

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Радиофизический факультет

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

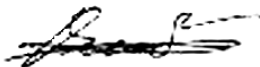
Часть 2. Характеристики радиоматериалов

Учебно-методическое пособие

Томск
2011

РАССМОТРЕНО и РЕКОМЕНДОВАНО методической
комиссией радиофизического факультета
Протокол № 5 от «19» декабря 2011 г.

Председатель комиссии



В.В. Демин

В настоящем пособии рассмотрены электромагнитные и физико-химические характеристики радиоматериалов, применяющихся в современной радиоэлектронике. Приведены справочные данные, отражающие свойства радиоматериалов.

Для проведения практических и лабораторных занятий по курсу «Радиоматериалы и радиокомпоненты».

СОСТАВИТЕЛЬ – доцент О.А. Доценко

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время увеличиваются масштабы применения радиотехнических систем и систем телекоммуникаций. Составной частью этих систем является радиоэлектронная аппаратура (РЭА), содержащая огромное количество радиокомпонентов, при изготовлении которых применяют современные радиоматериалы. Повышение эффективности систем и улучшение параметров РЭА невозможно без совершенствования элементной базы РЭА, разработки и освоения новых радиоматериалов. Именно радиоматериалы и радиокомпоненты позволяют успешно воплотить в жизнь многие инженерные решения при создании сложнейшей РЭА.

Существенные изменения в развитии компонентной базы РЭА происходят благодаря развитию электроники – науки о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется для преобразования электромагнитной энергии, передачи, обработки и хранения информации. Успехи электроники в значительной мере обусловлены развитием радиотехники. Обе области развиваются в тесной взаимосвязи, поэтому их часто объединяют и называют радиоэлектроникой.

Электроника проникла во все отрасли современной науки, техники, промышленности. Электронные приборы используются в автоматике, телемеханике, проводной связи, атомной и ракетной технике, астрономии, метеорологии, медицине, биологии и т.д.

Применение электронных устройств позволяет проводить разнообразные исследования и измерения, в частности такие, которые сами не имеют ничего общего с электроникой. Электронные усилители, генераторы, выпрямители, осциллографы, измерительные приборы и другие устройства являются мощными средствами для научных исследований, автоматизации и контроля производственных процессов. Методы электроники значительно улучшили изучение свойств многочисленных веществ, существующих в природе, позволили глубже познать строение материи.

1. ОБЩИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

1.1. Введение

Радиотехнические материалы (РТМ) – материалы, которые имеют специфическое назначение в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА), отличаются явно выраженными свойствами при воздействии на них электрического и магнитного полей. Принято разделять все радиотехнические материалы по электрическим и магнитным свойствам (табл. 1.1, 1.2).

По электрическим свойствам все материалы можно разбить на четыре класса. По магнитным свойствам все материалы можно разделить на шесть классов.

Т а б л и ц а 1.1

Классификация РТМ по электрическим свойствам

Класс материала	Диапазон удельных сопротивлений, Ом·м
Сверхпроводники	$\rho \sim 0$
Проводники	$\rho \sim 10^{-8} - 10^{-5}$
Полупроводники	$\rho \sim 10^{-6} - 10^7$
Диэлектрики	$\rho \sim 10^7 - 10^{18}$

Т а б л и ц а 1.2

Классификация РТМ по магнитным свойствам

Класс материала	Значения магнитных проницаемостей
Сверхпроводники	$\mu = 0$
Диамагнетики	$\mu < 1; \mu \approx 1$
Парамагнетики	$\mu > 1; \mu \approx 1$
Антиферромагнетики	$\mu > 1; \mu \approx 1$
Ферримагнетики	$\mu \gg 1; \mu \sim 10^1 - 10^4$
Ферромагнетики	$\mu \gg 1; \mu \sim 10^2 - 10^6$

В РЭА широко используются магнитные материалы, обладающие значительными магнитными проницаемостями, то есть ферро- и ферримагнетики. По электрическим свойствам, ферромагнетики – это проводники, а ферримагнетики – полупроводники или диэлектрики.

В рамках данного учебного пособия рассмотрены общие понятия материаловедения, а отдельные материалы и устройства фигурируют в качестве примеров. Относительно подробно (в отдельных раз-

делах) рассмотрены три вида пассивных компонентов – резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности, которые в своей основе используют соответственно, проводящие, диэлектрические и магнитные свойства материалов.

1.2. Характеристики и параметры материалов

Характеристика материала – это функциональная зависимость между некоторым воздействием на материал F_0 и реакцией R материала на это воздействие.

Воздействующих на материал факторов может быть несколько, но чаще всего пользуются одномерными характеристиками. Если, например, исследуется влияние на материал двух воздействий F_0 и F_1 , то результат представляется в виде семейства характеристик, вдоль которых один из факторов полагается равным постоянной величине (рис. 1.1).

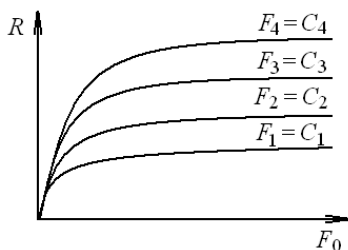


Рис. 1.1. Семейство характеристик

Если характеристики материала – простые, нет необходимости их рассматривать целиком (например, в виде графиков), – достаточно описать их с помощью чисел – параметров. Например, главной электрической характеристикой проводящей среды является зависимость плотности тока j от напряженности

электрического поля E , созданного в среде. Часто эта зависимость линейна, к тому же проходит через начало координат. Для того чтобы представить эту характеристику, достаточно указать одно лишь число – ее крутизну, $\gamma = j/E$, которая называется удельной проводимостью материала.

Параметры реальных материалов, как правило, являются зависимыми от многих факторов, поэтому необходимо уточнять условия, при которых параметры измерялись, или строить характеристики для самих параметров. Так, например, с изменением температуры удельное сопротивление металлов и полупроводников ρ изменяется, поэтому для его параметра вводится еще один параметр – температурный коэффициент удельного сопротивления (ТК ρ).

1.3. Типы химических связей

Атомная теория объясняет многие электрофизические свойства материалов. Большое многообразие окружающих нас веществ обусловлено образованием химических связей, которые принято делить на две большие категории: межатомные (сильные) и межмолекулярные (слабые).

1.3.1. Межатомные связи

Межатомные связи играют решающую роль в образовании молекул. Они осуществляются за счет кулоновских электростатических и обменных взаимодействий электронов внешних оболочек атомов. Независимо от природы сил, возникающих при сближении частиц, характер взаимодействия между атомами остается одинаковым (рис. 1.2): на относительно больших расстояниях появляются силы притяжения $F_{\text{пр}}$ быстро увеличивающиеся с уменьшением расстояния x между частицами (кривая 1); на небольших расстояниях возникают силы отталкивания $F_{\text{от}}$ которые с уменьшением расстояния увеличиваются гораздо быстрее, чем $F_{\text{пр}}$ (кривая 2). На расстоянии $x = r_0$ силы отталкивания уравновешивают силы притяжения и результирующая сила взаимодействия F обращается в нуль (кривая 3). Это состояние частиц является состоянием равновесия.

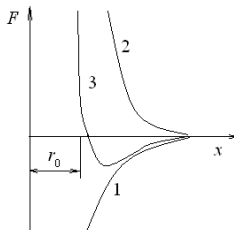


Рис. 1.2 Силы взаимодействия между атомами

Прочность химических связей может характеризоваться такими параметрами атома, как энергия ионизации, энергия сродства к электрону и электроотрицательность.

Существует несколько видов химических связей: ионная, ковалентная, донорно-акцепторная и металлическая.

Ионная связь осуществляется между элементами, сильно различающимися по электроотрицательности. Типичные представители ионных соединений — соединения типа A^1B^7 , между атомом щелочного металла и атомом галогена. Наименьшей электроотрицательностью обладают щелочные металлы, которые отличаются малыми энергиями ионизации и сродства. А наибольшую электроотрицательность имеют атомы галогенов, которые принимают электрон

для завершения внешней электронной оболочки. Процесс образования связи можно рассматривать как передачу внешнего, валентного электрона от атома щелочного металла к атому галогена, после чего, образуящиеся отрицательный и положительный ионы взаимно притягиваются за счет кулоновских сил.

Основные особенности ионной связи:

1. Ненасыщаемость, – любой ион способен осуществить связь с любым количеством ионов противоположного знака.

2. Ненаправленность, – нет принципиальных ограничений на взаимное расположение притягивающихся ионов.

3. Сильно полярная, – в пределах системы двух связанных ионов заряды различных знаков сильно смещены друг относительно друга.

Кристаллическая структура ионных кристаллов определяется не особенностями химических связей, а геометрическим фактором – наиболее оптимальной плотностью упаковки. В ионных решетках невозможно выделить отдельные фрагменты, которые можно назвать молекулами. Правильнее считать весь монокристалл одной гигантской молекулой.

Ковалентная связь. В основе связи лежит обменное взаимодействие, или обменный эффект, обусловленный обменом электронами между атомами и имеющий чисто квантовую природу. Важнейшей особенностью обменных сил является их зависимость от направления спинов валентных электронов, осуществляющих связь. Внешне ковалентную связь можно истолковать как перекрытие внешних оболочек электронов с разнонаправленными спинами. В результате объединения орбиталей формируется одна общая орбиталь с полностью скомпенсированным спиновым моментом. Отсюда следует, что некоторые свойства ковалентной связи противоположны свойствам ионной связи.

Основные особенности ковалентной связи:

1. Насыщаемость, – атом способен присоединить к себе столько инородных атомов, сколько не спаренных по спину орбиталей он имеет.

2. Направленность. Молекулы при рассматриваемой связи образуются посредством внешних p -, d -, f - и других орбиталей, не имеющих сферической симметрии (кроме s -орбиталей). Так как эти орбитали имеют строгую взаимную ориентацию, то и образованные ими молекулы имеют такую же строгую ориентацию. Например, в молекуле воды связь O–H образована перекрытием p -оболочки атома кислорода и s -оболочки атома водорода. Поскольку всего у ато-

ма кислорода имеется три взаимно перпендикулярных p -орбитали, причем на двух из них – по одному не спаренному электрону, связи в молекуле воды будут сориентированы под углом, близким к 90° . В самом деле, как показывают исследования, связи в молекуле воды ориентируются под углом 104° . Некоторое увеличение угла по отношению к прямому углу можно объяснить взаимным кулоновым отталкиванием атомов водорода, имеющих избыточный положительный заряд и гибридизацией s - и p -орбиталей атома кислорода.

3. Связь может быть как полярной, так и неполярной. Неполярная связь образуется при соединении совершенно одинаковых атомов (молекулы H_2 , O_2 , N_2 и др.). Если соединяются разные элементы, то симметрия нарушается и электронная плотность смещается в сторону наиболее электроотрицательного атома. В результате образуется молекула, в которой можно выделить отрицательно заряженную часть и положительно заряженную часть (молекулы HCl , CO и др.).

Донорно-акцепторная связь – частный случай ковалентной связи, так как механизм ее образования схож с описанным выше. Особенность данной связи – перед ее образованием между атомами происходит обмен электронами с формированием дополнительных орбиталей с неспаренными по спине электронами.

Металлическая связь имеет место в системе с большим числом атомов, обладающих малой энергией ионизации. Энергия связи внешних электронов с атомами столь низка, что они покидают свои атомы и образуют протяженные общие орбитали, распространяющиеся на весь объем кристалла. Возникает взаимодействующая система ионов и электронного газа. В отличие от ковалентной связи, где происходит парное соединение атомов за счет обобществления двух орбиталей, в металле обобществленными оказываются все валентные орбитали.

1.3.2. Межмолекулярные связи

Межмолекулярные связи – это связи, образованные за счет сил, возникающих между сформированными молекулами. Все межмолекулярные силы можно разделить на три класса.

Дипольно-ориентационные силы возникают между двумя полярными молекулами. При сближении полярных молекул на достаточно малое расстояние, они притягиваются противоположно заряженными концами (рис. 1.3, а), снижая свою суммарную энергию.

Индукционное взаимодействие возникает между полярной и неполярной молекулами. Оно обусловлено разделением заряда неполярной молекулы в поле полярной молекулы (рис. 1.3, б).

Дисперсионное взаимодействие (рис. 1.3, в) возникает между любыми молекулами, но в чистом виде наблюдается при взаимодействии неполярных молекул. При сближении двух неполярных молекул энергетически выгодным состоянием является состояние частичной синхронизации движения электронов по орбиталям, так, чтобы кулоновская энергия взаимодействия между электронами и ядрами системы атомов была минимальна. Дисперсионное взаимодействие играет решающую роль при образовании молекулярных кристаллов, то есть, кристаллов, узлы которых образованы молекулами. Из-за слабости дисперсионного взаимодействия, например, кристаллы йода, образованные молекулами I_2 , возгоняются в газообразную фазу, минуя жидкую.

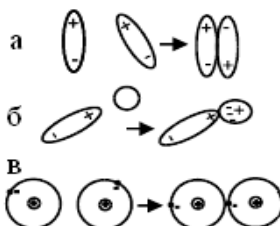


Рис. 1.3. Механизм образования межмолекулярных связей
 а – дипольно-ориентационные;
 б – индукционные;
 в – диссипативные

1.4. Кристаллическое состояние вещества

В твердом состоянии большинство веществ имеет кристаллическое строение. Образование пространственной решетки в основном зависит от размеров атомов и электронной конфигурации их оболочек. Классификация кристаллических форм основана на симметрии кристалла (рис. 1.4). Здесь a , b , c – ребра, α , β , γ – углы между ребрами кристалла.

Русский ученый Е.С. Федоров рассчитал возможные расположения частиц в кристаллических решетках различных веществ. Все разнообразие кристаллических форм можно свести к шести системам (табл. 1).

Кристаллические тела могут быть в виде отдельных крупных кристаллов – монокристаллов или состоять из совокупности большого числа мелких кристалликов (зерен). Осо-

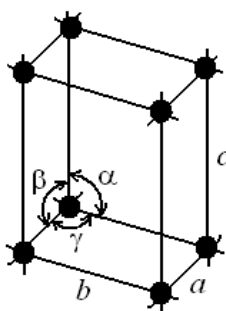


Рис. 1.4. Модель пространственной решетки

бенности кристаллических тел не ограничиваются формой кристаллов. Некоторые из физических свойств вещества кристалла – прочность, теплопроводность, светопередача и др. – не всегда одинаковы по различным направлениям внутри кристалла. Эта особенность называется анизотропией.

Т а б л и ц а 1

Пространственные решетки кристаллических систем

Кристаллическая система	Пространственная решетка	Соотношение между осевыми углами и осевыми единицами
1. Триклинная	I – простая	$a \neq b \neq c;$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$
2. Моноклинная	II – простая III – базоцентрированная	$a \neq b \neq c;$ $\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ$
3. Ромбическая (орторомбическая)	IV – простая V – базоцентрированная VI – объемноцентрированная VII – гранецентрированная	$a \neq b \neq c;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
4. Гексагональная	VIII – простая IX – ромбоэдрическая	$a = b \neq c;$ $\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$
5. Тетрагональная	X – простая XI – объемноцентрированная	$a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
6. Кубическая	XII – простая XIII – объемноцентрированная XIV – гранецентрированная	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

1.5. Дефекты кристаллической структуры

В природных кристаллах наблюдаются дефекты структуры – те или иные отклонения от регулярного расположения частиц. Такие отклонения называются дефектами кристаллической структуры. Их подразделяют на динамические и статические.

Динамические дефекты существуют при кратковременном действии на кристалл внешних воздействий (механических, тепловых, электромагнитных). При снятии воздействия они исчезают. Статические дефекты условно делят на точечные и линейные. Точечные дефекты проявляют себя в виде: вакансий – незанятых узлов решетки; смещения атома из узла в междоузлие; внедрения чужеродного атома. К линейным дефектам относят дислокации, поры, трещины, границы зерен и т.п.

Дефекты приводят к изменению физических свойств кристалла.

1.6. Аморфное состояние вещества

Твердые вещества, которые характеризуются случайным хаотичным расположением частиц, называют аморфными. Аморфные тела всегда изотропны по свойствам, не имеют температуры плавления (только температурный интервал размягчения).

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЩЕСТВА

Каждый из материалов, применяемый в электронной технике, обладает теми или иными электрическими свойствами. Так, все радиоматериалы обладают электропроводностью – способностью проводить электрический ток. Для оценки электрических свойств используют электрические характеристики.

Удельное электрическое сопротивление (ρ , Ом·м) – характеристика, применяемая для оценки электропроводности радиоматериалов.

Удельное электрическое сопротивление любого радиоматериала зависит от температуры (рис. 2.1). У проводников (кривая 1) с повышением температуры удельное сопротивление возрастает. Это связано с интенсивным колебанием атомов в узлах кристаллической

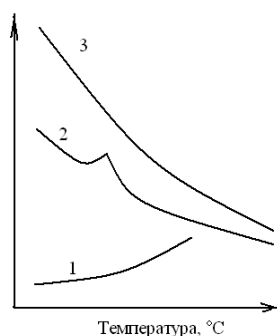


Рис. 2.1. Зависимость удельного электрического сопротивления материалов от температуры

решетки, которое мешает направленному движению свободных электронов. У полупроводников (кривая 2) и диэлектриков (кривая 3), наоборот, при возрастании температуры удельное сопротивление уменьшается. Это объясняется увеличением концентрации свободных носителей заряда.

Температурный коэффициент удельного сопротивления (TK_ρ , K^{-1}) – величина, которая позволяет учитывать изменение удельного электрического сопротивления в зависимости от температуры материала. В узком интервале температур TK_ρ определяют как

$$\text{TK}_\rho = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1 (T_2 - T_1)},$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления материала при начальной T_1 и конечной T_2 температурах. У проводников с ростом температуры

удельное сопротивление возрастает, т.е. $\text{TKr} > 0$, а у полупроводников и диэлектриков – уменьшается, т.е. $\text{TKr} < 0$.

Удельная проводимость (γ , См/м) – величина, обратная удельно-му сопротивлению $\gamma = 1/\rho$. Она характеризует степень электропроводности радиоматериала. У проводников $\gamma = 10^5 \div 10^8$ См/м, у полупроводников $\gamma = 10^6 \div 10^{-7}$ См/м, а у диэлектриков $\gamma = 10^{-7} \div 10^{-18}$ См/м. Малая величина удельной проводимости диэлектриков позволяет использовать их для изоляции частей радиоустройств, находящихся под напряжением.

Диэлектрическая проницаемость (ϵ_r , отн. ед.) – величина, которая характеризует способность диэлектриков или полупроводников образовывать электрическую емкость. Емкость C (Ф), плоского конденсатора заданных размеров прямо пропорционально диэлектрической проницаемости применяемого в нем диэлектрика: $C = \epsilon_a S/h$, где ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м, S – площадь металлической обкладки, м², h – толщина диэлектрика, м, $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r$, где $\epsilon_0 = 8,85416 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, Ф/м. диэлектрическая проницаемость вакуума $\epsilon_r = 1$, у жидких и твердых диэлектриков $\epsilon_r = 2 \div 17$, у воздуха $\epsilon_r = 1,00058$.

Диэлектрическая проницаемость активных диэлектриков (сегнетоэлектриков) при комнатной температуре может достигать значений $\epsilon_r = 1\,500 \div 7\,500$, что позволяет изготавливать из них конденсаторы малых размеров.

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости ($\text{TK}\epsilon_r$, K^{-1}) характеризует изменение диэлектрической проницаемости радиоматериалов от температуры

$$\text{TK}\epsilon = \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_1 (T_2 - T_1)},$$

где ϵ_{r1} , ϵ_{r2} – диэлектрическая проницаемость материала при начальной T_1 и конечной T_2 температурах.

Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ характеризует активные потери энергии, рассеиваемые в диэлектрике при его работе в переменном электрическом поле. Определяется как отношение мнимой ϵ'' к действительной ϵ' части диэлектрической проницаемости: $\text{tg } \delta = \epsilon''/\epsilon'$.

Наименьшими значениями $\text{tg } \delta = 10^{-6} \div 10^{-5}$ обладают газообразные диэлектрики. Твердые высокочастотные диэлектрики имеют значение $\text{tg } \delta = (2 \div 5) \cdot 10^{-5}$, остальные – $\text{tg } \delta = (2 \div 5) \cdot 10^{-3}$. Чем меньше значение $\text{tg } \delta$, тем лучшего качества диэлектрик, так как в нем

меньше потери энергии. Большие активные потери приводят к нагреву диэлектрика и его дальнейшему разрушению.

Электрическая прочность ($E_{пр}$, В/м) – напряженность электрического поля, при которой наступает пробой диэлектрика или полупроводника. Электрическую прочность вычисляют по формуле $E_{пр} = U_{пр}/h$, где $U_{пр}$ – напряжение, при котором произошел пробой, В, h – толщина образца диэлектрика в месте пробоя, м. Данная характеристика важна для диэлектриков, работающих при напряжениях выше 1 кВ.

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЩЕСТВА

Для оценки качества радиоматериалов необходимо знать не только электрические, но и механические характеристики, определяющие механическую прочность.

Разрушающее напряжение при растяжении (σ_p , Па) вычисляют по формуле $\sigma_p = P_p / S_0$, где P_p – разрушающее усилие при растяжении (разрыве) образца материала, Н; S_0 – площадь поперечного сечения образца материала до его разрушения, м².

Относительное удлинение при растяжении (e_p , %) вычисляют по формуле $e_p = (l_p - l_0) \cdot 100 / l_0$, где l_0 и l_p – длины образца материала соответственно до и после растяжения, м. Относительное удлинение материала при растяжении дает возможность оценить его растяжимость и пластичность. Так, у резины $e_p = 250 \div 300\%$, металлических проводников $e_p = 15 \div 50\%$, пластмасс $e_p = 2 \div 5\%$.

