки этих материалов – высо-

кая твердость, хрупкость, дороговизна. Применяют их в основном там, где важно снижение массы и габаритных размеров магнитов.

Более перспективными являются составы типа "редкая земля – железо – бор", например $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, $(\text{YEr})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Такие магнитные материалы не только обладают высокими значениями максимальной запасаемой энергии, но и значительно дешевле, чем SmCo_5 . Спеченные магниты из сплавов неодим – железо – бор имеют W_{max} от 85 до 180 кДж/м³, B_r от 1 до 1,4 Тл, H_c от 880 до 2700 кА/м и верхний предел рабочей температуры от 80 до 240 °С.

Металлопластические магниты прессуют из порошка в виде зёрен измельчённого магнитотвёрдого сплава, перемешанного со связующим веществом (магнитопласты). Если связующим является каучук, такие материалы называют магнитоэластами. Из-за жесткого наполнителя при прессовке необходимы высокие давления, достигающие до 500 МПа. Магнитные свойства металлопластических магнитов довольно низкие. По сравнению с литыми и магнитокерамическими магнитами коэрцитивная сила ниже на 10–15 %, остаточная индукция – на 35–50 %, а значение запасаемой энергии – на 40–60 %, что объясняется большим содержанием (до 30 %) немагнитного связующего вещества. Их рабочая температура не превышает 150 °С.

Порошковые магниты экономически выгодны при массовом автоматизированном производстве, сложной конфигурации и небольших размерах магнитов. Металлопластическая технология позволяет изготавливать магниты с арматурой.

Магнитотвёрдыми являются сплавы Fe+Ni+Cu (кунифе), Co+Ni+Cu (кунико), Fe+Co+V (викаллой), Fe+Cr+Co, а также сплавы Co с благородными металлами (например Pt, Ir, Pd). Они отличаются пластичностью, из них можно прокатать тонкую ленту и вытянуть тонкую проволоку, что использовалось при первых способах магнитной записи информации. Из-за высокой стоимости их применяют только для изготовления сверхминиатюрных магнитов и тонких плёнок магнитных лент и дисков (подразд. 3.9).

Для наномангнитов разработаны композиты SmCo_5+Fe , представляют важный класс материалов для постоянных магнитов высокой мощности. SmCo_5 обеспечивает высокие коэрцитивную силу и температуру Кюри, а железо – большую намагниченность. Чтобы достичь высокой коэрцитивной силы в изотропных двухфазных системах размер магнитомягких зёрен железа Fe должен быть порядка 10 нм.

3.9 Магнитные плёнки для записи информации

Магнитные плёнки на лентах и дисках, используемых для записи звуковой, видео- и компьютерной информации, относятся к числу магнитотвёрдых материалов. Сохранению записанной информации способствует выпуклая, близкая к прямоугольной, форма кривой намагничивания. Доменные структуры в тонких магнитных плёнках имеют особенности. Если направление легкого намагничивания расположено в плоскости плёнки, в ней образуются плоские домены. Для очень тонких плёнок характерна однодоменная структура, для плёнок толщиной свыше 10^{-3} – 10^{-2} мм (у различных веществ) – многодоменная, состоящая из длинных узких доменов (шириной от долей микрометров до нескольких микрометров), намагниченных в противоположных направлениях. Под воздействием внешнего поля вся система полос может перемещаться и поворачиваться, и её используют как управляемую дифракционную решётку для света и ближайшего диапазона электромагнитных волн.

Особый интерес представляют плёнки материалов, кристаллы которых имеют лишь одну ось лёгкого намагничивания. Если эти оси перпендикулярны плоскости плёнки, то, в отсутствие внешнего поля, в ней возникает лабиринтная доменная структура. Внешнее поле, направленное поперёк плёнки легко изменяет форму и размер доменов. По мере увеличения напряжённости поля происходит разрыв лабиринтной структуры и образуются устойчивые цилиндрические магнитные домены (ЦМД), или «магнитные пузырьки». Впервые ЦМД были обнаружены в ортоферритах, обладающих орторомбической структурой и имеющих химический состав $RFeO_3$, где R – трёхвалентный ион иттрия или другого редкоземельного элемента. В дальнейшем устойчивые цилиндрические магнитные домены были получены в ферритах со структурой граната, гексаферритах и некоторых металлических магнитных плёнках. Линейные размеры ЦМД в ортоферритах составляют десятки микрон, в плёнках феррогранатов – единицы микрон, в металлических плёнках – доли микрона.

Магнитные ленты изготавливают нанесением магнитного лака на тонкую плёнку полимера. Подавляющее большинство магнитных лент изготавливают на основе полиэтилентерефталата (лавсана), обладающего высокой механической прочностью. Магнитный лак состоит из магнитного порошка, связующего вещества, летучего рас-

творителя и различных добавок, способствующих смачиванию и разделению частиц порошка и уменьшению абразивности рабочего слоя. Содержание магнитного порошка в жидком лаке составляет около 30–40 % (по объёму). Частицы магнитного порошка имеют сильно вытянутую форму, средняя длина около 1 мкм при диаметре порядка 0,1 мкм. Для ориентации этих частиц вдоль направления, в котором они будут намагничиваться при записи, сразу после нанесения магнитного лака ленту помещают в сильное магнитное поле. Высушенную широкую пленку разрезают специальными дисковыми ножницами на ленты нужной ширины. Для устранения неровностей на поверхности рабочего слоя ленту подвергают каландрированию, т. е. пропускают её между нагретыми полированными металлическими вальцами – каландрами.