Разрушающее напряжение при сжатии (σ_c , Па) измеряется на образцах материалов определенных размеров и формы по формуле $\sigma_c = P_c / S_0$, где P_c – разрушающее усилие при сжатии образца материала, Н; S_0 – площадь поперечного сечения образца материала до его разрушения, м².

Разрушающее напряжение при статическом изгибе ($\sigma_{и}$, Па) определяют приложением изгибающего усилия $P_{и}$ к середине испытуемого образца материала 2 (рис. 3.1), покоящегося на двух неподвижных стальных опорах 3.

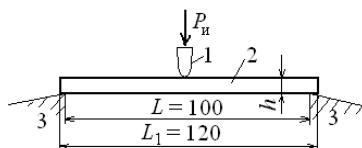


Рис. 3.1. Испытание на изгиб

Изгибающее усилие нарастает очень медленно, т.е. в статическом режиме.

Для измерения предела прочности при статическом изгибе $\sigma_{и}$ пластмасс используют образцы, представляющие собой бруски длиной $l = 120$, шириной $b = 15$ и толщиной $h = 10$ мм. Каждый из образцов помещают широкой стороной на две неподвижные опоры 3.

Изгибающее усилие $P_{и}$ прикладывают к стальному пестику 1, расположенному на середине образца. Разрушающее напряжение материала при статическом изгибе вычисляют по формуле

$$\sigma_{и} = 1,5P_{и}L / (bh^2),$$

где $P_{и}$ – изгибающее усилие, Н; L – расстояние между опорами в испытательной машине, м; b – ширина образца, м; h – толщина образца, м.

Ударная вязкость (a , Дж/м²) – это отношение работы ΔA , затраченной на разрушение образца материала, к площади его поперечного сечения S_0 : $a = \Delta A / S_0 = \Delta A / bh$, где b – ширина, м, h – толщина, м. Ударная вязкость позволяет судить о степени хрупкости материала. Чем меньше ударная вязкость, тем более хрупок материал.

Эта характеристика имеет большое значение для материалов, применяемых в радиооборудовании, где радиодетали подвергаются ударным нагрузкам.

4. ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для оценки качества радиоматериалов необходимо знать их тепловые характеристики. Известно, что большинство радиоматериалов, особенно органических диэлектриков, очень чувствительно к высоким и низким температурам. Рассмотрим основные тепловые характеристики радиоматериалов.

Температура плавления ($^{\circ}\text{C}$) определяется у материалов кристаллического строения – металлов, полупроводников и диэлектриков. Материал кристаллического строения по достижении температуры плавления переходит из твердого в жидкое состояние.

Температура размягчения ($^{\circ}\text{C}$) определяется у материалов аморфного строения. У материалов аморфной структуры переход из твердого состояния в жидкое совершается постепенно в широком интервале температур, поэтому приходится пользоваться условной температурой размягчения аморфного материала, которая определяется разными способами.

Если температура плавления кристаллического материала или размягчения аморфного равна 55°C , его нельзя применять в радиоаппаратуре, где он может нагреться до этой температуры или еще выше.

Коэффициент температурного расширения (КТР), определяющий изменение первоначальной длины материала при изменении его температуры от T_0 до T_1 (K^{-1}), вычисляют по формуле $\text{КТР} = (l_1 - l_0) / [l_0 (T_1 - T_0)]$, где l_0 и l_1 – длина материала соответственно при начальной T_0 и конечной T_1 температурах.

Коэффициент температурного расширения КТР имеет большое практическое значение, например при герметизации узлов радиоаппаратуры. Так, нельзя соединять друг с другом детали с резко отличающимися КТР. Наименьшим КТР обладает кварцевое стекло ($5,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$), наибольшим – ртуть ($182 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$) и некоторые полимерные диэлектрики, например полиэтилен ($145 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$) и поливинилхлорид ($160 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$).

Коэффициент теплопроводности (λ) позволяет оценить способность материала проводить теплоту от более нагретой его поверхности к менее нагретой. Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, вычисляют по формуле $\lambda = Ph / [S(T_2 - T_1)\tau]$, где P – мощность теплового потока, проходящего за время τ , с, через поверхность S стенки данного материала, м^2 , толщиной h , м; $(T_2 - T_1)$ – разность температур поверхностей образца материала.

Известно, что наибольшей теплопроводностью обладают металлы [$68 \div 415 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$], значительно меньшей – твердые органические диэлектрики [$0,09 \div 0,35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$].

Теплостойкость – тепловая характеристика органических полимерных диэлектриков. Она позволяет оценить их стойкость к кратковременному нагреву при одновременном воздействии на образец материалов механической нагрузки.

Нагревостойкость – характеристика, определяющая способность диэлектрика длительно выдерживать предельно допустимую температуру без заметного снижения механических, электрических и других характеристик. Установлены семь классов нагревостойкости электроизоляционных материалов (табл. 2).

Холодостойкость – характеристика, позволяющая оценить стойкость материалов к низким температурам. Малой стойкостью к низким температурам отличаются многие полимерные диэлектрики, резины и др. При охлаждении до низких температур (-60°C и ниже) эти материалы теряют механическую прочность и растрескиваются.

Поэтому холодостойкость диэлектриков большей частью определяют по степени снижения ими механической прочности.

Т а б л и ц а 2

Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов при использовании в воздушной среде

Класс нагревостойкости	Предельная температура, °С	Примерный перечень диэлектриков, относящихся к данному классу
Y	90	Полистирол, полиэтилен, бумаги, картоны, хлопчатобумажные ткани
A	105	Гетинакс, текстолит, хлопчатобумажные и шелковые ткани, пропитанные лаком
E	120	Лавсановые пленки, стеклоткани на масляных лаках, пластмассы с неорганическими наполнителями
B	130	Пластмассы с нагревостойкими неорганическими наполнителями
F	155	Пластмассы на основе полиуретана, эпоксидов с наполнителями из слюды, асбеста или стекловолокна
H	180	Кремнийорганические диэлектрики
G	выше 180	Слюда, радиокерамические материалы, фторопласт-4, полиимиды

5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЩЕСТВА

Влагопоглощаемость (w) – свойство материала, находящегося во влажной атмосфере, поглощать влагу. Для определения влагопоглощаемости пластины диэлектрика определенного размера вначале взвешивают, а затем помещают во влажную атмосферу при 20°С; по истечении 24, 48 ч и более образцы извлекают и снова взвешивают. Влагопоглощаемость (% по массе) вычисляют по формуле

$$w = (G_2 - G_1) \cdot 100 / G_1, \quad (1)$$

где G_1 – масса образца материала в исходном состоянии, г; G_2 – масса образца материала после пребывания во влажной атмосфере в течение 24, 48 ч и более, г.

Иногда влагопоглощаемость (г/дм^2) материала вычисляют по другой формуле $w = (G_2 - G_1)/F$, где G_1 и G_2 – те же величины, что и в формуле (6); F – поверхность образца материала, дм^2 .

Тропическая стойкость (тропикостойкость) – стойкость радиоматериалов к атмосферным воздействиям в странах с тропическим климатом. В условиях влажного тропического климата на незащищенные радиоматериалы могут воздействовать: высокая температура окружающего воздуха ($45 \div 55^\circ\text{C}$); резкое изменение температуры в течение суток; высокая влажность воздуха ($90 \div 95\%$); солнечная радиация (большая плотность светового и теплового потока); воздух, содержащий соли и пыль; плесневые грибки (растительные микроорганизмы), повреждающие многие материалы органического происхождения; насекомые, повреждающие органические диэлектрики в открытых радиоустройствах.

Перечисленные факторы оказывают разрушающее действие на многие полимерные диэлектрики, пластмассы и даже металлические детали.

Наиболее тропикостойкими являются материалы неорганического происхождения – радиокерамика, ситаллы и некоторые полимерные диэлектрики (кремнийорганические, фторорганические и др.).

Тропикостойкость радиоматериалов определяют различными способами – повышенной температурой, влажностью, искусственной солнечной радиацией и грибковой плесенью (одновременно). Тропикостойкость того или иного радиоматериала устанавливается по степени ухудшения его первоначальных механических и электрических характеристик.

Радиационная стойкость – характеристика, позволяющая оценить стойкость радиоматериалов к воздействиям ионизирующих излучений: α , β и γ , потоков нейтронов и др. Ионизирующие излучения вызывают структурные изменения в диэлектриках органического и неорганического происхождения, а также в полупроводниках и проводниках. Результатом этого является изменение первоначальных свойств и характеристик материала. Особенно сильное воздействие ионизирующее излучение оказывает на органические диэлектрики, часто вызывая их разрушение. Достаточно сильным излучениям подвергаются узлы радиоустройств и радиоматериалы в летательных аппаратах (ракеты, космические корабли и др.).

Радиационную стойкость радиоматериала к данному типу излучения определяют облучением различной интенсивности при длительном испытании образцов материала. Степень воздействия об-

лучения на материал устанавливают по потере массы, изменению механических и электрических характеристик.

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДИЭЛЕКТРИКАХ

При приложении к диэлектрику внешнего напряжения в нем протекают различные электрические процессы – поляризация, электропроводность и др. При большом напряжении может произойти разрушение диэлектрика (пробой). Рассмотрим процессы, определяющие электрические свойства и надежность работы диэлектриков в радиоустройствах.

6.1. Поляризация диэлектриков

Поляризация диэлектрика – это процесс упорядочения его связанных электрических зарядов под действием приложенного напряжения.

Электронная поляризация. При приложении напряжения в диэлектрике создается электрическое поле с напряженностью E , силы которого действуют на атомы диэлектрика. Под действием этих сил электроны в каждом из атомов смещаются относительно своего ядра в сторону положительного электрода (рис. 6.1). Это упругое смещение электронов происходит во всех атомах данного диэлектрика.

Смещенные электроны образуют с положительными зарядами ядер атомов пары связанных друг с другом электрических зарядов, которые называются *упругими диполями*. Образование упругих диполей в диэлектрике происходит мгновенно (в течение $10^{-14} \div 10^{-16}$ с). Так же мгновенно упругие диполи исчезают, если с диэлектрика (конденсатора) снять напряжение. Процесс образования упругих диполей происходит у всех диэлектриков и называется электронной поляризацией. Мгновенное смещение электронов в диэлектрике и образование упругих диполей внешне проявляет себя в виде *тока смещения* в диэлектрике.

Практическое значение процесса поляризации заключается в том, что диэлектрическая проницаемость материала зависит от интенсивности протекающего в нем процесса поляризации. В простейшем случае этот процесс может быть выражен уравнением

$$\epsilon_r = 1 + 4\pi n\alpha_3, \quad (2)$$

где n – концентрация частиц (атомов, молекул) в диэлектрике; α_3 – электронная поляризуемость – величина, зависящая от структуры молекулы или атома.

Из уравнения (2) видно, что ϵ_r зависит от концентрации поляризующихся частиц и их способности поляризоваться, т.е. от величин n и α_3 . Поэтому диэлектрическая проницаемость диэлектриков с кристаллической структурой больше диэлектрической проницаемости диэлектриков с аморфной структурой, так как плотность упаковки поляризующихся атомов и молекул в первом случае больше, чем во втором.

На основании уравнения (2) также можно сказать, что ϵ_r с увеличением температуры диэлектрика уменьшается (рис. 6.2).

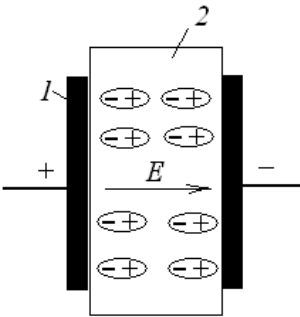


Рис. 6.1. Электронная поляризация диэлектрика: 1 – металлические электроды, 2 – диэлектрик

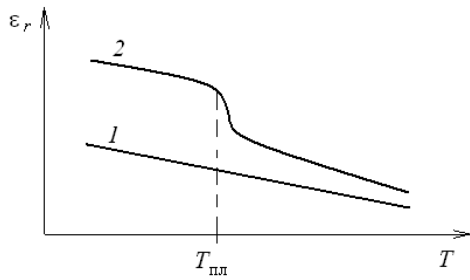


Рис. 6.2. Зависимость диэлектрической проницаемости неполярных диэлектриков аморфной 1 и кристаллической 2 структур от температуры

Это объясняется увеличением объема диэлектрика и уменьшением концентрации поляризующихся частиц в единице объема. Особенно это заметно у диэлектрика кристаллической структуры в момент перехода его из твердого в жидкое состояние при температуре плавления $T_{пл}$. Такая зависимость диэлектрической проницаемости от температуры наблюдается только у неполярных диэлектриков, состоящих из электрически нейтральных молекул, у которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают.

Полярные диэлектрики состоят из полярных молекул, имеющих положительно и отрицательно заряженные ионы, центры зарядов которых не совпадают (рис. 6.3). Полярные молекулы являются электрически заряженными, так как они обладают начальным электрическим моментом μ . Величина μ равна произведению заряда q одного из ионов на расстояние l между центрами ионов, т.е. $\mu = ql$.

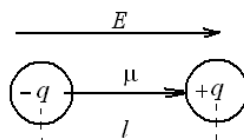


Рис. 6.3. Схема полярной молекулы

Электрический момент μ обозначается вектором, направленным от отрицательного иона к положительному. То есть полярная молекула состоит из связанных друг с другом противоположно заряженных ионов. Такая система зарядов называется **твердым диполем** в отличие от упругого диполя, образующегося из нейтральной молекулы под действием приложенного электрического напряжения.

Дипольная поляризация. Твердые диполи возникают в диэлектрике до воздействия внешнего электрического поля. Образование твердых диполей и, следовательно, полярных молекул обусловлено асимметрией строения молекул. Симметрично построенные молекулы неполярных диэлектриков не образуют твердых диполей. Если к полярному диэлектрику приложить электрическое напряжение, в нем возникают два вида поляризации: электронная и дипольная. Сначала происходит процесс мгновенного смещения электронов относительно ядер в атомах диэлектрика – электронная поляризация. Затем в полярных диэлектриках протекает более замедленный процесс дипольной поляризации. Он представляет собой поворот полярных молекул под действием сил электрического поля. Внешне поворот полярных молекул проявляется в полярном диэлектрике в виде **тока абсорбции**.

В связи с процессом дипольной поляризации температурная и частотная зависимости диэлектрической проницаемости у полярных диэлектриков отличаются от характера этих же зависимостей у неполярных диэлектриков.

Рост диэлектрической проницаемости у полярного диэлектрика при увеличении температуры (рис. 6.4, кривая 1) вызван повышением интенсивности процесса дипольной поляризации. Это объясняется уменьшением межмолекулярных сил в связи с нагреванием диэлектрика, что облегчает поворот полярных молекул под действием сил электрического поля. С ростом температуры тепловая энергия, сообщаемая диэлектрику, становится настолько большой, что вызы-

вает хаотическое движение полярных молекул. Из ориентированного электрическим полем положения полярные молекулы переводятся в состояние беспорядочных тепловых колебаний. При этом интенсивность дипольной поляризации снижается, а следовательно, снижается диэлектрическая проницаемость полярного диэлектрика. Изменение диэлектрической проницаемости у неполярного диэлектрика в зависимости от температуры (кривая 2) связано с уменьшением концентрации молекул.

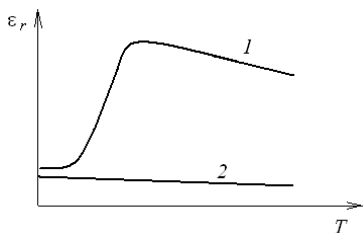


Рис. 6.4. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры полярного 1 и неполярного 2 диэлектриков

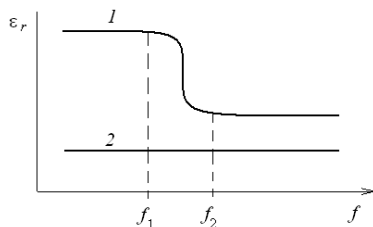


Рис. 6.5. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты напряжения, приложенного к полярному 1 и неполярному 2 диэлектрикам

Зависимость диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика от частоты приложенного напряжения объясняется возможностью ориентации полярных молекул под действием электрических сил. Так, до частоты f_1 (рис. 6.5, кривая 1) почти все полярные молекулы успевают совершить свой поворот за время одного полупериода, когда электрическое поле в диэлектрике сохраняет направление. При частоте f_2 и выше полярные молекулы не успевают совершить свой поворот и ориентироваться в электрическом поле, т.е. интенсивность процесса дипольной поляризации резко падает. В связи с этим резко уменьшается диэлектрическая проницаемость ϵ_r , поскольку она зависит от интенсивности процессов поляризации, происходящих в диэлектрике. В области частот, больших f_2 , происходит процесс только электронной поляризации, процесс же дипольной поляризации практически отсутствует.

Диэлектрическая проницаемость неполярного диэлектрика не зависит от частоты приложенного напряжения в широком диапазоне частот (кривая 2). Это объясняется тем, что в неполярных диэлек-

триках протекает мгновенный процесс упругой электронной поляризации, не зависящей от частоты. Поэтому неполярные диэлектрики широко используют в технике высоких частот.

Ионная поляризация (поляризация ионного смещения). Этот процесс происходит в ионных кристаллических диэлектриках. Всякий ионный кристалл состоит из положительных и отрицательных ионов, расположенных в узлах его кристаллической решетки. При приложении напряжения в ионном кристалле начинают действовать электрические силы, под воздействием которых ионы упруго смещаются относительно своего первоначального расположения (рис. 6.6). При этом положительно заряженный ион смещается в одном направлении, а отрицательно заряженный – в противоположном.

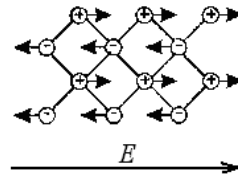


Рис. 6.6 Дипольная поляризация диэлектрика

Таким образом, каждая пара ионов образует упругий диполь. Это явление упругого смещения ионов называют процессом ионной поляризации диэлектриков, который происходит за $10^{-13} \div 10^{-12}$ с. Наряду с процессом поляризации ионного смещения в ионных кристаллах протекает и электронная поляризация. Оба процесса поляризации мгновенные, поэтому диэлектрическая проницаемость ионных кристаллических диэлектриков не зависит от частоты приложенного напряжения.

Объемно-зарядная поляризация.

Этот процесс представляет собой накопление в приэлектродных слоях диэлектрика некоторого количества ионов (рис. 6.7). При малом запасе энергии ионы не принимают участия в процессе электропроводности, т.е. не образуют тока сквозной проводимости. Пройдя через весь объем диэлектрика, эти ионы останавливаются в приэлектродных слоях его объема. При этом у положительно заряженного электрода накапливаются отрицательные ионы, а у отрицательно заряженного – положительные. В связи с этим в диэлектрике создается электрическое поле E_p , направленное противоположно основному.

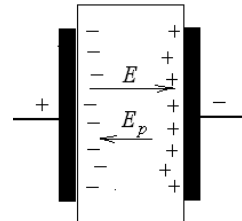


Рис. 6.7 Объемно-зарядная поляризация диэлектрика

Закон Ома для диэлектриков принимает вид $I = (U - u_p)/R$, где U – внешнее напряжение, приложенное к диэлектрику, В; u_p – напряжение в результате накопления объемных зарядов ионов в приэлектродных слоях диэлектрика, В; R – общее сопротивление диэлектрика, Ом.

Процесс объемно-зарядной поляризации наиболее заметно наблюдается в твердых диэлектриках. Медленное перемещение ионов, участвующих в этом процессе, проявляется в диэлектрике также в виде *тока абсорбции*.

6.2. Электропроводность диэлектриков

Любой радиотехнический материал (проводник, полупроводник или диэлектрик) проводит электрический ток. Но в диэлектриках проходят очень малые токи, даже если они находятся под действием сравнительно большого напряжения (500 В и выше).

Электропроводность газообразных диэлектриков обусловлена направленным перемещением свободных электронов и ионов. Если к слою любого газа (воздух, азот) приложить электрическое напряжение, в нем появится ток проводимости, или так называемый сквозной ток, представляющий собой направленное перемещение свободных электронов и ионов.

Электрический ток в твердых диэлектриках представляет собой направленное движение ионов. Ионы – это атомы, которые потеряли или приобрели некоторое количество электронов по сравнению с нейтральными атомами. Если атомы потеряли несколько электронов, они становятся положительно заряженными ионами, если атомы приобрели несколько электронов, они становятся отрицательно заряженными ионами. В твердых диэлектриках ток проводимости представляет собой перемещение положительных и отрицательных ионов. Электронный же ток в твердых диэлектриках будет наблюдаться только в сильных электрических полях (когда к диэлектрику приложено высокое напряжение). Только в некоторых твердых диэлектриках электронный ток наблюдается и при сравнительно небольших напряжениях электрического поля.

Источниками свободных ионов в твердых диэлектриках являются различные примеси (вода, органические кислоты, оксиды и др.), молекулы которых под действием электрических сил распадаются на ионы. Ионы примесей возбуждают в твердом диэлектрике при-

месную электропроводность, которая наблюдается в области высоких температур.

В области повышенных температур появляется еще и собственная электропроводность, обусловленная появлением свободных ионов самого диэлектрика. Эти ионы покинули места своего первоначального закрепления под действием повышенной температуры и приложенного напряжения.

График, показывающий логарифмическую зависимость удельной проводимости кристаллического диэлектрика от величины, обратной температуре ($1/T$), изображен на рис. 6.8. На этом графике видны области примесной 1 и собственной 2 электропроводностей в твердых кристаллических диэлектриках.

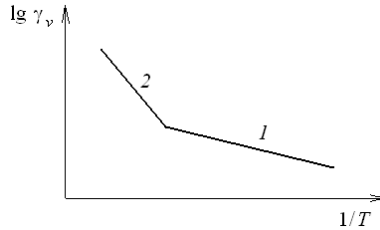


Рис. 6.8. Зависимость удельной проводимости твердого кристаллического диэлектрика от температуры

6.3. Потери энергии в диэлектриках

Рассмотренные процессы поляризации и электропроводности диэлектриков позволяют проанализировать характер изменения $\operatorname{tg} \delta$ в зависимости от температуры и частоты приложенного напряжения. Так, с ростом температуры $\operatorname{tg} \delta$ неполярного диэлектрика растет (рис. 6.9, кривая 1). Это связано с увеличением тока проводимости, а следовательно, активных потерь мощности в диэлектрике.

У полярного диэлектрика увеличение $\operatorname{tg} \delta$ вызвано ростом тока проводимости при температуре T_2 и выше (кривая 2). До температуры T_1 рост $\operatorname{tg} \delta$ объясняется затратами энергии на ориентацию все увеличивающегося числа полярных молекул, принимающих участие в процессе дипольной поляризации. Начиная с температуры T_1 и выше, происходит переход ориентированных (по направлению электрического поля) полярных молекул в состояние их теплового разброса. В связи с переходом все большего числа полярных молекул в состояние беспорядочных тепловых колебаний электрическая энергия, затрачиваемая на процесс дипольной поляризации, уменьшается. На это и указывает снижение величины $\operatorname{tg} \delta$ в интервале температур от T_1 до T_2 .

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты переменного напряжения для неполярного и полярного диэлектриков показана на рис. 6.10. Уменьшение $\operatorname{tg} \delta$ у неполярного диэлектрика с ростом частоты приложенного напряжения (кривая 1) объясняется понижением тока проводимости в диэлектрике, так как ионы не успевают перемещаться за время одного полупериода вследствие очень быстрого изменения направления переменного электрического поля. При этом активный ток проводимости уменьшается.

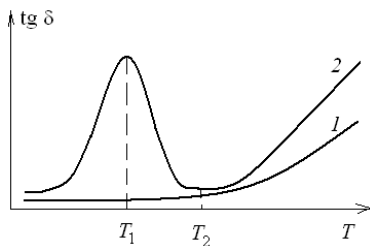


Рис. 6.9. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры диэлектрика: 1, 2 – неполярный и полярный диэлектрики

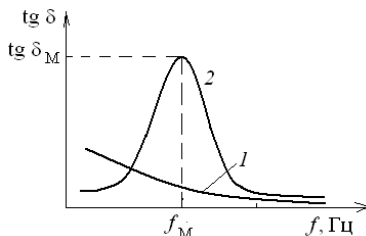


Рис. 6.10. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты переменного напряжения: 1, 2 – неполярный и полярный диэлектрики

В полярном диэлектрике с увеличением частоты приложенного напряжения сначала возрастают потери энергии (кривая 2). Это объясняется тем, что диполи чаще вынуждены ориентироваться, на что затрачивается все большая энергия. Это происходит лишь до определенной частоты f_M , соответствующей максимальной величине $\operatorname{tg} \delta_M$.

Начиная с частоты f_M , время одного полупериода (когда электрическое поле сохраняет направление) становится настолько малым, что полярные молекулы не успевают ориентироваться и потери энергии в диэлектрике уменьшаются. На это указывает снижение величины $\operatorname{tg} \delta$ в области высоких частот. Знание этих зависимостей необходимо при выборе того или иного диэлектрика для его работы при заданной частоте.

Типичные графики, показанные на рис. 6.9 и 6.10, иногда искажаются из-за дополнительных видов поляризации полярных групп и примесей в диэлектриках сложного состава.

6.4. Пробой диэлектриков

В некоторых узлах радиоаппаратуры диэлектрики могут находиться под высоким напряжением. Если при этом напряженность E электрического поля превысит допустимую для данного диэлектрика величину, произойдет пробой диэлектрика. В результате пробоя диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства, так как в месте пробоя образуется сквозной канал с повышенной проводимостью.

Пробой может произойти в результате нагрева диэлектрика проходящим через него током. Так как при нагревании электрическое сопротивление диэлектрика уменьшается, ток, проходящий через него, увеличивается, что вызывает увеличение теплоты, образующейся в диэлектрике. Этот процесс развивается в канале малого сечения и повышенной проводимости. Так как все диэлектрики обладают незначительной теплопроводностью, в этом канале резко возрастает температура. При возросшем напряжении количество выделяемой теплоты настолько увеличивается, что вызывает тепловое разрушение диэлектрика (прожигание, расплавление) – *тепловой пробой*.

Тепловой пробой – часто встречающийся вид пробоя диэлектриков, работающих под напряжением высокой частоты, которое вызывает значительные диэлектрические потери энергии, выделяемые в диэлектрике в виде теплоты. Это дополнительно нагревает диэлектрик, что способствует тепловому разрушению.

При тепловом пробое электрическая прочность $E_{пр}$ твердого диэлектрика зависит от температуры T (рис. 6.11) и толщины h диэлектрика (рис. 6.12), так как с их увеличением теплоотвод затрудняется, что ускоряет процесс теплового разрушения диэлектрика.

Иногда происходит *электрический пробой* твердого диэлектрика. К моменту наступления пробоя свободные электроны образуют лавину в каком-то месте объема диэлектрика. Это приводит к чисто электрическому разрушению диэлектрика. При этом электрическая прочность диэлектрика в малой степени зависит от его температуры и толщины (рис. 6.11, 6.12).

Основными условиями возникновения электрического пробоя являются отсутствие диэлектрических потерь, нагрева и большая однородность твердого диэлектрика. Поскольку эти условия на практике в большинстве случаев отсутствуют, явление электрического пробоя встречается сравнительно редко.

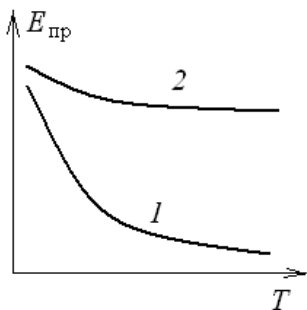


Рис. 6.11. Зависимость электрической прочности твердого диэлектрика от температуры при тепловом 1 и электрическом 2 пробоях

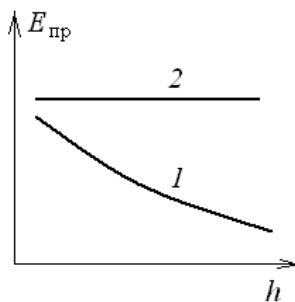


Рис. 6.12. Зависимость электрической прочности твердого диэлектрика от его толщины при тепловом 1 и электрическом 2 пробоях

Электрическая прочность твердого диэлектрика зависит от времени действия напряжения. При увеличении времени τ выдержки диэлектрика под напряжением значения его электрической прочности $E_{пр}$ снижаются.

7. ТВЕРДЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

7.1. Основные понятия об органических твердых диэлектриках

Твердые органические диэлектрики, применяемые в радиоэлектронике, являются высокополимерными материалами, которые состоят из десятков и сотен тысяч молекул одного или нескольких исходных веществ – мономеров.

Мономеры – простые химические вещества, легко вступающие в химические реакции, в результате которых образуются новые высокополимерные материалы (полимеры) с большой молекулярной массой.

В молекулах полимера молекулы мономера прочно связаны друг с другом силами химических связей, условно изображаемых черточками. Например, молекулы исходного мономерного вещества **A** соединяются друг с другом, образуя молекулы нового высокополимерного вещества $-A-A-A-A-A-A-A-A-A-$.

Большие молекулы полимеров могут иметь форму вытянутых в длину нитей, т.е. иметь линейную структуру. Полимеры, состоящие из линейных молекул, называются *линейными*. Они, как правило, способны размягчаться при нагревании, т.е. являются *термопластичными материалами*.

Молекулы многих полимеров могут быть развиты по всем трем направлениям, т.е. иметь пространственную структуру. Полимеры, состоящие из пространственно развитых молекул, называются *пространственными*. Эти полимеры относительно хрупки и, как правило, не размягчаются при нагревании, т.е. являются *термореактивными материалами*. К линейным полимерам относят каучуки, полистирол, полиэтилены, к пространственным – синтетические смолы (бакелиты, поликарбонаты и др.).

Написать полностью химические формулы больших молекул полимеров трудно, поэтому их пишут сокращенно. Так, химическую формулу приведенной выше молекулы записывают сокращенно так $-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-A-... = (-A-)_n$. В скобках написано одно звено молекулы полимера, повторяющееся n раз. Величина n называется степенью полимеризации. Она показывает, из скольких (в среднем) молекул мономера состоит молекула полимера. Чем больше молекул мономера содержит молекула полимера, тем выше его молекулярная масса.

Полимеры могут иметь аморфное или кристаллическое строение. Некоторые полимеры наряду с кристаллическим содержат аморфное вещество.

Высокополимерные материалы могут быть природными (натуральный каучук, янтарь) и синтетическими (синтетический каучук, полистирол, полиэтилен). Природные диэлектрики не удовлетворяют требованиям современной радиоэлектроники, поэтому в настоящее время применяют только синтетические высокополимерные диэлектрики. Они могут быть получены в результате реакций полимеризации или поликонденсации. В зависимости от способа получения синтетические диэлектрики делятся на полимеризационные и поликонденсационные.

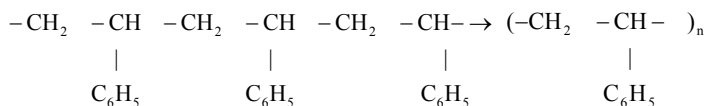
7.2. Полимеризационные диэлектрики

Полимеризация – процесс соединения молекул исходного мономера в большие молекулы, образующие новый высокополимерный материал. Характерная особенность реакции полимеризации

состоит в том, что в результате ее проведения элементарный состав вещества не изменяется. Это обеспечивает наибольшую химическую чистоту получаемого полимера, а следовательно, высокий уровень его электрических характеристик. Поэтому полимеризационные диэлектрики широко применяют в радиоэлектронике.

Рассмотрим один из процессов получения аморфного диэлектрика – *полистирола*. Он получается в результате реакции полимеризации исходного мономерного вещества – стирола $\text{H}_2\text{C} = \text{CH} - \text{C}_6\text{H}_5$. Стирол – это прозрачная бесцветная жидкость, кипящая при 145°C . Если стирол подвергать ступенчатому нагреванию – вначале до $90\text{--}110^\circ\text{C}$, а затем до $180\text{--}230^\circ\text{C}$, то он претерпевает процесс полимеризации. Этот процесс протекает без введения в стирол каких-либо дополнительных веществ (инициаторов) и называется термической полимеризацией. При этом двойная химическая связь (обозначенная двумя черточками) в молекулах стирола разрывается и переходит на соседнюю его молекулу. В результате процесса полимеризации молекулы стирола соединяются друг с другом, образуя большую молекулу высокополимерного материала – полистирола.

Процесс полимеризации записывается в следующем виде:



Степень полимеризации полистирола n колеблется в широких пределах. Это значит, что полистирол состоит из больших молекул разной величины. Молекулярная масса широко применяемых полистиролов составляет $50\,000\text{--}200\,000$ в зависимости от степени полимеризации. Молекулярная масса мономера – стирола – равна 104. Плотность полистирола в среднем $1\,050\text{ кг/м}^3$. Так как структура молекул полистирола линейная, несколько несимметричная, его относят к слабо полярным диэлектрикам. Полярность группы C_6H_5 так мала, что диэлектрическая проницаемость и $\text{tg } \delta$ полистирола также малы и не зависят от частоты приложенного напряжения. Поэтому полистирол относят к высокочастотным диэлектрикам и применяют в радиоэлектронике. Полистирол – термопластичный прозрачный диэлектрик.

Блочный полистирол выпускают в виде прозрачных пластин, прутков и листов. Эти изделия получают разливом частично полимеризованного стирола в нагретые до $120\text{--}140^\circ\text{C}$ металлические

формы, в которых процесс полимеризации заканчивается. После охлаждения из форм извлекают изделия блочного полистирола.

Блочный полистирол отличается высокой химической чистотой и, следовательно, высоким уровнем электрических характеристик (приложение А). Из блочного полистирола изготавливают изоляционные платы, диэлектрические антенны, части волноводов СВЧ и другие радиодетали. Изделия из блочного полистирола могут быть подвергнуты всем видам механической обработки. Основным технологическим недостатком блочного полистирола является необходимость его механической обработки при получении из него радиодеталей. Эти операции весьма трудоемки и, кроме того, дают много отходов. Из размягченного полистирола могут быть получены гранулы. Изделия из гранулированного полистирола получают методом литья под давлением.

Суспензионный полистирол представляет собой порошкообразное вещество, из которого радиодетали получают горячим прессованием или литьем под давлением. Суспензионный полистирол более технологичный материал, чем блочный, но так как его получают полимеризацией стирола в водном растворе щелочных веществ, он несколько загрязнен этими веществами. Поэтому электрические характеристики изделий из суспензионного полистирола ухудшены по сравнению с характеристиками изделий из блочного полистирола (приложение А).

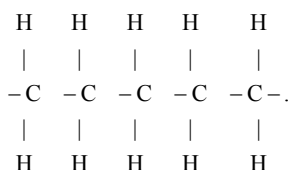
Полистиролы хорошо растворяются в нейтральных растворителях (бензоле, толуоле, ксилоле), но не растворяются в спиртах, бензине и растительных маслах. Детали из них не разрушаются под воздействием щелочей и кислот. Верхний предел рабочих температур таких деталей 65–70°C. Полистирол состоит из молекул линейной структуры, хаотически расположенных в материале, поэтому он является относительно хрупким материалом.

Размягченный полистирол вытягивают через узкую щель (фильеру), что позволяет ориентировать большинство его молекул в направлении вытягивания. Таким способом получают гибкие прозрачные полистирольные пленки (стиропленки) толщиной 20–100 мкм и шириной 20–100 мм. Полистирольные пленки имеют те же электрические характеристики, что и блочный полистирол. Электрическая прочность полистирольных пленок 100–150 МВ/м; допустимый диапазон рабочих температур от –50 до +70°C.

Ударопрочный полистирол представляет собой продукт сополимеризации стирола с синтетическими каучуками или сополимеров

стирола с акрилонитрилом и каучуками. Это непрозрачные материалы, окрашенные в белый, кремовый и другие цвета (реже – полупрозрачные). Основной особенностью ударопрочных полистиролов является повышенная ударная вязкость (приложение А).

Полиэтилены – высокополимерные диэлектрики, получаемые полимеризацией газообразного вещества – этилена $\text{H}_2\text{C} = \text{CH}_2$ при высоком, среднем или низком давлении. В зависимости от давления, при котором протекает процесс полимеризации этилена, различают полиэтилены высокого давления (ВД), низкого (НД) и среднего (СД). Все полиэтилены содержат кристаллическое и аморфное вещества одного и того же состава. Структура молекул полиэтилена – линейная и в идеальном случае имеет вид



Полиэтилены – неполярные диэлектрики высокой химической чистоты, а следовательно, имеют высокий уровень электрических характеристик, не зависящих от частоты приложенного напряжения. Поэтому различные полиэтилены являются типичными высокочастотными диэлектриками с очень малой водопоглощаемостью и высокой химической стойкостью. Все разновидности полиэтилена имеют светло-серую окраску и представляют собой гранулированные или порошкообразные термопластичные вещества. Изделия из полиэтилена получают методами горячего прессования, горячего литья под давлением и экструзии.

Полиэтилен ВД получают сжижением этилена под высоким давлением (≈ 200 МПа). Процесс полимеризации протекает при $180\text{--}200^\circ\text{C}$. Этот вид полиэтилена содержит около 60% кристаллического и 40% аморфного веществ и имеет хорошо выраженную температуру плавления (108°C).

Из полиэтилена ВД изготавливают главным образом гибкую изоляцию высокочастотных проводов и кабелей, изоляционные шланги, трубки, электроизоляционную пленку.

Полиэтилен СД получают при давлении ≈ 5 МПа и $130\text{--}150^\circ\text{C}$ в растворителе – ксилоле. Этот вид полиэтилена содержит 90% кристаллического и 10% аморфного веществ. Он отличается большими

плотностью (960 кг/м^3), твердостью и температурой плавления (130°C), чем полиэтилен ВД.

Механические и электрические характеристики полиэтилена СД такие же, как и полиэтиленов ВД и НД. Области его применения те же, что и блочного полистирола (части волноводов, изоляционные детали переключателей диапазонов, каркасы катушек, изоляционные платы и др.).

Полиэтилен НД получают при низком давлении $\approx 3 \text{ МПа}$ и $60\text{--}80^\circ\text{C}$, применяя специальные катализаторы. Этот вид полиэтилена содержит $80\text{--}85\%$ кристаллического и только $15\text{--}20\%$ аморфного веществ и не обладает гибкостью. Температура плавления полиэтилена НД 135°C . Он представляет собой роговидный упругий материал с повышенной плотностью (950 кг/м^3) и улучшенными механическими характеристиками.

Электрические и механические характеристики полиэтиленов приведены в приложении А.

К достоинствам всех видов полиэтилена относятся их химическая инертность, влагостойкость и высокий уровень электрических характеристик, стабильных в широком диапазоне частот. Полиэтилены легко свариваются и поддаются всем видам механической обработки. При температуре до 50°C они не растворяются ни в одном из растворителей.

К недостаткам полиэтиленов можно отнести их невысокую теплостойкость, старение под действием световых лучей, что снижает электрические и особенно механические характеристики. При использовании полиэтилена ВД в качестве наружных оболочек высокочастотных кабелей, подвергающихся солнечной радиации, в него вводят $0,3\text{--}0,5\%$ газовой сажи, которая хорошо совмещается с полиэтиленом и в значительной степени замедляет процесс его светового старения.

Полиформальдегид – высокополимерный материал, получаемый в виде порошка белого цвета в результате полимеризации газа формальдегида CH_2O в одном из инертных растворителей. Структура молекул полиформальдегида линейная и в идеальном случае имеет вид



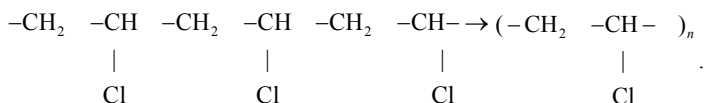
Полиформальдегид – термопластический материал, из которого изготавливают изделия методом горячего литья под давлением или экструзии: он содержит 20% аморфного и 80% кристаллического

веществ и, как полиэтилен, имеет четко выраженную температуру плавления (170°C). Изделия из полиформальдегида можно окрашивать в различные цвета.

Характерными свойствами полиформальдегида являются: высокий уровень механических характеристик, стойкость к истиранию, очень низкий коэффициент трения и стабильность размеров, которые позволяют использовать его не только для электроизоляционных, но и для конструкционных деталей в радиоаппаратуре. Полиформальдегид поддается всем видам механической обработки. Из него изготавливают детали червячных передач и шестерни, работающие бесшумно при больших окружных скоростях, а также ручки переключателей в радиоаппаратуре.

Электрические характеристики полиформальдегида остаются практически постоянными в интервале температур от -40 до +100°C и мало изменяются в зависимости от частоты приложенного напряжения (приложение А).

Поливинилхлорид – высокополимерный материал, получаемый в результате реакции полимеризации газообразного вещества – хлористого винила $H_2C = CH - Cl$ – при участии перекисного инициатора реакции (перекиси водорода и др.). Реакция проводится со сжиженным хлористым винилом в водном растворе щелочных веществ при 50–60°C (эмульсионный и суспензионный методы). Структура молекул поливинилхлорида имеет вид:



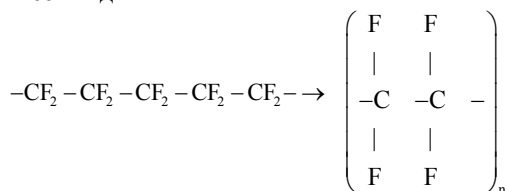
Поливинилхлорид, получаемый в виде порошка белого цвета, – термопластичный полярный диэлектрик, из которого изделия изготавливают методом горячего прессования, литья под давлением или экструзии. Изделия могут быть окрашены в различные цвета введением в поливинилхлорид соответствующих красителей. Это материал аморфного строения. Характерными его свойствами являются: высокая химическая стойкость, стойкость к возгоранию и тропическая стойкость. Из поливинилхлорида получают винипласт и пластикат.

Поливинилхлоридный пластикат – мягкий гибкий материал, состоящий из 60–70% поливинилхлорида и 30–40% пластификаторов (густых маслообразных синтетических жидкостей). Кроме того, в пластикат входят красители, наполнители, стабилизаторы, кото-

рые смешивают с порошкообразной поливинилхлоридной смолой. Полученную однородную смесь несколько раз пропускают между нагретыми стальными валками. В результате такой переработки получают гибкий эластичный материал в виде лент толщиной 0,5–1,75 и шириной 10–105 мм, а также в виде крошки.

Пластификаторы придают материалу гибкость и повышают его холодостойкость, но, как всякая примесь, снижают электрические характеристики. Красители и стабилизаторы обеспечивают его стойкость к световому старению.

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) представляет собой рыхлый порошок белого цвета, получаемый в результате реакции газа – тетрафторэтилена $F_2C = CF_2$. Структура молекул политетрафторэтилена имеет вид



Симметричность строения молекул фторопласта-4 и высокая химическая чистота обеспечивают хорошие электрические характеристики, стабильные в широком диапазоне частот (до 1 010 Гц). Большая энергия химической связи между атомами углерода и фтора в молекулах полимера обеспечивает большую холодо- и нагrevостойкость этого диэлектрика.

Детали, изготовленные из фторопласта-4, могут длительно работать в широком интервале температур (от -190 до $+250^\circ C$), при кратковременном использовании которых верхний температурный предел может быть повышен до $350^\circ C$. Высокая химическая стойкость, негорючесть и отсутствие гигроскопичности позволяют широко применять фторопласт-4 в РЭА.