В качестве магнитного компонента наиболее часто используют порошок гамма-оксида железа $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематита) коричневого цвета с мелкими однодоменными частицами. Его получают окислением магнетита Fe_3O_4 при нагревании на воздухе до температуры около 250 °С. Добавка магнетита Fe_3O_4 к порошку $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ позволяет получить материал с повышенной коэрцитивной силой (20–50 кА/м).

Качественный скачок в технике магнитной записи произошел в результате использования магнитных плёнок на основе диоксида хрома CrO_2 (чёрного цвета). Это соединение также обладает свойствами ферромагнетика и позволяет получать магнитоактивные слои с более высокой, чем у $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, коэрцитивной силой и повышенной чувствительностью к высоким частотам. Преимуществом лент из диоксида хрома является также малая электризуемость рабочего слоя.

Плётка с двойным магнитным слоем, состоящим из чередующихся окислов $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и CrO_2 , сочетает высокочастотные свойства, присутствующие диоксиду хрома, с хорошим воспроизведением низкочастотного спектра, что свойственно лучшим плёткам с $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Благодаря малой общей толщине рабочего слоя и полимерной подложке такие ленты удобны для применения в диктофонах и микрокассетных магнитофонах и дискетах. Ещё лучше магнитные пленки с покрытием из феррит-гранатов $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и ортоферритов RFeO_3 .

Наилучшими магнитными свойствами, необходимыми для записи и воспроизведения информации, обладают плётки из мельчайших частиц химически чистого кобальта или ферромагнитных сплавов, однако они значительно дороже, чем феррооксидные материалы.

Нанесение металлического слоя на лавсановую или иную подложку осуществляется методами химического восстановления, электроосаждения или испарением-конденсацией в вакууме. Кроме кобальта и пластичных магнитотвёрдых сплавов, перечисленных в подразд. 3.8, наиболее перспективным считается сплав железа с платиной.

В настоящее время считывание информации с магнитной пленки происходит за счёт эффекта GMR (гигантского магнитного сопротивления). Материал считывающей головки – чередующиеся слои железа и хрома нанометровой толщины (до 50 слоёв). Перспективным направлением улучшения считывающих головок является применение **магнитоэлектриков**, у которых под действием магнитного поля происходит изменение электрической поляризации и возникает ЭДС. Гигантский магнитоэлектрический эффект открыт в тонких пленках феррита висмута BiFeO_3 , называемого также ВФО.

Исследуются перспективы записи информации на магнитные плёнки путём воздействия электрического поля. Здесь перспективны композиции феррита висмута BiFeO_3 и ферромагнитного сплава $\text{Co}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 1 Что такое магнитная проницаемость?
- 2 Как классифицируют вещества по магнитным свойствам?
- 3 Какова роль доменов в процессе намагничивания материалов?
- 4 В чём разница между начальной и основной кривыми намагничивания?
- 5 В чём разница между статической и динамической магнитными проницаемостями?
- 6 Для чего магнитопроводы изготавливают из отдельных пластин?
- 7 Что такое магнитострикция? Назовите магнитострикционные материалы?
- 8 В чём особенности намагничивания ферритов?
- 9 Какие магнитные материалы применяют в постоянных и низкочастотных полях?
- 10 Назовите и охарактеризуйте высокочастотные магнитные материалы.
- 11 Для чего применяют материалы с ППГ?
- 12 Из чего изготавливают постоянные магниты?
- 13 Какие магнитные материалы используют для записи информации?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Пасынков, В. В.** Материалы электронной техники : учеб. для вузов / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – 3-е изд. – СПб. : Изд-во «Лань», 2001. – 368 с. – ISBN 5-8114-0409-3.

2 **Богородицкий, Н. П.** Электротехнические материалы : учеб. для вузов / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – 7-е изд. – Л. : Энергоиздат, 1985. – 304 с.

3 **Журавлёва, Л. В.** Электроматериаловедение : учеб. для НПО / Л. В. Журавлёва. – 4-е изд., перераб. и испр. – М. : Академия, 2006. – 336 с.

4 **Перерва, Г. И.** Электротехнические материалы / Г. И. Перерва. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 80 с.

5 **Справочник по электрическим материалам** / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – Л. : Энергоиздат, 1988. – Т. 1–3.

6 **Электротехнические и конструкционные материалы** : учеб. пособие для СПО / В. Н. Бородулин [и др.] ; под ред. В. А. Филикова. – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2005. – 280 с.

7 **Герасимов, В. Г.** Электротехнический справочник : в 4 т. / В. Г. Герасимов. – 9-е изд., испр. и доп. – М. : Энергоиздат, 2007. – Т. 1: Общие вопросы. Электротехнические материалы. – 440 с.

8 **Алиев, И. И.** Электротехнические материалы и изделия : справочник / И. И. Алиев, С. Г. Калганова. – М. : Энергоиздат, 2006. – 352 с.