Изоляционные изделия получают из порошка фторопласта-4 холодным прессованием в стальных пресс-формах при давлении 30–35 МПа. Отпрессованные изделия подвергают спеканию в печах при конечной температуре 370 – $380^\circ C$ в течение нескольких часов (выдерживают изделия при этой температуре из расчета 20 мин на каждый 1 мм толщины).

При большой скорости охлаждения получают закаленные спеченные изделия, отличающиеся высокой механической прочностью и

содержащие около 50% кристаллического вещества (остальное – аморфное). При медленном охлаждении спеченные изделия получают незакаленными, содержащими 65–70% кристаллического вещества. Они легче обрабатываются, обладают меньшей твердостью и более высокими электрическими характеристиками. Таким образом прессуют детали несложной формы или заготовки. Из заготовок методом механической обработки получают изделия сложного профиля.

При нагреве изделий из фторопласта-4 до 370°C, их кристаллическая структура переходит в аморфную и они приобретают прозрачность. Материал не размягчается до 415°C, когда начинается его термическое разложение. При этом отщепляется свободный фтор, являющийся токсичным веществом. Гибкость в толстом слое фторопласта-4 сохраняется до –80°C, а в тонком слое – до –100°C. Детали из этого материала не растрескиваются при снижении температуры до –250°C.

Благодаря высокой химической стойкости фторопласта-4 изделия из него не растворяются ни в одном из растворителей при комнатной температуре и длительном нагревании. На изделия не действуют кислоты, щелочи и окислители. Только расплавленные щелочные металлы и их соединения с аммиаком и нафталином вызывают частичное растворение поверхности материала. К достоинствам фторопласта-4 относится его негорючесть, непоражаемость грибковой плесенью и высокая гидрофобность.

Благодаря стабильности электрических характеристик в широком диапазоне частот и температур, высокой радиопрозрачности и химической стойкости фторопласт-4 широко применяют в технике высоких частот, включая СВЧ. Фторопластовая пленка толщиной 5–200 мкм служит для изготовления высокочастотных конденсаторов и изоляции, радиомонтажных проводов высокой нагревостойкости.

Недостатком фторопласта-4 является его хладотекучесть под действием механической нагрузки. Механически нагруженные изделия из этого материала начинают деформироваться при 25°C, если механические напряжения достигают 14 МПа и более. С повышением температуры предел текучести материала понижается. Так, при 100°C предел текучести 6,7 МПа, а при 250°C – всего 2,8 МПа.

7.3. Поликонденсационные диэлектрики

Поликонденсационные полимерные диэлектрики получают в результате реакции поликонденсации. **Поликонденсация** – процесс

образования высокополимерного вещества из молекул одного или нескольких низкомолекулярных веществ с выделением побочных продуктов реакции в виде воды, газообразных и других простых веществ. В этом случае элементарный состав получаемого полимера отличается от элементарного состава исходных мономеров. Другой характерной особенностью реакции поликонденсации является ее ступенчатое развитие. На каждом этапе (ступени) реакции образуются промежуточные стабильные вещества – олигомеры.

Реакцию поликонденсации активируют вводимыми катализаторами, выбираемыми в зависимости от типа реакции. Так, если реакция сопровождается образованием воды, выбирают катализатор с водоотнимающим свойством, например какую-либо кислоту. Катализатор берут в возможно меньшем количестве, так как он загрязняет полученный диэлектрик, что ухудшает его электрические характеристики. Некоторые виды поликонденсации могут протекать и без катализаторов.

Поликонденсационные диэлектрики в большинстве случаев представляют собой термореактивные вещества, не размягчающиеся при нагревании. Они имеют, как правило, аморфную структуру, из-за чего называются смолами. Рассмотрим поликонденсационные полимеры – диэлектрики, широко применяемые в радиоэлектронике.

Фенолоальдегидные (резольные) полимеры в конечной стадии производства представляют собой термореактивные вещества аморфного строения. Их получают реакцией поликонденсации фенола (или крезола) с альдегидами при участии щелочных катализаторов.

Из резольных полимеров наибольшее применение получили бакелиты. Они образуются при реакции поликонденсации, протекающей между кристаллическим фенолом C_6H_5OH и газом – формальдегидом CH_2O в присутствии катализатора – гидроксида бария $BaOH_2$ или гидроксида аммония NH_4OH . При этом формальдегида берут несколько больше, чем фенола.

В результате первой ступени реакции образуется бакелитовая смола в первоначальной стадии А (олигомер) – сиропообразная масса желтого цвета. В качестве побочного продукта реакции образуется вода, которую откачивают из реактора. Олигомер подсушивают под вакуумом при $60-70^{\circ}C$, а затем разливают в металлические противни. Охлажденный до комнатной температуры бакелит в стадии А представляет собой твердое хрупкое вещество, плавящееся при нагревании и растворяющееся в этиловом спирте.

При дальнейшем нагревании бакелит из стадии А переходит в стадию В, в которой он способен размягчаться при нагревании до

95°C, но уже не растворяется в растворителях. При последующем нагревании до 120°C бакелит переходит в конечную стадию С. В этой стадии он состоит из трехмерных больших молекул и уже не способен плавиться и растворяться.

Это свойство бакелитов и их клеящую способность используют в производстве терморезистивных слоистых диэлектриков (гетинакса, текстолита, стеклотекстолита), применяемых в печатных платах. Подсушенный бакелит в стадии А (олигомер) растворяют в этиловом спирте для получения лака, содержащего 50–60% бакелита. Лакком пропитывают волокнистые основы (бумагу, ткань), из которых методом горячего прессования получают слоистые диэлектрики. В производстве пластмассовых изделий, получаемых горячим прессованием, в качестве связующего вещества используют порошокобразный продукт.

Резольные полимеры и изделия на их основе стойки к влаге и минеральным маслам, но не стойки к электрическим искрам. Под действием даже слабых электрических разрядов поверхность отвержденных резольных полимеров и изделий из них легко науглероживается, т.е. создаются токопроводящие мостики между токоведущими частями. Поэтому пластмассовые изделия на основе резольных полимеров не рекомендуется применять там, где возможно образование электрических искр.

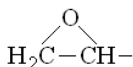
Новолачные полимеры получают в результате реакции поликонденсации между фенолом (или крезолом) и формальдегидом, причем формальдегида берут в меньшем количестве, чем фенола. При этом применяют кислотный катализатор, чаще всего соляную кислоту. Полученный после сушки новолачный полимер (густую массу коричневого цвета) в нагретом состоянии разливают в противни. В остуженном состоянии полимер представляет собой хрупкое твердое вещество аморфного строения, хорошо растворяющееся в этиловом и метиловом спиртах и в ацетоне.

Новолачные полимеры – термопластичные вещества, сохраняющие плавкость и растворимость при длительном хранении и даже при нагревании до 180°C. Эти полимеры могут быть переведены в неплавкое и нерастворимое состояние при нагревании их в смеси с уротропином (СН₂)₆N₄ – гексаметилентетрамином. Для этого в порошокобразный полимер вводят 7–12% гексаметилентетрамина и тщательно перемешивают. Из полученной массы прессуют изделия в стальных пресс-формах, нагретых до 160–180°C. При этих температурах уротропин разлагается на аммиак и формальдегид, которые

вступают в реакцию с новолачным полимером, превращая его в неплавкий и нерастворимый материал. Этот процесс протекает с очень большой скоростью; поэтому смеси новолачных полимеров с уротропином широко применяют в качестве основ быстропрессующихся пластмасс.

Пониженный уровень электрических характеристик и повышенная водопоглощаемость позволяют использовать новолачные полимеры главным образом для производства вспомогательных деталей в радиоаппаратуре (ручки, кнопки). Лучшие прессовочные материалы на основе новолачных полимеров используют для производства пластмассовых изделий, применяемых на низких частотах.

Эпоксидные смолы – преимущественно маловязкие жидкости желтого или светло-коричневого цвета. Это низкомолекулярные вещества (олигомеры), получаемые в результате поликонденсации хлорированного глицерина и диана (или резорцина). Образование эпоксидных олигомеров происходит в щелочной среде (25%-ный раствор едкого натра NaOH). Линейные молекулы олигомеров содержат эпоксидные группы



и поэтому называются эпоксидными. Эпоксидные группы обладают большой химической активностью.

При введении в жидкий эпоксидный олигомер порошкообразных или жидких отвердителей в нем начинают протекать процессы сшивания (соединения) линейных молекул олигомера в большие молекулы. Сшивание молекул происходит в области эпоксидных групп, в результате чего образуется твердое терморезистивное вещество – эпоксидный прозрачный полимер с высоким уровнем электрических и механических характеристик. Эти свойства эпоксидных полимеров широко используют в радиопромышленности для герметизации различных узлов радиоаппаратуры. Герметизируемые радиокомпоненты размещают внутри стальной формы, которую заполняют жидким эпоксидным олигомером с введенным в него отвердителем. После отверждения эпоксидного олигомера образуется твердый блок, с которого снимают металлическую форму. Чтобы уменьшить хрупкость отвержденных блоков, в исходный жидкий эпоксидный олигомер наряду с отвердителями вводят пластификаторы.

Лавсан (полиэтилентерефталат) – высокополимерный материал, получаемый в результате поликонденсации терефталевой кислоты и этиленгликоля. Образующийся при этом полимер представ-

ляет собой прозрачную густую жидкость, которая при быстром охлаждении превращается в твердый прозрачный материал с аморфной структурой, устойчивой до 80°C.

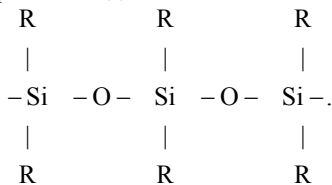
При температуре выше 80°C аморфная структура лавсана переходит в кристаллическую. Лавсан с аморфной структурой имеет плотность 1 320 кг/м³ и температуру размягчения 264°C, с кристаллической – плотность 1420 кг/м³ и ярко выраженную температуру плавления 260°C.

Широко применяемые электроизоляционные лавсановые пленки получают из расплавленного лавсана методом экструзии с последующей вытяжкой в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При этом пленка приобретает кристаллическую структуру, но остается прозрачной. Лавсановая пленка применяется в производстве конденсаторов, выпускается толщиной 3–25 мкм.

Материалы на основе лавсана обладают высокой стойкостью к грибковой плесени и другим микроорганизмам, повышенными механическими и электрическими характеристиками, нагревостойкостью до 150°C, холодостойкостью до –60°C. На основе лавсановой пленки изготавливают гибкий фольгированный диэлектрик ЛФ-1. Он представляет собой лавсановую пленку, на которую наклеена медная фольга. Этот диэлектрик применяют в производстве многослойных печатных плат, шлейфов, печатных проводов.

Полиорганосилоксаны (силиконы) – полимерные кремний-органические материалы, обладающие большой нагревостойкостью. Они объединяют очень большую группу диэлектриков, в которую входят электроизоляционные жидкости, каучуки и резины, пластмассы, лаки и компаунды. Характерными особенностями кремний-органических диэлектриков являются широкий интервал рабочих температур (от –60 до +200°C), влаго- и тропикостойкость, высокий уровень электрических характеристик.

В состав молекул кремнийорганических материалов входят атомы кремния и присоединенные к ним различного рода органические радикалы R, например CH₂, CH₃, C₂H₅ и др. Молекулы кремнийорганических полимеров выглядят так:



В основе этих молекул лежит силоксанная группировка атомов Si – O – Si – (кремний – кислород – кремний), отличающаяся довольно большой энергией связи. Это обуславливает большую нагревостойкость этих диэлектриков. Наличие силоксанной группировки атомов в молекулах таких полимерных материалов соответствует их названию – полиорганосилоксаны.

Кремнийорганические диэлектрики – слабополярные вещества; их электрические характеристики мало зависят от частоты переменного напряжения (рис. 7.1)

Электрические характеристики этих диэлектриков мало изменяются при нагревании (рис. 7.2), тепловом старении и пребывании в воде. Высокий уровень электрических характеристик и весьма малая зависимость их от частоты напряжения позволяют широко использовать кремнийорганические диэлектрики в радиоустройствах.

К достоинствам кремнийорганических диэлектриков также относятся широкий интервал рабочих температур (от -60 до $+180^{\circ}\text{C}$, а у многих из них от -70 до $+200^{\circ}\text{C}$ и выше), стойкость к увлажнению, электрическим искровым разрядам и тропикостойкость.

Полиимиды – нагревостойкие негорючие полимерные диэлектрики, которые могут длительно работать в широком интервале температур (от -190 до $+250^{\circ}\text{C}$). Высокий уровень электрических характеристик, химическая инертность и стойкость к радиационным излучениям позволяют широко использовать эти диэлектрики в специальной РЭА.

Полиимиды, широко применяемые в качестве диэлектриков, получают в результате поликонденсации диан-

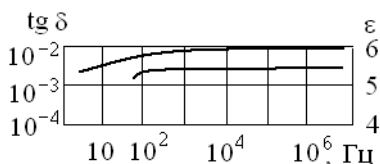


Рис. 7.1. Зависимость ϵ_r и $\text{tg } \delta$ кремнийорганического полимера от частоты переменного напряжения

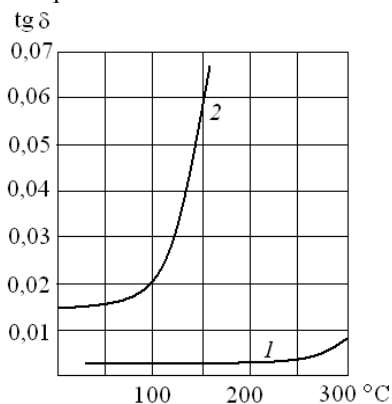


Рис. 7.2. Зависимость $\text{tg } \delta$ полимерных диэлектриков от температуры: 1, 2 – кремнийорганический и полиэфирный полимеры

гидрида пиромеллитовой кислоты и ароматических соединений – диаминов. Такие полиимиды называются полипиромеллитимидами. Эти диэлектрики, как правило, имеют аморфную структуру, которая только при длительной тепловой обработке переходит в кристаллическую. Полипиромеллитимидами обладают наибольшей нагревостойкостью по сравнению с другими полиимидами. Они не размягчаются до температуры начала их разложения (435°C) и ни в чем не растворяются, за исключением концентрированных серной и азотной кислот и некоторых щелочей.

Из полипиромеллитимида изготавливают изоляционную пленку толщиной 5–100 мкм (пленка ПМ). В зависимости от состава исходных веществ и ведения процесса полимеризации можно получать полиимиды с различной структурой молекул, а следовательно, различными свойствами. Так, пленки ПМ являются термореактивным веществом, не обладающим способностью размягчаться и свариваться. Пленки, изготовленные из полиимидов ДФ-ФГ, представляют собой термопластичное вещество с температурой размягчения 470°C. Они могут свариваться друг с другом и формироваться в нагретом состоянии в различного рода изделия. На основе термопластичных полиимидов изготавливают различные пластмассовые детали диэлектрического и конструкционного назначения. Для этого используют полиимиды как чистые, так и с введенными в них стекловолокном и другими нагревостойкими наполнителями.

Негорючесть, тропикостойкость, радиационная стойкость обуславливают большие перспективы применения полиимидов в радиоэлектронике.

7.4. Пластмассы

Пластмассы представляют собой твердые материалы, которые на определенной стадии производства приобретают свойство пластического течения. В результате этого из пластмасс могут быть получены литые или прессованные изделия заданной формы. Пластмассы, как правило, являются многокомпонентными материалами, состоящими из связующего вещества, наполнителей, пластификаторов, стабилизаторов, смазывающих веществ, отвердителей, красителей, порообразователей и др. Отдельные виды пластмасс представляют собой чистые полимеры (полистирол, полиэтилен), которые называют **ненаполненными** пластмассами.

Связующие – термопластичные или термореактивные полимеры и олигомеры. Назначение связующих в пластмассах состоит в пропитке и обволакивании наполнителей и в монолитном соединении всех компонентов в пластмассовом изделии. Состав и свойства связующего во многом определяют свойства пластмассы.

Так, если выбрать термопластичное связующее вещество (полистирол, поливинилхлорид), изготовленное пластмассовое изделие тоже будет термопластичным, способным размягчаться при нагревании до определенной температуры. Термореактивное связующее вещество (резольные, кремнийорганические и другие полимеры) придает термореактивность изготовленным пластмассовым изделиям.

Наполнители – химически инертные вещества, не вступающие в реакцию со связующими веществами. Они позволяют повысить механическую прочность и уменьшить объемную усадку изготовляемых пластмассовых изделий. Волокнистые наполнители (стеклянные, асбестовые и хлопковые волокна) повышают в значительной степени механическую прочность пластмасс. Неорганические наполнители (кварцевый и слюдяной порошки, стеклянное волокно) повышают коэффициент теплопроводности пластмасс и увеличивают их нагревостойкость. В пластмассах может содержаться 40–60% наполнителей.

Пластификаторы – густые маслообразные синтетические жидкости, вводимые в пластмассы для понижения хрупкости и повышения холодостойкости.

Стабилизаторы – вещества, вводимые в пластмассы для повышения стойкости к свету и нагреву.

Смазывающие вещества (стеарин, олеиновая кислота) вводятся в пластмассы для лучшего отделения от поверхности стальной пресс-формы отпрессованного изделия.

Отвердители – вещества, вводимые в некоторые пластмассы с целью развития процессов их отверждения. Основой этих процессов являются реакции полимеризации и поликонденсации.

Красители – вещества, придающие, пластмассовым изделиям равномерную окраску и повышающие их стойкость к свету.

Порообразователи – вещества, которые при нагревании выделяют большое количество газов, создающих пористую структуру в газонаполненных пластмассовых изделиях. Выбирая состав и количество компонентов пластмассы, можно получить детали с теми или иными механическими, тепловыми и электрическими характеристиками.

Исходными материалами для изготовления пластмассовых изделий являются пресс-порошки. Частицы этих порошков содержат все компоненты пластмасс. Методом горячего или холодного прессования из пресс-порошков изготавливают пластмассовые изделия радиотехнического или конструкционного назначения (ручки, кнопки).

Большинство пластмассовых изделий радиотехнического назначения получают методом горячего прессования при 130–180°C. Некоторые пластмассовые изделия могут быть изготовлены холодным прессованием, т.е. при температуре пресс-порошка и пресс-формы 20°C. Для обеспечения высоких электрических характеристик такие изделия должны подвергаться тепловой обработке в течение нескольких часов. Минимальная толщина стенок пластмассовых изделий горячего прессования 1,5 мм, холодного 4–5 мм. Плотность пластмасс 1 000–2 200 кг/м³.

Слоистые пластмассы (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит) представляют собой диэлектрики слоистой структуры, состоящие из чередующихся слоев листовых наполнителей (бумага, ткань или стеклоткань) и связующего вещества. Эти материалы часто называют слоистыми пластиками.

В **гетинаксе** наполнителем являются листы специальной бумаги толщиной 0,1 мм, пропитанные одним из бакелитовых спиртовых лаков на основе фенолформальдегидного или других бакелитовых олигомеров. После сушки листы бумаги собирают в пакеты, соответствующие толщине прессуемого гетинакса. Собранные пакеты прессуют между нагретыми до 150–160°C стальными плитами прессы при давлении 5,5–9,8 МПа. Время выдержки при прессовании 2–5 мин на 1 мм толщины прессуемого листа гетинакса. В процессе горячего прессования отдельные листы бумаги соединяются связующим веществом, образуя монолитный материал, а бакелитовая смола переходит в термореактивное состояние. Радиотехнические сорта гетинакса выпускают в виде листов толщиной 0,2–4 мм и площадью от 550 × 700 до 980 × 1 430 мм.

Текстолит отличается от гетинакса тем, что наполнителем в нем являются не листы бумаги, а хлопчатобумажная ткань. Для радиотехнических сортов текстолита применяют тонкую хлопчатобумажную или капроновую ткань. В качестве связующего вещества в текстолите применяют одну из бакелитовых смол. Производство текстолита существенно не отличается от производства гетинакса. Текстолит выпускают в виде листов толщиной 0,5–8 мм (марка ВЧ) и

площадью от 450×600 до $750 \times 1\,000$ мм, а также в виде трубок и стержней с внешним диаметром 6–60 мм.

Электрические характеристики текстолита несколько ниже, чем гетинакса, но сопротивление расслоению и ударная вязкость выше, поэтому его применяют там, где деталь может подвергаться ударным нагрузкам и расслаиванию. По нагревостойкости гетинакс и текстолит относятся к классу А (105°C).

Стеклотекстолит – слоистая пластмасса, наполнителем в которой является бесщелочная стеклоткань толщиной 0,06 мм. В качестве связующих веществ в нагревостойких стеклотекстолитах применяют кремнийорганические смолы. Для повышения клеящей способности в кремнийорганические связующие вводят небольшое количество эпоксидной смолы. В обычных сортах стеклотекстолита с нагревостойкостью 130°C в качестве связующих веществ применяют эпоксидно-фенолформальдегидный полимер в виде лака. Этим лаком предварительно пропитывают листы стеклоткани, а затем их сушат. Листы стеклоткани собирают в пакеты требуемой толщины, после чего прессуют при $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$. Стеклотекстолит выпускают толщиной 0,5 – 30 мм в листах площадью от 450×600 до 980×1480 мм.

Стеклотекстолит отличается от гетинакса и текстолита повышенной механической прочностью, стойкостью к увлажнению и лучшими электрическими характеристиками. Он хуже обрабатывается, так как стеклоткань очень изнашивает стальной режущий инструмент.

Все слоистые электроизоляционные пластмассы представляют собой монолитные, механически прочные материалы с хорошими электрическими характеристиками (приложение А).

Значительное применение в РЭА имеют фольгированные стеклотекстолиты на нагревостойких кремнийорганических связующих. Печатные платы из этих стеклотекстолитов допускают их работу при температурах от -70 до $+200^{\circ}\text{C}$. На одну или две поверхности слоистого пластика наклеивают медную фольгу толщиной 0,03–0,05 мм. Фольгу получают из проводниковой меди лучших сортов (марки М00 и М0), отличающейся наибольшей проводимостью.

Для лучшей адгезии фольги к слоистым диэлектрикам ее поверхность предварительно оксидируют. На оксидированную поверхность наносят тонкий слой специального клея (БФ-4 и др.), с помощью которого медная фольга прочно сцепляется с поверхностью листа слоистой пластмассы горячим прессованием. Слоистые пластмассы для печатных плат изготавливают толщиной 0,1–3 мм.

При изготовлении радиомонтажных изделий на поверхность фольгированного пластика наносится лак, сверху которого печатается тем или иным способом рисунок проводников. Затем излишки лака удаляются и оставшая часть медной фольги вытравливается в растворе хлорного железа.

Фольгированные слоистые пластмассы для печатных плат подвергаются дополнительным испытаниям после выдержки их в течение 96 ч в камерах с влажностью воздуха 98% при 40°C. При этом нормируются все электрические характеристики этих материалов. Так, у фольгированных гетинаксов $\text{tg } \delta \leq 0,03$, а у фольгированных стеклотекстолитов $\text{tg } \delta \leq 0,02$.

Газонаполненные пластмассы представляют собой совокупность мельчайших ячеек, образованных вспененным полимером и наполненных воздухом или каким-либо газом, выделяемым при нагревании композиции. В качестве газообразующих веществ применяются органические и неорганические вещества, способные разлагаться при нагревании. Такие электроизоляционные композиции обладают малыми ϵ_r и $\text{tg } \delta$ и являются радиопрозрачными материалами.

Газонаполненные пластмассы, состоящие из ячеек, изолированных друг от друга, называются **пенопластами**, а состоящие из ячеек, сообщающихся друг с другом, – **поропластами**. В радиотехнике в основном применяют пенопласты, так как они являются диэлектриками с более стабильными электрическими характеристиками и обладают достаточной влагостойкостью. Это легкие материалы, оформляемые в различного рода конструкции: излучатели, обтекатели антенн и др.

В РЭА наибольшее применение нашли пенопласты на основе полистирола и кремнийорганических полимеров, Полистирольные пенопласты обладают высокими электрическими характеристиками. Длительное воздействие влаги при повышенных температурах заметно снижает механические и электрические характеристики всех пенопластов.

7.5. Электроизоляционные лаки, эмали и компаунды

Электроизоляционные лаки являются растворами пленкообразующих веществ в органических растворителях. Слой лака, нанесенный на твердую поверхность, постепенно отверждается, образуя лаковую пленку – гибкую или хрупкую – в зависимости от состава лака. В качестве растворителей используют легко испаряющиеся

жидкости – бензол, толуол, ацетон, спирты. К пленкообразующим веществам относятся полимеры (полистирол, поливинилхлорид) и смолы (бакелитовые, эпоксидные, кремнийорганические и др.).

В состав некоторых лаков входят еще пластификаторы и сиккативы. Пластификаторы – вещества, придающие эластичность отвержденной лаковой пленке. В качестве пластификаторов применяют касторовое масло, жирные кислоты льняного масла. Сиккативы – жидкие или твердые вещества, вводимые в некоторые лаки, чтобы ускорить отверждение лака.

По своему назначению электроизоляционные лаки делят на пропиточные, покровные, эмаль-лаки и клеящие.

Пропиточные лаки применяют в радиоаппаратуре для пропитки обмоток трансформаторов, дросселей и др. Обмотки пропитывают лаками для прочного соединения их витков друг с другом, а также для устранения пористости изоляции проводов обмоток и повышения коэффициента теплопроводности. Одной из главных характеристик пропиточных лаков является вязкость. Чтобы пропиточный лак проникал в поры и капилляры многослойной обмотки, его вязкость должна быть очень малой.

Покровные лаки применяют для создания на поверхности пропитанных обмоток или печатных плат электроизоляционных защитных покрытий толщиной 0,04–0,2 мм большой сплошности – без пор. Отвержденные пленки покровных лаков должны обладать влагостойкостью, а в отдельных случаях тропикостойкостью и стойкостью к другим воздействиям.

Эмаль-лаки – одна из разновидностей покровных лаков, применяемых для тонкопленочной изоляции обмоточных проводов. Эти лаки должны обладать очень хорошей адгезией к медным и алюминиевым проводам, а также образовывать гибкую пленку с большим сопротивлением истиранию. Эмаль-лаки изготавливают на основе поливинилацеталевых, полиэфирных смол и других полимеров.

Клеящие лаки применяют для склеивания керамики с керамикой или керамики с металлом, а также пластмасс и других материалов. Растворы клеящих лаков должны обладать хорошей адгезией к различным твердым материалам и образовывать прочный клеевой шов. В качестве клеящих лаков широко применяют составы на основе эпоксидных, бутварно-фенольных и других полимеров.

По способу сушки (отверждению) все лаки делят на две группы: воздушной (холодной) и печной (горячей) сушки. У лаков воздушной сушки образование твердой пленки происходит при комнатной

температуре 20–25°C, печной сушки – при 60–200°C. Лаки печной сушки, как правило, обладают лучшими механическими и электрическими характеристиками.

В зависимости от используемых пленкообразующих веществ лаки делят на масляные и лаки на основе олигомеров и полимеров. В радиопромышленности наибольшее применение находят лаки на основе олигомеров и полимеров, обладающих хорошими электрическими и механическими характеристиками.

Важнейшими характеристиками лаков являются вязкость, время высыхания, термоэластичность, водопоглощаемость.

Вязкость (коэффициент внутреннего трения) определяет текучесть лака. Чем меньше вязкость, тем большей текучестью обладает лак и тем выше его пропитывающая способность.

Время высыхания лака определяют на образцах бумаги. Образец пропитывают лаком и сушат его при определенной температуре. После этого на поверхность образца накладывают кусочек фильтровальной бумаги и прижимают его грузом массой 200 г, действующим на металлическую пята площадью 1 см². Лак считается высохшим, если после снятия груза фильтровальная бумага не прилипает к поверхности образца. При этом отмечают время высыхания лака.

Термоэластичность лака – время (в часах) воздействия температуры на отвержденную лаковую пленку, по истечении которого на ней появляются трещины при изгибании вокруг стального стержня Ø 3 мм. Для этих испытаний лак наносят на отрезки медной ленты толщиной 0,1 мм, на которой образуется лаковая пленка толщиной 0,05 мм.

В РЭА широко применяют заливочные компаунды для герметизации радиокомпонентов и узлов радиоаппаратуры, наибольшее распространение из которых получили эпоксидные, кремнийорганические и компаунды МБК (метакрилбутиловые компаунды). Герметизация означает полную изоляцию радиокомпонента от воздействия внешней среды.

7.6 Радиокерамические материалы

Название «керамические» материалы происходит от греческого слова «керамос», что означает глина. Большое количество керамических материалов в исходном состоянии содержит природные глины. Основным признаком керамических материалов является то, что в готовом виде они представляют собой твердые хрупкие тела, получае-

мые в результате реакций, протекающих между их исходными компонентами при высоких температурах (1 200–1 600°С). Отличительными особенностями всех керамических материалов являются химическая инертность, негигроскопичность, высокая нагреевостойкость.

Все керамические изделия изготавливают из исходных керамических масс, состоящих из нескольких компонентов, предварительно измельченных до тонкодисперсного состояния. Во многие исходные керамические массы вводят природные глины и воду, что позволяет создавать пластичные тестообразные массы, из которых методом пластичной формовки или протяжки получают изделия заданной формы. В некоторые исходные керамические массы глины не вводят. Из таких порошкообразных масс изделия получают только методом прессования.

Полученные тем или иным способом керамические изделия представляют собой полуфабрикаты. Они не обладают достаточной плотностью, механической прочностью и необходимыми электрическими характеристиками. Чтобы получить керамические детали с требуемыми механическими и электрическими характеристиками, полуфабрикат подвергают обжигу – высокотемпературной обработке в печах. При обжиге в керамических изделиях протекают сложные химические реакции между частицами исходных компонентов. Конечные температуры обжига 1 200–1 600°С.

Радиокерамические материалы условно делят на радиоустановочные, конденсаторные и пьезокерамические.

7.6.1. Радиоустановочные керамические материалы

Радиоустановочные керамические материалы применяют в качестве твердых изоляционных оснований плат в интегральных толстопленочных микросхемах. Из этой керамики также изготавливают ламповые панели, каркасы катушек, основания для галетных переключателей и др.

Электротехнический фарфор состоит из 50% природных глин, 25% кварца и 25% полевого шпата. Кварц и полевой шпат представляют собой природные минералы. Из-за больших диэлектрических потерь и высокой электропроводности при 80°С и выше электротехнический фарфор в настоящее время в радиоэлектронике не применяют; его заменили ультрафарфор и стеатит.

Ультрафарфор по составу исходной массы отличается от электротехнического фарфора тем, что природный минерал – полевой

шпат заменен углекислым барием BaCO_3 . Так же как и полевои шпат, оксид бария, образующийся при термическом разложении бария $\text{BaCO}_3 = \text{BaO} + \text{CO}_2\uparrow$, является стеклообразующим компонентом, создающим в фарфоре стеклоподобное аморфное вещество (стеклофазу). Введение углекислого бария (более чистого вещества по сравнению с полевым шпатом) позволило уменьшить электропроводность и диэлектрические потери в ультрафарфоре. Кроме того, в исходную массу ультрафарфора вводят 45–50% по массе чистого глинозема Al_2O_3 за счет резкого уменьшения количества природных глини. В остальном состав исходной ультрафарфоровой массы не отличается от исходной массы электротехнического фарфора.

Ультрафарфор (по массе) состоит из кристаллов корунда (30–35%), муллита (35%) и стекла (30–35%). Равномерная и мелкозернистая (2–3 мкм) структура ультрафарфора улучшает механические и электрические характеристики этого материала.

Стеатит в своей исходной массе содержит 65–80% (по массе) природного минерала – талька $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$, а также глинистые вещества и стеклообразующие компоненты (углекислый барий или углекислый кальций).

Процесс изготовления стеатита проходит в несколько этапов.

Все компоненты исходной стеатитовой массы тонко измельчают, а затем смешивают друг с другом и с водой. В результате этого получают пластичную стеатитовую массу, из которой изделия формируют методом пластичной формовки с последующим обжигом их в печах. Стеатитовые изделия для РЭА получают из жидких литейных стеатитовых масс методом литья. Для этого куски сырой пластичной массы предварительно обжигают в печах при 1 000–1 100°С.

В результате обжига получают стеатитовый спек – твердый хрупкий материал, который затем измельчают до тонкодисперсного порошка. Этот порошок вводят в расплавленный парафин и тщательно перемешивают. В результате получают литейную стеатитовую массу, которую подвергают вакуумной обработке для удаления из нее воздуха.

Из полученной литейной стеатитовой массы изделия изготавливают методом литья под давлением в стальных формах. Этим методом можно получать стеатитовые изделия самой сложной формы (каркасы катушек, платы сложного профиля, например в виде галет). Отлитые изделия могут быть подвергнуты всем видам механической обработки.

Конечной технологической операцией всех керамических изделий является термическая обработка – обжиг при 1 200–1 600°С.

Структуры готовых стеатитовых деталей состоят из 60–70% кристаллов клиноэнстатита $MgO \cdot SiO_2$ и 30–40% стекла. (Стекло равномерно распределено между кристаллами клиноэнстатита.) Наличие в стеатите значительного количества кристаллического вещества обеспечивает высокие электрические и механические характеристики этого материала.

Ультрафарфор и стеатит применяют для изготовления радиокомпонентов больших габаритов: каркасы катушек, ламповые панели, платы и др.

В современной радиоэлектронике для интегральных микросхем требуются диэлектрические материалы с большой однородностью и плотностью микроструктуры, позволяющие применять тонкое шлифование. Этим требованиям отвечают высокоглиноземистые радиокерамические материалы на основе оксида алюминия Al_2O_3 . Исходные массы этих материалов содержат 95–100% чистого глинозема, который подвергают предварительной термической обработке – обжигу.

Изделия из высокоглиноземистых корундовых керамических масс получают методами прессования или литья в стальных формах. После обжига при 1 500–1 800°C готовые изделия могут содержать 95–99% кристаллов корунда ($\alpha - Al_2O_3$) и 5–1% стекла. Стекло располагается в виде тонких прослоек, соединяющих кристаллы корунда. Во многих высокоглиноземистых радиокерамических материалах имеется также небольшое количество ($\approx 1\%$) пор, которое отрицательно сказывается на их свойствах. Минимальной пористостью обладают изделия, полученные методом горячего прессования.

Разработан беспористый высокоглиноземистый керамический материал – *поликор*, обладающий оптической прозрачностью и высоким уровнем электрических и механических характеристик. Поликор получают из глинозема очень высокой чистоты с добавлением в исходную массу 0,1–0,2% MgO для замедления роста кристаллов корунда в процессе обжига поликоровых изделий. В результате этого получается совершенно беспористый прозрачный керамический материал, состоящий из развитых кристаллов корунда размером 30–40 мкм. Кроме поликора созданы микролит и др.

Основные области применения высокоглиноземистых керамических материалов – нагревостойкие диэлектрические подложки микросхем, изоляционные детали магнетронов и др.

Керметы – это искусственные композиционные материалы, состоящие из керамического вещества и металла. Они образуются в результате взаимодействия высоконагревостойких оксидов или кар-

бидов с металлами в процессе спекания при высоких температурах. Таким образом получается металлодиэлектрический материал, в котором частицы металла связывают друг с другом зерна керамики. В качестве металлов применяют вольфрам, молибден, хром, никель. Керметы сочетают в себе высокую нагревостойкость, большую твердость и химическую инертность керамики с хорошей теплопроводностью и несколько повышенной электропроводностью, что обеспечивается металлической частью керметов. В радиоэлектронике керметы применяют в пленочных интегральных микросхемах для создания резистивных тонкопленочных слоев.

7.6.2. Конденсаторные керамические материалы

Технология изготовления керамических конденсаторов значительно проще технологии изготовления слюдяных, пленочных и бумажных конденсаторов. Кроме того, керамические конденсаторы не нуждаются в герметизации, так как керамические материалы в готовом виде не поглощают влагу.

Конденсаторные керамические материалы должны обладать большой диэлектрической проницаемостью. Для этого в них должны интенсивно развиваться процессы поляризации. Конденсаторные керамические материалы представляют собой соединения диоксида титана TiO_2 , или диоксида олова SnO_2 , или диоксида циркония ZrO_2 , с одной стороны, и оксидов щелочных или щелочноземельных металлов CaO , MgO , SrO – с другой. Материалы, изготовленные на основе диоксида титана, называют титанатами, на основе диоксида олова – станнатами, на основе диоксида циркония – цирконатами.

В производстве керамических материалов исходные массы получают при тщательном смешивании предварительно измельченных порошкообразных диоксидов титана, олова или циркония с соответствующими оксидами щелочных или щелочноземельных металлов. Для придания пластичности в некоторые исходные массы вводят небольшое количество глинистых веществ. Однако это, как правило, приводит к ухудшению электрических характеристик конденсаторных керамических материалов: снижению диэлектрической проницаемости, увеличению $\text{tg } \delta$ и т. д.

Изготовленные по керамической технологии конденсаторы представляют собой твердые, неувлажняемые изделия. На их поверхность методом вжигания наносят сплошные серебряные электроды толщиной 15–20 мкм, к которым припаивают медные про-

водники. Для защиты электродов от коррозии и исключения возможности соединения их с влагой всю поверхность конденсатора покрывают слоем влагостойкой эмали той или иной окраски. Цвет эмали указывает на температурную стабильность емкости конденсатора.

Характеристики конденсаторных керамических материалов приведены в табл. 3. Все конденсаторные керамические материалы обладают большими значениями удельных объемных электрических сопротивлений и электрической прочности: $\rho_V = 10^{11} \div 10^{13}$ Ом·м; $E_{пр} = 20 \div 25$ МВ/м.

Таблица 3

Основные характеристики конденсаторных керамических материалов

Материал	Химическая формула основы	ϵ_r , отн.ед. ($f = 1$ МГц)	ТК ϵ , 1/°С	tg δ ($f = 1$ МГц)	$\sigma_{и}$, МПа
Титанат магния	MgTiO ₃	14	+70·10 ⁻⁶	0,0003	100–120
Титанат кальция	CaTiO ₃	150	-1500·10 ⁻⁶	0,0004	120–130
Титанат стронция	SrTiO ₃	250	-250·10 ⁻⁶	0,0003	90–110
Станнат кальция	CaSnO ₃	150	+110·10 ⁻⁶	0,0005	80–90
Станнат стронция	SrSnO ₃	18	+180·10 ⁻⁶	0,0005	90–100
Цирконат кальция	CaZrO ₃	25	+50·10 ⁻⁶	0,0003	80–90
Цирконат бария	BaZrO ₃	38	-350·10 ⁻⁶	0,0005	80–100

7.7. Стекла и ситаллы

Стекла являются аморфными термопластичными веществами неорганического или органического происхождения. В РЭА наибольшее применение получили стекла неорганического происхождения. Они представляют собой сплавы специально подобранных оксидов. Важнейшими из них являются диоксид кремния SiO₂, глинозем Al₂O₃, щелочные Na₂O и K₂O и щелочноземельные оксиды кальция СаО, бария ВаО, свинца PbO и цинка ZnO.

Сырьевыми материалами для стекол служат кварцевый песок, полевой шпат, борная кислота Н₃ВО₃, кальцинированная сода Na₂СО₃, доломит и др.

Все сырьевые материалы предварительно измельчают, отвешивают согласно заданному составу и тщательно перемешивают. Полученную шихту загружают в стекловаренную печь. При нагревании до 1 300–1 650°C шихта плавится, летучие части CO₂, SO₃ удаляются из нее, а оставшиеся оксиды вступают в сложные реакции, образуя жидкую однородную стекломассу. Из нее методами горячего прессования, литья и другими способами можно получать стеклянные изделия различных форм и размеров. Чтобы стекло не закристаллизовалось, изделия быстро охлаждают.

Самыми высокими электрическими и физико-химическими характеристиками обладает кварцевое стекло. Оно относится к группе бесщелочных стекол и получается из расплавленного природного кварца (горного хрусталя). Изделия из кварцевого стекла совершенно прозрачны и имеют высокий уровень электрических характеристик: $\rho_v = 10^{14} \div 10^{15}$ Ом·м; $\epsilon_r = 3,2 \div 3,5$; $\text{tg } \delta = 0,0002$; $E_{\text{пр}} = 35 \div 40$ МВ/м. Эти изделия обладают самым малым значением КТР = $5 \cdot 10^{-7}$ 1/°C, что обеспечивает им очень высокую термостойкость. Кварцевое стекло относится к высокочастотным диэлектрикам, но изготовление из него изделий ограничено из-за очень высокой температуры плавления (выше 1 713°C) и трудности получения из него изделий сложного профиля.

Самыми легкоплавкими являются щелочные стекла, которые в своем составе имеют более 10% щелочных оксидов, но в этих стеклах наблюдается очень заметная ионная электропроводность и большие диэлектрические потери. Наиболее широкое применение в качестве электроизоляционных материалов имеют малощелочные стекла, содержащие не более 5% щелочных оксидов.

Это сравнительно легкоплавкие стекла (1 450°C) с вполне удовлетворительными электрическими характеристиками: плотность 2 600–3 500 кг/м³; $\sigma_n = 250$ МПа; $\rho_v = 10^{12}$ Ом·м; $\epsilon_r = 4,2 \div 7,0$; $\text{tg } \delta = 0,001 \div 0,008$; $E_{\text{пр}} = 20 \div 30$ МВ/м.

Стекла применяют для изготовления стеклянных конденсаторов, небольших проходных изоляторов, диэлектрических подложек для микросхем и др.

Ситаллы – это закристаллизованные стекла, имеющие микрокристаллическую структуру. Если у лучших радиокерамических материалов (стеатит, ультрафарфор) размеры кристаллов составляют 10–20 мкм, у ситаллов – 0,02–1 мкм.

Содержание стекла в ситаллах не превосходит 5–10%. Характерной особенностью ситаллов является то, что микрокристаллическая

структура по всему их объему однородна с равномерным распределением стеклофазы. Это обеспечивает высокие механические и электрические характеристики ситаллов и полное отсутствие пористости, газопроницаемости и водопоглощаемости.

По механической прочности ситаллы превосходят керамические материалы и даже многие металлы.

Ситаллы применяют в качестве механически прочных изоляционных оснований (подложек) для тонкопленочных микросхем. Ситаллы характеризуются большой механической прочностью и весьма низкими значениями КТР = $(3 \div 30) \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Это позволяет применять ситаллы также для обтекателей антенн летательных аппаратов и других радиокомпонентов с повышенной механической прочностью и термостойкостью.

Микрокристаллическая структура ситаллов обусловлена соответствующим составом стекла. Кроме того, в них вводят (в очень малых количествах) специальные ускорители кристаллизации, например золото, серебро, платину, которые вызывают кристаллизацию стеклянных изделий при их облучении ультрафиолетовым или γ -излучением. Таким образом получают изделия из фотоситаллов.

Катализаторами могут быть не только благородные металлы, но и медь, а также оксиды металлов TiO_2 , ZnO , хорошо растворимые в стекле. Эти катализаторы вызывают кристаллизацию стеклянных изделий при их ступенчатой термической обработке при $550 - 880$ и $1\ 100 - 1\ 350^\circ\text{C}$, в результате чего получают изделия из термоситаллов.

Основные характеристики ситаллов: плотность $2600 - 3000 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_{\text{н}} = 160 \div 280 \text{ МПа}$; $\rho_{\text{V}} = 10^{12} \div 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\epsilon_{\text{r}} = 7,5 \div 8,5$; $\text{tg}\delta = (3 \div 38) \cdot 10^{-4}$; $E_{\text{пр}} = 40 \div 60 \text{ МВ/м}$.

7.8. Пьезоэлектрические материалы

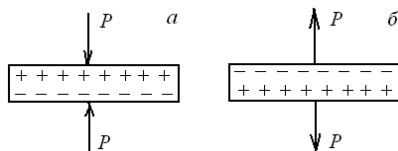


Рис. 7.3. Прямой пьезоэффект при сжатии (а) и растяжении (б) пьезоэлектрика

Пьезоэлектрические материалы относятся к активным диэлектрикам, им свойственны прямой и обратный пьезоэффекты. **Прямой пьезоэффект** заключается в том, что при сжатии или растяжении пластинки пьезоэлектрического материала на ее про-

тивоположных поверхностях наводятся электрические заряды противоположного знака (рис. 7.3, а, б). Это происходит в результате поляризации пьезоэлектрика.

Обратный пьезоэффект заключается в том, что при приложении к пластинке пьезоэлектрика постоянного напряжения она деформируется. Под действием переменного напряжения пластинка пьезоэлектрика колеблется с частотой приложенного напряжения.

Явление обратного пьезоэффекта используется в радиотехнике для стабилизации высокочастотных колебаний, прямого пьезоэффекта – в датчиках давления, звукоснимателях и др.

Основной характеристикой пьезоэлектрика является пьезомодуль $d = Q / P$, выражающий отношение наведенного на пьезоэлектрике электрического заряда Q , Кл, к механическому усилию P , Н, приложенному к пьезоэлектрику в том или ином направлении. Пьезомодуль выражают в кулонах на ньютон (Кл/Н).

Пьезоэлектрики – кристаллические материалы (монокристаллы и вещества поликристаллического строения) – могут быть естественного происхождения (кварц, турмалин) и синтетические (сегнетова соль, титанат бария и др.).

Природный кварц SiO_2 представляет собой большие полупрозрачные кристаллы в виде шестигранных призм, заканчивающихся шестигранными пирамидами. В кристалле кварца различают главные оси x, y, z (рис. 7.4, а, б).

Три электрические оси x проходят через вершины поперечного сечения шестиугольника. Три механические оси y расположены перпендикулярно сторонам того же шестиугольника. Оптическая ось z проходит через вершины пирамид, которыми заканчивается кристалл кварца.

Электрические характеристики кварца изменяются в зависимости от направления кристаллографической оси, по которой их определяют. Так, в направлении оси z $\rho_V = 10^{12}$ Ом·м; $\epsilon_r = 4,58$; $\text{tg } \delta = 0,0003$ и в направлении

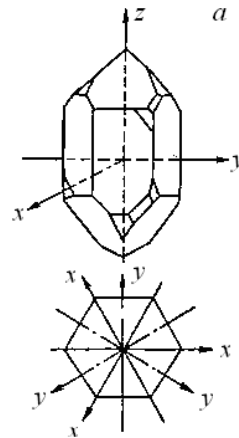


Рис. 7.4. Монокристалл кварца с главными осями (а) и его поперечное сечение (б)

оси x или y $\rho_V = 10^{14}$ Ом·м; $\epsilon_r = 4,41$; $\text{tg}\delta = 0,0002$. Плотность кристалла кварца $2\,650$ кг/м³, температура плавления $1\,713^\circ\text{C}$.

Если из кристалла кварца вырезать пластину, ребра которой будут параллельны осям x , y , z , и подвергнуть ее растяжению по оси x или y , на перпендикулярных этой оси гранях возникнут равные по величине, но противоположные по знаку электрические заряды (прямой пьезоэффект). Наибольшая величина заряда получается в том случае, когда пластина вырезана перпендикулярно электрической оси x . При этом кварцевая пластина обладает наибольшим значением пьезомодуля ($d = 2,3 \cdot 10^{-2}$ Кл/Н).

Из кристаллов природного кварца алмазным инструментом вырезают заготовки пьезоэлементов, которые затем шлифуют. На противоположные поверхности кварцевых пластин наносят металлические электроды. Для стабилизации свойств полученные пьезоэлементы подвергают искусственному старению при повышенных температурах.

Сегнетова соль $\text{Na KC}_4 \text{H}_4\text{O}_6 \times 4\text{H}_2\text{O}$, полученная французским ученым П. Сегнетом, является монокристаллическим диэлектриком, плавящимся при 55°C и растворяющимся в воде. Сегнетоэлектрические свойства сегнетовой соли проявляются только в направлении одной кристаллографической оси. Пьезоэффект у сегнетовой соли наблюдается при кручении ее образца.

Характерные свойства сегнетоэлектриков следующие: очень большие значения диэлектрической проницаемости, достигающие нескольких тысяч единиц; зависимость диэлектрической проницаемости от приложенного напряжения; сегнетоэлектрические свойства, которые наблюдаются только в определенном интервале температур – ниже температуры Кюри (T_K); наличие прямого и обратного пьезоэффекта, но обратный пьезоэффект наблюдается только у образцов, предварительно поляризованных внешним электрическим полем; наличие электрического гистерезиса (рис. 7.5), т.е. отставание электрического заряда Q от напряжения U , приложенного к сегнетоэлектрику.

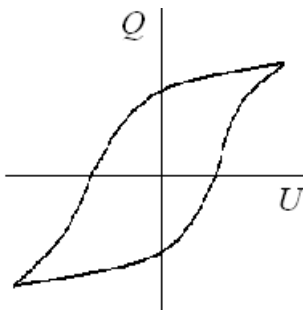


Рис. 7.5. Электрический гистерезис сегнетоэлектрика

Керамические сегнетоэлектрики отличаются высокими нагревостойкостью и механической прочностью, неигроскопичностью и простотой технологии изготовления. Из керамических сегнетоэлектриков наибольшее практическое значение имеет титанат бария BaTiO_3 температура Кюри у которого 120°C . При температуре ниже T_k титанат бария обладает всеми сегнетоэлектрическими свойствами, а при температуре выше T_k сегнетоэлектрические свойства исчезают.

Кроме титаната бария в настоящее время создано большое количество сегнетокерамических материалов: титанат кадмия CdTiO_3 , титанат свинца PbTiO_3 , ниобат лития LiNbO_3 и др. Эти сегнетоэлектрики отличаются друг от друга главным образом значениями температуры Кюри. Так, у титаната кадмия $T_k = -223^\circ\text{C}$, а у ниобата лития $T_k = +450^\circ\text{C}$.

Основные электрические характеристики кварца и керамических сегнетоэлектриков приведены в табл. А3 (приложение А).

Большие значения диэлектрической проницаемости сегнетокерамических материалов позволяют изготавливать из них малогабаритные низкочастотные конденсаторы низкого напряжения, так как значения $\text{tg}\delta$ этих материалов относительно велики, а электрическая прочность относительно мала.

7.9. Электреты

Электреты представляют собой твердые диэлектрики, которые после их электризации и поляризации длительное время сохраняют электрический заряд и могут служить источниками электричества.

Электреты изготавливают в виде тонких пластин. На противоположных сторонах пластины электрета сосредоточены электрические заряды, равные по величине, но противоположные по знаку.

Основной характеристикой электрета является поверхностная плотность электрического заряда $\sigma = Q / S$, $[\text{Кл}/\text{м}^2]$. Числовые значения поверхностной плотности зарядов электретов находятся в пределах: $\sigma = 10^{-8} \div 10^{-6} \text{ Кл}/\text{м}^2$.

Для изготовления электретов, длительно сохраняющих свой заряд, применяют диэлектрики, обладающие большим удельным объемным электрическим сопротивлением (табл. 4).

Электреты могут быть получены в результате воздействия на сильно нагретый диэлектрик внешнего электрического поля с последующим охлаждением диэлектрика в этом поле. Нагрев диэлектрика облегчает дипольную поляризацию полярного диэлектрика, а

также вызывает накопление электрических зарядов у поверхности поляризуемого диэлектрика. После охлаждения диэлектрика в электрическом поле достигнутая ориентация диполей и накопление объемных зарядов у поверхности поляризуемого диэлектрика сохраняются. В результате такой обработки получают *термоэлектреты*.

Т а б л и ц а 4

Органические и неорганические электреты

Электрет	ϵ_r	$\rho_V, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$	$\sigma, \text{ мкКл/м}^2$	Материал
Политетрафторэтилен	2	10^{16}	80	Полимер
Поликарбонат	3	10^{14}	50	Полимер
Полиэтилентерефталат	3	10^{14}	30	Полимер
Полиметилметакрилат	4	10^{12}	30	Полимер
Титанат магния	15	10^{11}	60	Керамика
Титанат кальция	150	10^{11}	80	Керамика

Фотоэлектреты получают при воздействии мощного источника света на диэлектрик, к которому приложено постоянное напряжение. Под действием света и электрического напряжения электрические заряды из объема диэлектрика притекают к его поверхности. После выключения света и электрического напряжения накопленные заряды на противоположных поверхностях электрета сохраняются.

Радиоэлектреты получают при воздействии на диэлектрик радиоактивного излучения (например, при бомбардировке поверхности диэлектрика быстрыми электронами или при воздействии на диэлектрик, помещенный в вакуум, сильного электрического поля).

Электроэлектреты получают при воздействии на диэлектрик *только электрического поля* без нагрева или облучения, но физический процесс электризации остается тем же, что и при получении термоэлектретов. При получении электроэлектрета в зазоре между электродом и диэлектриком в сильном поле образуется газовый разряд; ионы газа, ускоренные полем, бомбардируют поверхность, создавая дефекты и стабильные заряды в поверхностном слое.

Трибоэлектреты получают при помощи контактной электризации, возникающей при трении двух диэлектриков. При этом часть зарядов (электронов) с поверхности одного диэлектрика, обладающего меньшей работой выхода, переходит на другой.

Это радио- и трибоэлектреты являются моноэлектретами, так как в них нет перераспределения зарядов по противоположным поверх-

ностям. Они обладают только зарядом одного знака. Моноэлектреты нестабильны из-за быстрой компенсации заряда.

У всех электретов, полученных тем или иным способом, поверхностная плотность зарядов уменьшается, а затем наступает их стабилизация.

Стабилизированные электреты могут служить источниками электричества в течение нескольких десятков лет. Но на их электрические свойства оказывают влияние температура, влажность и проникающая радиация.

Действие влаги и радиации носит обратимый характер. Поверхностная плотность зарядов уменьшается почти до нуля, но после удаления вредного воздействия электрические свойства восстанавливаются. Нагрев электретов до критической температуры приводит к необратимым изменениям свойств – к рассеиванию электрических зарядов.

8. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРОВОДА

8.1. Основные свойства металлических проводниковых материалов

Металлические проводниковые материалы должны обладать высокой электропроводностью, достаточной механической прочностью, а также пластичностью, позволяющей получать тонкие провода, ленты и фольгу, и стойкостью против окисления кислородом воздуха.

Металлические проводниковые материалы представляют собой вещества поликристаллического строения, т.е. они состоят из множества мелких кристаллов. Большинство металлических проводниковых материалов обладает очень высокой электропроводностью ($\rho = 0,0150 \div 0,0283$ мкОм·м). Это преимущественно чистые металлы, которые используют для изготовления обмоточных и радиомонтажных проводов и кабелей.

Наряду с этим в радиоэлектронике применяют проводники с большим электрическим сопротивлением – сплавы различных металлов. У металлических (резистивных) сплавов $\rho = 0,4 \div 2,0$ мкОм·м. Эти сплавы составляют группу металлических материалов с малым температурным коэффициентом удельного сопротивления (ТКр) и применяются для изготовления проволочных резисторов и других

радиокомпонентов, в небольшом объеме которых нужно создать большое электрическое сопротивление.

Чтобы повысить удельное электрическое сопротивление проводников, применяют сплавы нескольких металлов. Установлено, что сплавы, представляющие собой твердые растворы с неупорядоченной структурой, обладают повышенными значениями удельного сопротивления и малыми значениями ТКР. Сплавы, в кристаллической решетке которых неправильное чередование атомов металлов, называются сплавами с неупорядоченной структурой. Все металлические проводники обладают высокой, пластичностью, позволяющей получать провода диаметром до 0,01 мм и ленты толщиной 0,05–0,1 мм.

8.2. Чистые металлы и сплавы, применяемые в радиоэлектронике

Из металлов в радиоэлектронике главным образом применяют медь, алюминий, серебро и золото, а из сплавов – бронзу, латунь и ковар.

Медь – главный материал, обладающий высокой пластичностью, достаточной механической прочностью и высокой электропроводностью. По электропроводности медь стоит на втором месте после серебра. Медь имеет красновато-оранжевый цвет и температуру плавления 1 083°C. Коэффициент температурного расширения меди $\text{КТР} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Примеси в металлах оказывают неблагоприятное влияние на их электрические и механические свойства. Поэтому для изготовления проводов применяют сорта меди, в которых сумма всех примесей не должна превышать 0,1%.

Бронза представляет собой сплавы меди с оловом (оловянная бронза), алюминием (алюминиевая), бериллием (бериллиевая) и с другими легирующими элементами. Марки бронзы обозначаются буквами Бр (бронза), за которыми следуют буквы и цифры, показывающие, какие легирующие элементы и в каком количестве содержатся в данной бронзе.

В отношении электропроводности бронза уступает меди, но превосходит ее по механической прочности, упругости, сопротивлению истиранию и коррозионной стойкости.

Латунь – сплав меди с цинком, в котором наибольшее содержание цинка может составлять 45 % (по массе), но латунь, обладающая наибольшей пластичностью, содержит 30% цинка и менее.

Латунь дешевле меди, поэтому там, где не нужна высокая электропроводность, экономически более целесообразно изготавливать такие детали из латуни. Деформируемая латунь подвержена коррозии во влажной атмосфере в большей степени, чем медь. Марки латуни обозначаются буквой Л (латунь), за которой следуют буквы и цифры, указывающие содержание меди и других компонентов.

Основные характеристики бронзы, латуни и меди приведены в табл. Б1 (приложение Б).

Ковар – сплав никеля (28,7–29,2% по массе), кобальта (17,3–18%) и железа (остальное). Характерной особенностью ковара является близость значений его КТР = $(4,3 \div 5,4) \cdot 10^{-6}$ 1/°С к значениям КТР стекла и керамики в интервале 20–200°С. Это позволяет производить согласованные, герметичные спаи ковара со стеклом и керамикой.

Алюминий является вторым после меди проводниковым материалом благодаря сравнительно большой электропроводности и стойкости к атмосферной коррозии. Он относится к группе легких металлов, поскольку его плотность 2700 кг/м³, т.е. он в 3,3 раза легче меди. Алюминий – металл серебристо-белого цвета с температурой плавления 658°С – отличается малой твердостью и сравнительно небольшой механической прочностью при растяжении ($\sigma_p = 80 \div 180$ МПа). Кроме того, алюминий имеет увеличенный по сравнению с медью КТР = $24 \cdot 10^{-6}$ 1/°С. Это является недостатком алюминия.

На воздухе алюминий очень быстро покрывается тонкой пленкой оксида Al₂O₃, которая надежно защищает его от проникновения кислорода воздуха. В то же время эта пленка обладает значительным электрическим сопротивлением и в плохо защищенных от влаги местах соединений алюминиевых проводов могут быть большие переходные сопротивления.

При увлажнении мест соединения алюминиевых проводов с проводами из других металлов могут образоваться гальванические пары. При этом алюминиевый провод будет разрушаться возникающими местными гальваническими токами. Чтобы избежать образования гальванических пар, места соединений тщательно защищают от влаги (например, лакированием). Чем выше химическая чистота алюминия, тем лучше он сопротивляется коррозии.

Серебро относится к группе благородных металлов, не окисляющихся на воздухе при комнатной температуре. Интенсивное окисление серебра начинается при 200°С и выше. Серебро отлича-

ется высокой пластичностью, позволяющей получать фольгу и проволоку диаметром до 0,01 мм с наивысшей электропроводностью.

Из серебра выполняют защитные слои на медных жилах радиомонтажных проводов, используемых при температурах до 250°C. Серебро наносят на внутреннюю поверхность волноводов для получения слоя с высокой электропроводностью, а также вводят в припои (ПСр10, ПСр50), применяемые для пайки токопроводящих частей в РЭА.

Золото, в отличие от серебра, не окисляется на воздухе даже при высоких температурах. Оно обладает весьма высокой пластичностью, позволяющей получать из него фольгу толщиной до 0,005 мм и проволоку диаметром до 0,01 мм.

Золото применяют для тонкопленочных контактных покрытий при коммутации малых токов в микросхемах, а также для покрытия стенок волноводов и резонаторов СВЧ.

Хром – металл серебристо-серого цвета, который очень медленно окисляется на воздухе при комнатной температуре. В зависимости от способа получения хром может быть двух кристаллических модификаций: объемно-центрированный куб или плотная гексагональная упаковка.

Хром относится к группе тугоплавких металлов, его температура плавления колеблется в пределах 1 800–1 903°C в зависимости от структуры и содержания примесей. В вакууме хром испаряется при значительно более низких температурах (1 200°C). Плотность хрома 7 180 кг/м³.

Хром обладает очень высокой адгезией к стеклам, ситаллам и керамике, поэтому его широко применяют в тонкопленочных микрорезистивных схемах в качестве подслоя. На подслои хрома наносят распылением в вакууме металлы с большой электропроводностью (серебро, золото, медь и др.), но не обладающие хорошей адгезией к диэлектрическим подложкам микросхем.

Кроме того, хром широко используют для получения тонкопленочных резисторов, поскольку он обладает повышенными значениями удельного электрического сопротивления $\rho = 0,25 \div 0,30$ мкОм·м (монокристаллический металл). Тонкие пленки хрома в микросхемах имеют поверхностное сопротивление $R_{\square} = 100 \div 500$ Ом/□.

8.3. Сплавы, обладающие большим удельным электрическим сопротивлением

Основными представителями этой группы проводниковых материалов являются манганин и константан.

Манганин – сплав 85–89% меди, 2–3% никеля и 11–13% марганца (В некоторые сорта манганина вводят еще кобальт). Так же как все сплавы с большим удельным сопротивлением, манганин имеет неупорядоченную кристаллическую структуру. Цвет манганина – светло-оранжевый, плотность $8\,400\text{ кг/м}^3$, температура плавления 960°C , $\text{КТР} = 18 \cdot 10^{-6}\text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Достоинством манганиновых изделий является очень малая зависимость удельного электрического сопротивления от температуры, а также весьма малая термо-эдс при контакте манганина с медью ($0,9\text{--}1\text{ мкВ/}^\circ\text{C}$).

Для стабилизации электрических характеристик манганиновые изделия подвергают термической обработке в вакууме при 450°C и последующей длительной выдержке при комнатной температуре, в результате чего повышается однородность сплава и стабилизируются его свойства. Наибольшая допустимая рабочая температура для изделий из стабилизированных сортов манганина 200°C , из нестабилизированных $60\text{--}80^\circ\text{C}$. При превышении этих температур в манганиновых изделиях происходит необратимое изменение свойств.

Из манганина изготавливают мягкие (ПММ) и твердые (ПМТ) проволоки диаметром $0,02\text{--}6\text{ мм}$ и ленты толщиной до $0,08$ и шириной до 270 мм . Кроме того, выпускают манганиновые обмоточные провода с эмалевой изоляцией (ПЭВММ и ПЭВМТ), с изоляцией из натурального шелка (ПШДММ и ПШДМТ), с эмалевой изоляцией и одним слоем натурального шелка (ПЭШОММ и ПЭ-ШОМТ). Манганиновые провода применяют при производстве резисторов высокого класса.

Константан – сплав 58–59% меди, 39–41% никеля и 1–2% марганца. Цвет константана – серебристо-желтый, плотность $8\,900\text{ кг/м}^3$, температура плавления 1260°C , $\text{КТР} = 14 \cdot 10^{-6}\text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Существенным недостатком константана является образование в паре с медью значительной термо-эдс ($40\text{--}45\text{ мкВ/}^\circ\text{C}$), что ограничивает применение константана в стабильных резисторах, но обуславливает применение его в термопарах. Для термопар применяют изолированную константановую проволоку в спае с медной.

Из константана изготавливают мягкие и твердые изделия – проволоку диаметром 0,03–8 мм и ленту толщиной до 0,1 мм. Константановые изделия используют при температурах, не превышающих 500°С.

Основные характеристики нескольких сплавов с большим удельным сопротивлением приведены в табл. Б2 (приложение Б).

8.4. Жаростойкие проводниковые материалы

Жаростойкими материалами являются сплавы на основе никеля, хрома и некоторых других компонентов. Жаростойкость этих сплавов, т.е. их неокисляемость даже при высоких температурах обусловлена образованием на их поверхности оксидной пленки большой сплошности, исключающей доступ кислорода к сплаву. Основной жаростойких оксидных пленок является оксид хрома Cr_2O_3 и закись никеля NiO , которые не испаряются с поверхности сплава при высоких температурах.

Жаростойкие материалы на основе никеля и хрома называются нихромами, а на основе железа, хрома и алюминия – фехралами и хромалиями. Все они представляют собой твердые растворы металлов с неупорядоченной структурой, поэтому эти сплавы обладают большим удельным сопротивлением и малыми значениями ТКр.

Состав и основные характеристики нескольких жаростойких сплавов, широко применяемых на практике, приведены в табл. Б3.

Областями применения жаростойких сплавов и изделий из них (неизолированная и изолированная проволока и ленты) являются проволочные резисторы и нагревательные элементы. Кроме того, их применяют в интегральных микросхемах с целью получения тонкопленочных резисторов.

9. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

9.1. Классификация веществ по магнитным свойствам

Все вещества, существующие в природе, обладают магнитными свойствами. Только у одних они выражены сильно, а у других – слабо.

Главной магнитной характеристикой материала является магнитный момент M , который равен отношению силы тока I , A , про-

текающего по проводнику, к площади, которую охватывает данный контур, S , м². Намагниченность любого вещества в магнитном поле J можно определить как отношение суммарного магнитного момента M материала к единичному объему V : $J=M/V$.

Намагниченность зависит от намагничивающего поля H : $J=k_m \cdot H$, А/м, где k_m – магнитная восприимчивость – безразмерная величина, характеризующая способность к намагничиванию данного вещества.

Магнитная индукция B является основным параметром магнитного материала:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J = \mu_0 H(1 + k_m) = \mu_0 \mu H,$$

где $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, $\mu = 1 + k_m$ – относительная магнитная проницаемость.

По магнитным свойствам принята следующая классификация веществ.

Диамагнетики – вещества, в которых в «чистом» виде проявляется диамагнитный эффект, являющийся результатом воздействия внешнего магнитного поля на молекулярные токи. Магнитный момент, возникающий при этом эффекте, направлен навстречу внешнему полю. Для диамагнетиков $k_m = -(10^{-6} \div 10^{-7})$, $\mu < 1$. k_m слабо изменяется от температуры. Диамагнетизм присущ всем веществам, однако в большинстве случаев он маскируется другими типами магнитного состояния.

Примеры диамагнетиков: все вещества с ковалентной химической связью, щелочно-галогидные кристаллы, неорганические стекла, полупроводниковые соединения A_3B_5 , A_2B_6 , кремний, германий, бор и другие. Металлы: медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и другие; водород, азот, вода и другие.

Парамагнетики – вещества с нескомпенсированными магнитными моментами и отсутствием магнитного атомного порядка. Магнитный момент парамагнетика равен нулю. Под действием внешнего поля из-за преимущественной ориентации магнитных моментов в направлении поля появляется намагниченность. Для парамагнетиков $k_m > 0$, $\mu > 1$. k_m парамагнетиков в большинстве случаев меньше зависит от температуры. При комнатной температуре $k_m = 10^{-6} \div 10^{-3}$.

Примеры парамагнетиков: щелочные и щелочно-земельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля, редкоземельных металлов, кислород, окись азота. Al, Na, Mg, Ta, W, CaO, CoO и другие.

Ферромагнетики – вещества, в которых (ниже температуры Кюри) наблюдается магнитная упорядоченность, соответствующая параллельному расположению спинов в макроскопических областях (доменах) даже в отсутствие внешнего магнитного поля. k_m ферромагнетиков (также как и μ) достигает больших положительных значений, сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Примеры ферромагнетиков: железо, никель, кобальт, их соединения и сплавы, некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия и др. При низких температурах некоторые редкоземельные элементы – гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий. Сплавы RCO_5 , где R редкоземельный элемент (Sm, Ce или Pr).

Антиферромагнетики характеризуются антиферромагнитным атомным порядком, возникающим из-за антипараллельной ориентации одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки. Для антиферромагнетиков $k_m=10^{-3} \div 10^{-5}$ сильно зависит от температуры. При нагревании магнитная упорядоченность исчезает при температуре, называемой **точкой Нееля** (антиферромагнитная точка Кюри).

Примеры антиферромагнетиков: хром, марганец, цезий, неодим, самарий и другие. Химические соединения на основе металлов переходной группы типа окислов, галогенидов, сульфидов, карбонатов и др. $MnSe$, $FeCl_2$, FeF_2 , $CuCl_2$, MnO , FeO , NiO .

Ферримагнетики – вещества с нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Как и антиферромагнетики, существуют при температуре не выше точки Нееля. Выше этой температуры ферримагнетики переходят в парамагнитное состояние.

К ферримагнетикам относятся некоторые упорядоченные металлические и различные оксидные соединения, наибольший интерес среди которых представляют ферриты $MnO \cdot Fe_2O_3$, $BaO \cdot 6Fe_2O_3$, $(NiO \cdot ZnO)Fe_2O_3$, $Li_2O \cdot Fe_2O_3$ и другие.

Ферро- и ферримагнетики относятся к сильномагнитным материалам, остальные группы – к слабомагнитным веществам.

Аморфные магнитные материалы. Магнитный порядок наблюдается и в некоторых химических соединениях в аморфном состоянии, в которых имеет место обменное взаимодействие (обмен энергией) между ближайшими соседними атомами. Металлические магнитомягкие аморфные сплавы состоят из одного или нескольких переходных металлов (Fe, Co, Ni), сплавленных со стеклообразователем – бором, углеродом, кремнием или фосфором.

Спиновые магнитные стекла. Это сильномагнитные вещества с ферромагнитным порядком, если магнитные свойства в них возникают в результате косвенных обменных взаимодействий через электроны проводимости и с антиферромагнитным порядком, если возбуждение происходит через промежуточные немагнитные атомы. Такими структурами могут быть также проводящие сплавы с малым содержанием переходных элементов.

9.2. Магнитные характеристики материалов

Рассмотрим ферромагнитный материал, или ферромагнетик.

Поведение ферромагнитного материала в магнитном поле характеризуется начальной кривой намагничивания (рис. 9.1), показывающей зависимость магнитной индукции B в материале от напряженности магнитного поля H . Свойства магнитных материалов оценивают магнитными характеристиками.

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a материала представляет собой отношение магнитной индукции B к напряженности магнитного поля H в заданной точке кривой намагничивания для данного материала и выражается в генри на метр (Гн/м): $\mu_a = B/H$, где B – индукция, Тл, H – напряженность поля, А/м.

Относительная магнитная проницаемость μ материала есть отношение абсолютной магнитной проницаемости к магнитной постоянной: $\mu = \mu_a / \mu_0$, где μ_0 – магнитная постоянная – величина, характеризующая магнитное поле в вакууме ($\mu_0 = 1,256637 \cdot 10^{-6}$ Гн/м), μ – безразмерная величина.

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a применяется только для расчетов. Для оценки свойств магнитных материалов используют относительную магнитную проницаемость μ , не зависящую от выбранной системы единиц. Ее называют магнитной проницаемостью.

Магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля (рис. 9.2). Различают начальную магнитную проницаемость μ_H и максимальную μ_M . Начальную магнитную проницаемость измеряют при напряженностях магнитного поля, близких к нулю. Большие значения μ_H и μ_M показывают, что данный магнит-

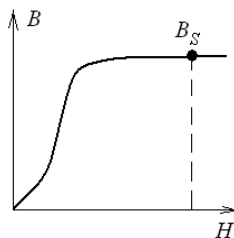


Рис. 9.1. Начальная кривая намагничивания

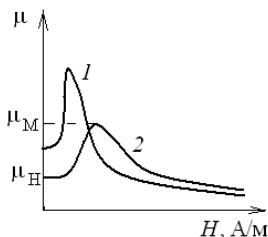


Рис. 9.2. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

проницаемость материала соответственно при температурах T_1 и T_2 .

Типичная зависимость магнитной проницаемости от температуры показана на рис. 9.3. Температура, при которой магнитная проницаемость резко снижается почти до нуля, называется температурой Кюри (T_K). При температурах выше T_K процесс намагничивания ферромагнетика расстраивается из-за интенсивного теплового движения атомов и молекул материала, в результате чего он перестает быть ферромагнитным материалом. Так, T_K для чистого железа 768°C , для никеля 358°C ; для кобальта 1131°C .

Индукция B_S характерная для всех магнитных материалов, называется индукцией **насыщения**. Чем больше B_S при заданной напряженности, тем лучше данный магнитный материал. На графике, представляющем

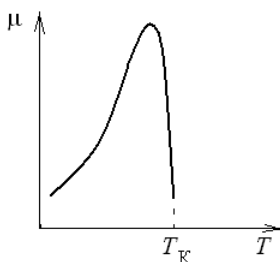


Рис. 9.3. Зависимость магнитной проницаемости от температуры

собой кривую начального намагничивания (рис. 9.1), видно, что с увеличением напряженности магнитного поля индукция растет вначале быстро, затем медленно, а начиная с B_S , почти не изменяется. Если образец магнитного материала намагничивать, непрерывно повышая напряженность магнитного поля H , магнитная индукция B тоже будет непрерывно возрастать по кривой начального намагничивания. Эта кривая заканчивается в точке, соответствующей индукции насыщения B_S . При уменьшении напряженности H магнитная индукция будет также уменьшаться, но, начиная с величины B_M , значения индукции не будут совпадать со значениями этой характеристики на начальной кривой намагничивания I (рис. 9.4).

ный материал легко намагничивается в слабых и сильных магнитных полях.

Температурный коэффициент магнитной проницаемости $T\mu$ позволяет оценить характер изменения магнитной проницаемости в зависимости от температуры ферромагнетика. При линейном изменении магнитной проницаемости в узком интервале температур $T_2 - T_1$ $T\mu$ ($1/^\circ\text{C}$) вычисляются по формуле $T\mu = (\mu_2 - \mu_1) / \mu_1 (T_2 - T_1)$, где μ_1 и μ_2 – магнитная проницаемость материала соответственно при температурах T_1 и T_2 .

Если образец магнитного материала намагничивать, непрерывно повышая напряженность магнитного поля H , магнитная индукция B тоже будет непрерывно возрастать по кривой начального намагничивания. Эта кривая заканчивается в точке, соответствующей индукции насыщения B_S . При уменьшении напряженности H магнитная индукция будет также уменьшаться, но, начиная с величины B_M , значения индукции не будут совпадать со значениями этой характеристики на начальной кривой намагничивания I (рис. 9.4).

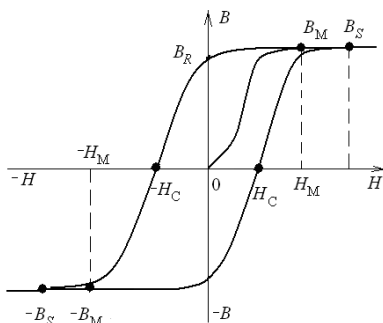


Рис. 9.4. Предельная (статическая) петля гистерезиса

Остаточная магнитная индукция B_R наблюдается в ферромагнитном материале при его размагничивании, когда напряженность магнитного поля равна нулю. Для размагничивания образца материала надо, чтобы напряженность магнитного поля изменила свое направление на обратное $-H$. Напряженность поля H_C , при которой индукция становится равной нулю, называется **коэрцитивной силой**.

Чем больше коэрцитивная сила, тем материал в меньшей степени способен размагничиваться. Если после размагничивания образца материала намагничивать его в противоположном направлении, в материале снова будет наблюдаться индукция насыщения $-B_S$. При дальнейшем уменьшении напряженности магнитного поля до $H = 0$ и последующем намагничивании в первоначальном направлении индукция будет непрерывно увеличиваться до B_S . В результате образуется замкнутая петля, которую называют предельной (или статической) **петлей гистерезиса**. Предельной петлей гистерезиса называют петлю, снятую при медленном изменении постоянного магнитного поля от $+H$ до $-H$, когда магнитная индукция становится равной индукции насыщения B_S .

Удельные потери энергии на гистерезис P_r – это потери, затрачиваемые на перемагничивание единицы массы материала за один цикл. Удельные потери на гистерезис часто измеряют в ваттах на килограмм (Вт/кг) магнитного материала. Их величина зависит от частоты перемагничивания и значения максимальной индукции B_M . Удельные потери на гистерезис за один цикл определяются площадью петли гистерезиса, т.е. чем больше петля гистерезиса, тем больше потери в материале.

Динамическая петля гистерезиса образуется при перемагничивании материала переменным магнитным полем и имеет большую площадь, чем статическая, так как при действии переменного магнитного поля в материале возникают кроме потерь на гистерезис потери на вихревые токи и магнитное последствие, которое определяется магнитной вязкостью материала.

Потери энергии на вихревые токи P_v зависят от удельного электрического сопротивления ρ магнитного материала. Чем больше ρ , тем меньше потери на вихревые токи. Потери энергии на вихревые токи зависят также от плотности магнитного материала и его толщины. Они также пропорциональны квадрату амплитуды магнитной индукции B_M и частоты f переменного магнитного поля.

Для листового образца магнитного материала потери в переменном поле P_v (Вт/кг) подсчитывают по формуле

$$P_v = (164 \cdot h^2 B_M^2 f^2) / d\rho,$$

где h – толщина листа, м; B_M – максимальное значение (амплитуда) магнитной индукции, Тл; f – частота, Гц; d – плотность материала, кг/м³; ρ – удельное электрическое сопротивление материала, Ом·м.

При действии на материал переменного магнитного поля снимают динамическую кривую намагничивания и соответственно динамическую петлю гистерезиса. Отношение амплитуды индукции к амплитуде напряженности магнитного поля на динамической кривой намагничивания представляет собой динамическую магнитную проницаемость $\mu_{\text{д}} = B_M / H_M$.

Для оценки формы петли гистерезисной пользуются коэффициентом прямоугольности гистерезисной петли K_{Π} – характеристикой, вычисляемой по предельной петле гистерезиса (рис. 8.4): $K_{\Pi} = B_r / B_M$. Чем больше величина K_{Π} , тем прямоугольнее гистерезисная петля. Для магнитных материалов, применяемых в автоматике и запоминающих устройствах ЭВМ, $K_{\Pi} = 0,7 \div 0,9$.

Удельная объемная энергия W_M (Дж/м³) – характеристика, применяемая для оценки свойств магнитно-твердых материалов, – выражается формулой $W_M = (B_d H_d / 2)_M$, где B_d – индукция, соответствующая максимальному значению удельной объемной энергии, Тл; H_d – напряженность магнитного поля, соответствующая максимальному значению удельной объемной энергии, А/м.

Кривые 1 размагничивания и 2 удельной магнитной энергии разомкнутого магнита изображены на рис. 9.5. Кривая 1 показывает, что при некотором значении индукции B_d и соответствующей напряженности магнитного поля H_d удельная объемная энергия постоянного магнита достигает максимального значения W_M .

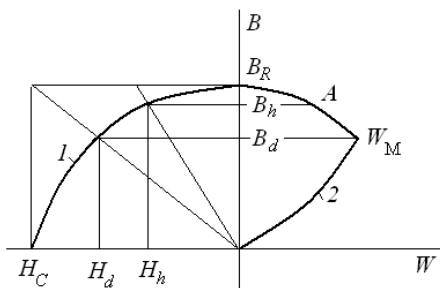


Рис. 9.5. Кривая размагничивания 1 и кривая удельной магнитной энергии 2 разомкнутого магнита

Это наибольшая энергия, создаваемая постоянным магнитом в воздушном зазоре между его полюсами, отнесенная к единице объема магнита. Чем больше числовое значение W_M , тем лучше магнитно-твердый материал и, следовательно, тем лучше изготовленный из него постоянный магнит.

9.3. Классификация магнитных материалов

Согласно поведению в магнитном поле все магнитные материалы делятся на две основные группы – магнитно-мягкие и магнитно-твердые.

Магнитно-мягкие материалы характеризуются большими значениями начальной и максимальной магнитной проницаемости и малыми значениями коэрцитивной силы ($H_c \leq 4000$ А/м) и легко намагничиваются и размагничиваются. Кроме того, они отличаются малыми потерями на гистерезис, т.е. им соответствует узкая гистерезисная петля (рис. 9.6, а).

Магнитные характеристики магнитно-мягких материалов зависят от их химической чистоты и степени искажения кристаллической структуры. Чем меньше различных примесей в магнитно-мягком материале, тем выше его характеристики, т.е. больше μ_n и μ_m , но меньше H_c и потери на гистерезис. Поэтому при производстве магнитно-мягких материалов стараются удалить из них наиболее вредные примеси – углерод, фосфор, серу, кислород, азот и различные оксиды. Одновременно стремятся не исказить кристаллическую структуру материала и не вызывать в нем внутренних напряжений.

Магнитно-твердые материалы обладают большими коэрцитивной силой ($H_c \geq 4000$ А/м) и остаточной индукцией ($B_r \geq 0,1$ Тл). Им соответствует широкая гистерезисная петля (рис. 9.6, б), т.е. они с большим трудом намагничиваются. Будучи намагничеными, магнитно-твердые материалы могут долго сохранять магнитную

энергию, т.е. служить источником постоянного магнитного поля, поэтому их применяют главным образом для изготовления различных постоянных магнитов.

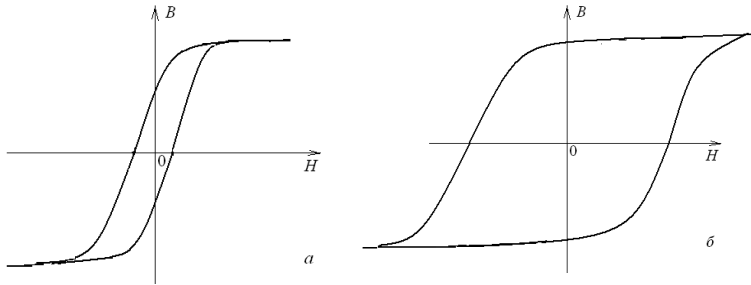


Рис. 9.6. Петли гистерезиса для магнитно-мягкого (а) и магнитно-твёрдого (б) материалов

По составу все магнитные материалы делятся на металлические, неметаллические и магнитодиэлектрики.

К **металлическим магнитным материалам** относят чистые металлы (железо, кобальт, никель) и магнитные сплавы некоторых металлов; к **неметаллическим** – ферриты, получаемые из порошкообразной смеси оксидов железа и других металлов. Отпрессованные ферритовые изделия (например, сердечники) подвергают термической обработке (обжигу при $1\ 300 \div 1\ 500^\circ\text{C}$). В результате этого они превращаются в твёрдые монолитные магнитные детали. Ферриты, так же как и металлические материалы, могут быть магнитно-мягкими и магнитно-твёрдыми. **Магнитодиэлектрики** представляют собой композиционные материалы, состоящие из $60 \div 80\%$ порошкообразного магнитного материала и $40 \div 20\%$ диэлектрика.

Ферриты и магнитодиэлектрики отличаются от металлических магнитных материалов большим удельным электрическим сопротивлением ($\rho = 10^2 \div 10^8\ \text{Ом}\cdot\text{м}$), что резко снижает потери на вихревые токи. Это позволяет широко использовать их в технике высоких частот. Кроме того, многие ферриты обладают стабильностью своих магнитных характеристик в широком диапазоне частот, включая СВЧ.

9.4. Металлические магнитно-мягкие материалы

Основными металлическими магнитно-мягкими материалами, применяемыми в РЭА, являются карбонильное железо, пермаллой,

альсиферы и низкоуглеродистые кремнистые стали. В таблице В1 представлены магнитные характеристики наиболее распространенных магнитно-мягких материалов.

Карбонильное железо – это тонкодисперсный порошок, состоящий из частиц сферической формы диаметром 1–8 мкм. Карбонильное железо получают термическим разложением пентакарбонила железа $\text{Fe}(\text{CO})_5$ – соединения оксида углерода с железом. При термическом разложении паров пентакарбонила железа выделяются частицы чистого железа. В результате загрязнения частиц карбонильного железа оксидом углерода полученный порошок подвергают термической обработке в среде водорода. Карбонильное железо в таком виде обладает высокими магнитными характеристиками.

В основном порошкообразное карбонильное железо применяют при изготовлении высокочастотных магнитодиэлектрических сердечников.

Пермаллои – пластичные железоникелевые сплавы с содержанием никеля 45–80% – обладают высокой пластичностью, поэтому легко прокатываются в тонкие листы и ленты толщиной до 1 мкм. С целью улучшения тех или иных свойств в пермаллои вводят молибден, хром, кремний или медь, получая легированные пермаллои. Пермаллои, содержащие 45–50% никеля, называются низконикелевыми; 60–80% – высоконикелевыми.

Все пермаллои отличаются высокими магнитными характеристиками (табл. В1), которые обеспечиваются не только их составом и химической чистотой сплава, но также специальной термической обработкой. Она заключается в нагреве со скоростью 400–500°C в 1 ч, выдержке сплава при 1 000–1 150°C в течение 3–6 ч и последующем охлаждении со скоростью 100–200°C в 1 ч до комнатной температуры. Некоторым пермаллоям необходим повторный нагрев до 600°C и быстрое охлаждение на медной плите со скоростью 150°C в 1 мин.

Наибольшим удельным электрическим сопротивлением, а следовательно, малыми потерями на вихревые токи и лучшими магнитными характеристиками обладают легированные пермаллои, поэтому их применяют в высокочастотных узлах РЭА.

Альсиферы представляют собой нековкие хрупкие сплавы, состоящие из 5,5–13% алюминия, 9–10% кремния, остальное – железо.

Альсифер заменил пермаллой в сравнительно ограниченной области применения. Из него изготавливают литые сердечники, работающие в диапазоне частот не более 50 кГц, так как на более высоких частотах в них возникают большие потери на вихревые токи.

Низкоуглеродистые кремнистые стали представляют собой сплавы железа с 0,8–4,8% кремния. В кремнистых сталях, содержится не более 0,08% углерода. Кремнистая сталь прокатывается в листы и ленты толщиной 0,05–1 мм и является сравнительно дешевым материалом. При выработке стали кремний находится в ней в растворенном состоянии и реагирует с окисью железа FeO. При этом из стали выделяется чистое железо и образуется кремнезем $2\text{FeO} + \text{Si} = 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$.

Кремнезем повышает удельное электрическое сопротивление стали и снижает потери на вихревые токи. Кремний способствует росту кристаллов железа, а также вызывает распад цементита Fe_3C , что повышает магнитные характеристики стали. Введение большого количества кремния в сталь улучшает ее магнитные характеристики, но повышает хрупкость, которая затрудняет изготовление из стали штампованных деталей. Поэтому в сталь вводят не более 4,8% кремния.

Листы кремнистой стали изготавливают прокаткой заготовок в нагретом или ненагретом состоянии, поэтому различают горячекатаную и холоднокатаную кремнистую сталь. Как известно, железо имеет кубическую структуру кристаллов и намагничивается наиболее интенсивно, когда направление магнитного поля совпадает с направлением ребра куба кристалла стали. Поэтому листы кремнистой стали несколько раз прокатывают в холодном состоянии в одном и том же направлении, после чего отжигают в атмосфере водорода при 900°C . При отжиге из листов удаляются примеси, снижающие магнитные свойства материала, кроме того, деформированные прокаткой кристаллы железа принимают прежнюю форму.

9.5. Металлические магнитно-твердые материалы

Магнитно-твердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов, используемых в радиоаппаратуре. Основное требование, предъявляемое к постоянным магнитам – в воздушном зазоре между полюсами должно быть магнитное поле с постоянной напряженностью и магнитной индукцией. Для этого постоянный магнит должен обладать большой магнитной энергией, т.е. магнитно-твердые материалы должны иметь возможно большие коэрцитивную силу и остаточную магнитную индукцию.

Вторым требованием к магнитно-твердым материалам является устойчивость к старению.

Металлические магнитно-твердые материалы можно разделить на три основные группы: мартенситные высокоуглеродистые легированные стали; сплавы на основе железа – алюминия – никеля; металлокерамические магнитно-твердые материалы.

Мартенситная структура в высокоуглеродистых сталях образуется закалкой – нагревом до температуры, при которой сталь переходит в раствор углерода в железе (аустенит), и последующим резким охлаждением в воде или масле. При мартенситной структуре кристаллы железа резко искажаются – вытягиваются в длину, а мельчайшие (высокодисперсные) частицы карбида (Fe_3C), рассеиваясь в микроструктуру стали, увеличивают внутренние напряжения в ее кристаллах. Это обеспечивает магнитную твердость постоянным магнитам, изготовленным из мартенситных сталей. Постоянные магниты из закаленной легированной стали обладают сравнительно большой коэрцитивной силой и остаточной магнитной индукцией.

В качестве мартенситных сталей применяют хромистые, вольфрамовые и кобальтовые. В хромистых сталях легирующим компонентом являются хром (1,3–3,6%), в вольфрамовых – вольфрам (5,5–6,5%) и хром (0,3–0,5%), в кобальтовых – кобальт (5–17%), молибден (1,2–1,7%) и хром (6–10%). Эти стали содержат 0,9–1,1% углерода, остальное – железо.

Постоянные магниты изготовляют из стальных прутков и полос мартенситных сталей горячей ковкой или штамповкой. После механической обработки их закалывают на мартенсит, а затем намагничивают. Для стабилизации магнитных характеристик все магниты подвергают искусственному старению – многочасовой выдержке их в кипящей воде.

Более высокими магнитными характеристиками обладают магнитно-твердые сплавы на основе железа – алюминия – никеля, легированные кобальтом, медью, титаном и ниобием. Магниты из этих сплавов, полученные методом литья, имеют высокие магнитные характеристики (таблица В.2). Такого уровня магнитных характеристик достигают благодаря процессу дисперсионного отверждения, который заключается в следующем. Магнит нагревают до 1 100–1 200°C, при этом составные части сплава растворяются в железе. Затем при быстром охлаждении магнита в его материале образуется перенасыщенный твердый раствор компонентов сплава.

Растворенные в избыточном количестве в железе компоненты сплава с течением времени начинают выпадать в виде высокодисперсных частиц, которые, рассеиваясь по объему магнита, вызывают

ют внутреннее напряжение в кристаллах железа. Это обеспечивает сплаву большие коэрцитивную силу и остаточную магнитную индукцию. Чтобы ускорить этот процесс, производят отпуск магнита, соблюдая критическую скорость охлаждения ($15\text{--}30^\circ\text{C}$ в 1 с). Такая обработка магнитов называется дисперсионным твердением.

Магнитные характеристики сплавов с содержанием кобальта можно повысить термомагнитной обработкой отлитых магнитов. Для этого магнит нагревают до $1\ 300^\circ\text{C}$ и охлаждают в сильном магнитном поле (скорость охлаждения $10\text{--}15^\circ\text{C}$ в 1 с). Вследствие ориентации доменов в направлении действия внешнего магнитного поля, охлажденные магниты приобретают магнитную текстуру, в результате этого их энергия возрастает на $20\text{--}30\%$ за счет резкого увеличения остаточной магнитной индукции. Магниты из этих сплавов значительно более стойки к старению, чем мартенситные стали. Недостатком этих сплавов является то, что они не поддаются обычным методам механической обработки из-за большой твердости и хрупкости.

Магниты очень малых размеров или сложной формы в массовом производстве стараются изготавливать из металлокерамических материалов, которые получают из металлических порошков. Металлокерамические магниты изготавливают на основе порошков железо – никель – алюминий или железо – никель – алюминий – кобальт, которые берут в соотношениях, обеспечивающих твердость магнитам после их прессования и последующего спекания при высоких температурах. Металлы и их сплавы измельчают до частиц размером не менее 10 мкм. Из порошкообразной исходной массы магниты прессуют при давлении $1,0\text{--}1,5$ МПа. Отпрессованные магниты спекают в защитной атмосфере или вакууме при $1\ 100\text{--}1\ 300^\circ\text{C}$. Спеченные магниты закаливают, а затем производят отпуск, охлаждая их с заданной скоростью. Для улучшения магнитной твердости магнитов, в состав которых входит кобальт, их подвергают термомагнитной обработке под действием внешнего магнитного поля.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Характеристики диэлектрических материалов

Т а б л и ц а А1

Электрические характеристики диэлектрических материалов

Материал	ρ_V , Ом·м	ϵ_r , отн.ед.	$\operatorname{tg} \delta$ ($f=1\text{МГц}$)	$E_{\text{пр}}$, МВ/м*
1	2	3	4	5
<i>Полимеризационные диэлектрики</i>				
Полистирол:				
Блочный	$\approx 10^{15}$	2,4	$(2 \div 4) \cdot 10^{-4}$	30 ÷ 35
Суспензионный	$\approx 10^{14}$	2,7	$6 \cdot 10^{-4}$	20 ÷ 25
Ударопрочный	$10^{12} \div 10^{13}$	2,7	$(4 \div 8) \cdot 10^{-4}$	26 ÷ 27
Полиэтилен:				
Высокого давления	$10^{14} \div 10^{15}$	2,3	$(2 \div 5) \cdot 10^{-4}$	40 ÷ 50
Среднего давления				
Низкого давления				
Полиформальдегид	$10^{12} \div 10^{13}$	3,8	$(2 \div 4) \cdot 10^{-3}$	20 ÷ 25
Поливинилхлорид:				
Пластикат	$10^{10} \div 10^{12}$	4,5 ÷ 6	0,05 ÷ 0,08	20 ÷ 30
Фторопласт				
незакаленный	$10^{16} \div 10^{17}$	1,9 ÷ 2	$(2 \div 3) \cdot 10^{-4}$	27
закаленный	$10^{16} \div 10^{17}$	1,9 ÷ 2	$(2 \div 3) \cdot 10^{-4}$	27
пленочный	10^{17}	1,8 ÷ 2,2	$0,3 \cdot 10^{-3}$	200
<i>Поликонденсационные диэлектрики</i>				
Резольные	$10^{10} \div 10^{12}$	5 ÷ 6	0,008 ÷ 0,01	12 ÷ 15
Новолачные	$10^9 \div 10^{10}$	6 ÷ 7	0,04 ÷ 0,05	10 ÷ 12
Лавсан	10^{14}	3	$(1 \div 2) \cdot 10^{-2}$	15 ÷ 17
Лавсановая пленка	$10^{12} \div 10^{13}$	3,2	$(5 \div 8) \cdot 10^{-3}$	120 ÷ 160
Кремнийорганические диэлектрики	$10^{12} \div 10^{14}$	2,6 ÷ 4	0,0005 ÷ 0,005	30 ÷ 80
Полипиромеллитимид	$10^{14} \div 10^{15}$	2,8 ÷ 3,5	$(2 \div 8) \cdot 10^{-3}$	70 ÷ 150
Полиимиды	10^{14}	3,5	$(2 \div 5) \cdot 10^{-3}$	22
Слоистые пластмассы				
Гетинакс	$10^{10} \div 10^{12}$	5 ÷ 7	0,015 ÷ 0,03	30
Текстолит	$10^9 \div 10^{10}$	6 ÷ 7	0,03 ÷ 0,05	8
Стеклотекстолит	$10^{12} \div 10^{14}$	5 ÷ 6	0,01 ÷ 0,02	18 ÷ 20
Полистирольный пенопласт	$10^{13} \div 10^{15}$	1,1 ÷ 1,4	0,0006 ÷ 0,00012	
<i>Радиокерамические материалы</i>				
Ультрафарфор	$10^{12} \div 10^{13}$	8 ÷ 8,5	$(3 \div 8) \cdot 10^{-4}$	28 ÷ 36

Окончание таблицы А1

1	2	3	4	5
Стеатит	$10^{12} \div 10^{14}$	6 ÷ 7	$(3 \div 8) \cdot 10^{-4}$	40 ÷ 42
Поликор	$10^{15} \div 10^{16}$	9,8	$0,5 \cdot 10^{-4}$	35 ÷ 40
Микролит	$10^{14} \div 10^{15}$	9,5	$1 \cdot 10^{-4}$	32 ÷ 36
Ситаллы	$10^{10} \div 10^{12}$	5 ÷ 7	$(10 \div 800) \cdot 10^{-4}$	20 ÷ 80

* Измерено при толщине материала 1 мм.

Таблица А2

**Механические и физико-химические характеристики
диэлектрических материалов**

Материал	σ_p , МПа	$\sigma_{и}$, МПа	a , кДж/м ²	Теплостойкость, °С	Холодостойкость, °С	Влагопоглощае- мость, % (за 24 ч)
1	2	3	4	5	6	7
<i>Полимеризационные диэлектрики</i>						
Полистирол:						
Блочный	40 ÷ 45	60 ÷ 80	20 ÷ 28	70 ÷ 80	- 40	0,01 (24 ч)
Суспензионный						
Ударопрочный			40 ÷ 50	65 ÷ 70		0,05
Полиэтилен:						
Высокого давления	12 ÷ 30	12 ÷ 17	-	70	-70	0,02 (1 мес)
Среднего давления						
Низкого давления	25 ÷ 40	25 ÷ 35		70	-70	0,03
Полиформальдегид	70	100	95 ÷ 110	100	-50	0,3 (24 ч)
Поливинилхлорид:						
Пластикат	12 ÷ 20	80	27,5	120	-50 ÷ -20	0,2 – 0,8
Фторопласт						
незакаленный	14 ÷ 25	14	100	110	-200	0
закаленный	16 ÷ 31	18	120	260	-260	0
<i>Поликонденсационные диэлектрики</i>						
Лавсан	80 ÷ 120	50 ÷ 70	15 ÷ 30	135	-50	0,3
Лавсановая пленка	120 ÷ 172	-	-	135	-50	0,5 (7 сут)

Окончание таблицы А2

1	2	3	4	5	6	7
<i>Кремнийорганические диэлектрики</i>						
Полипиромеллитимид	80 ÷ 100	–	–	220 ÷ 250	–150 ÷ –60	0,8 (24 ч)
Полиимиды	95	–	50 ÷ 60	220	–180 ÷ –155	0,8
<i>Слоистые пластмассы</i>						
Гетинакс	115 ÷ 125	135	–	85	–60	–
Текстолит	130 ÷ 150	90	7,8	70	–60	–
Стеклотекстолит	200 ÷ 300	350	50	100	–60	–
<i>Радиокерамические материалы</i>						
Ультрафарфор		220 ÷ 390	3,5 ÷ 4,6			
Стеатит		150 ÷ 190	3,0 ÷ 4,0			
Поликор		250 ÷ 300	7,9 ÷ 8,0			
Микролит		420 ÷ 450	4,1			

Таблица А3

Основные характеристики кварца и керамических сегнетоэлектриков (при 20°C)

Материал	Марка	$T_K, ^\circ\text{C}$	Электрические характеристики				$d, \text{Кл/Н}$
			$\rho_V, \text{Ом}\cdot\text{м}$	ϵ_r	$\text{tg } \delta$	$E_{\text{пр}}, \text{МВ/м}$	
Кварц	–	–	10^{14}	4,4	0,0002	–	$2,3 \cdot 10^{-12}$
Титанат бария	ТБ-1	120	10^{10}	1 400	0,02	3	$45 \cdot 10^{-12}$
Цирконат-титанат свинца	ЦТС-19	290	10^{12}	1 500	0,03	3	$119 \cdot 10^{-12}$
	ЦТС-23	280	10^{13}	1 050	0,007	4	$100 \cdot 10^{-12}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Характеристики проводниковых материалов**

Т а б л и ц а Б1

Чистые металлы и сплавы для РЭА

Металл или сплав	σ_p , МПа	e_t , %	Проводимость, %
Cu	200 ÷ 280	6 ÷ 35	100 (м); 88 (тв)
Бронза Cu+Sn, Cu+Al, Cu+Be	400 ÷ 1750	3 ÷ 60	10 ÷ 40
Латунь Cu+Zn (40%)	400 ÷ 880	5 ÷ 60	≈25
Ковар Ni (30%)+Co (18%)+Fe	500 ÷ 620	≈70	≈25
Al	80 ÷ 180	1 ÷ 25	66
Ag	200 ÷ 300	4 ÷ 50	100
Au	140 ÷ 160	40 ÷ 55	≈85

Т а б л и ц а Б2

Сплавы с большим удельным сопротивлением для РЭА

Металл или сплав	σ_p , МПа	e_t , %	ρ , мкОм·м
Манганин	400 ÷ 580	5 ÷ 25	0,42 ÷ 0,52
Константан	400 ÷ 720	2 ÷ 20	0,46 ÷ 0,52
МЛТ Si (43,6%) + Cr (17,6%) + + Fe (14,1%) + + W (24,7%)	—	—	0,05

Т а б л и ц а Б3

Жаростойкие проводниковые материалы для РЭА

Металл или сплав	Состав	ρ , мкОм·м
Нихром	Ni (15÷20%) + Cr (85÷80%)	1 ÷ 1,5
Фехраль	Cr (12÷15%) + Ni (0,6%) + + Al (3,5÷5,5%) + + Fe (остальное)	1 ÷ 1,5
Хромаль	Cr (23÷27%) + Ni (0,6%) + + Al (4,5÷6,5%) + + Fe (остальное)	1 ÷ 1,5

Удельное сопротивление чистых металлов:

$$\rho (\text{Cu}) = 0,0172 \div 0,1800 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

$$\rho (\text{Al}) = 0,0282 \div 0,2830 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

$$\rho(\text{Ag}) = 0,0150 \div 0,0158 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

$$\rho(\text{Au}) = 0,0224 \div 0,0228 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

$$\rho(\text{W}) = 0,0550 \div 0,0558 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

$$\rho(\text{Ni}) = 0,0730 \div 0,0739 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

$$\rho(\text{Fe}) = 0,1000 \div 0,2500 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

$$\rho(\text{St}) = 0,1224 \div 0,1246 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Основные характеристики магнитных материалов

Таблица В1

Основные характеристики магнитно-мягких радиоматериалов

Материал	$\mu_{НН}, *10^3$	$\mu_{М}, *10^3$	$H_C, А/м$	$\rho, мкОм \cdot м$
Карбонильное железо	2,5 ÷ 3,0	20 ÷ 21	4,5 ÷ 6,2	–
<i>Пермаллои легированные</i>				
Ni (78,5%)	7,0–14,0	130–270	2–3	0,25
Ni (66%)	3,0–3,7	120–200	3–5	0,33
Ni (50%)	2,0–3,0	50–70	6–10	0,45
<i>Пермаллои нелегированные</i>				
Ni (78,5%)+ Mo (3,8%)	30	250	2	0,55
Ni (66 %) + Mo (2%)	4	120	0,7	0,48
Ni (50 %) + Cr (4%)	3	30	3	0,95
Альсиферы	6–7	30–35	2,2	0,8
<i>Низкоуглеродистые кремнистые стали</i>				
Fe + Si (4%)	0,3–0,4	6–8	31–33	
Fe + Si (3,8%)	0,6–0,9	2–35	9,5–14	

Таблица В2

Основные характеристики магнитно-твердых радиоматериалов

Материал	$B_r, Тл$	$H_C * 10^3, А/м$	$W_M, кДж/м^3$
Мартенситная сталь			
хромистая	0,90	4,6	2,4
вольфрамовая	1,00	5,0	5,5
кобальтовая	0,95–1,10	8,0–13,6	11,0
Магнитно-твердые сплавы на основе Fe – Al – Ni	0,5–1,4	42–145	14–32
Металлокерамические магниты	0,80–0,95	10–13	60–90

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Пример тестовых заданий по дисциплине «Радиоматериалы и радиокомпоненты»

Материалы электронной техники подразделяют на:

- радиоматериалы;
- конструкционные;
- диэлектрические;
- проводниковые.

Радиоматериалы по реакции на электрическое поле делят на:

- проводники;
- полупроводники;
- диэлектрики;
- магнитные;
- немагнитные.

Радиоматериалы по реакции на магнитное поле делят на:

- проводники;
- полупроводники;
- диэлектрики;
- магнитные;
- немагнитные.

Температура размягчения (°С) определяется у материалов ... строения.

Температура плавления (°С) определяется у материалов ... строения.

К аморфным материалам относятся:

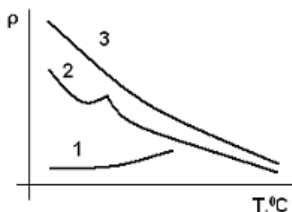
- стекло;
- слюда;
- кремний;
- полиэтилен.

Способность диэлектрика длительно выдерживать предельно допустимую температуру без заметного снижения физико-механических свойств называется

К кристаллическим материалам относятся

- стекло;
- слюда;
- кремний;
- полиэтилен.

Характер зависимости удельного электрического сопротивления от температуры соответствует



- 1) проводникам;
- 2) полупроводникам;
- 3) диэлектрикам.

Относительное удлинение материала при растяжении (%) определяется

$$e_p = (l_p - l_0) / l_0$$

$$\sigma_p = P_p / S_0$$

$$e_p = (l_p - l_0) \cdot 100 / l_0$$

Формула ... описывает...

а) $\sigma_c = P_c / S_0$

1. Разрушающее напряжение при сжатии.

б) $a = \Delta A / S_0$

2. Ударная вязкость.

в) $e_p = (l_p - l_0) \cdot 100 / l_0$

3. Относительное удлинение материала при растяжении.

г) $\sigma_p = P_p / S_0$

4. Разрушающее напряжение при растяжении.

Выдержка пластически деформированного металла при определенной температуре в течение определенного времени без доступа кислорода воздуха – это:

- литье;
- прокатка;
- волочение;
- отжиг.

Структура молекул полимеров может быть:

- пространственной;

линейной;
аморфной;
кристаллической.

Строение полимеров может быть
пространственным;
линейным;
аморфным;
кристаллическим.

Синтетическими полимерами являются
каучук;
янтарь;
полистирол;
полиэтилен.

По составу все магнитные материалы делятся на:
металлические;
магнитно-мягкие;
неметаллические;
магнитно-твердые;
сплавы;
магнитодиэлектрики.

К полупроводникам относятся:
карбид кремния;
селен;
ниобат лития;
природный кварц.

На соответствующей иллюстрации представлена

а)

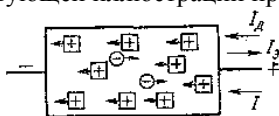


Схема движения дырок и электронов в полупроводнике с акцепторной примесью

б)

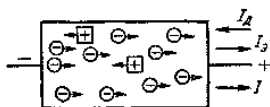


Схема движения дырок и электронов в полупроводнике с донорной примесью

в)

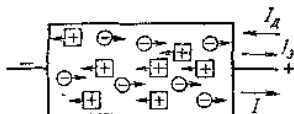
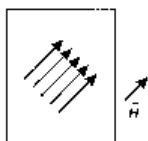


Схема движения электронов и дырок в случае собственной электропроводности полупроводника

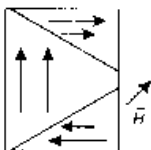
Последовательность намагничивания ферромагнетиков

а)



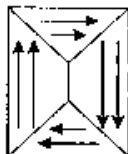
4

б)



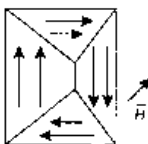
3

в)



1

г)

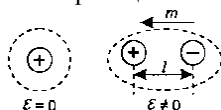


2

Если сопротивление 1 м провода равно 200 Ом, то сопротивление 100 м (в Ом) равно

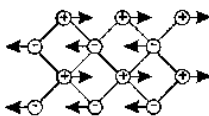
Приведенный рисунок поляризации соответствует

а)



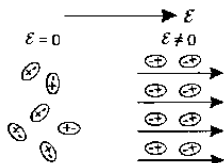
Электронная поляризация

б)



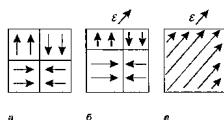
Ионная поляризация

в)



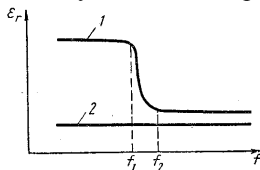
Дипольная поляризация

г)



Спонтанная поляризация

Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты напряжения соответствует ... диэлектрику

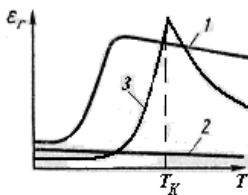


1 – полярному

2 – неполярному

Напряженность электрического поля, при которой наступает пробой диэлектрика или полупроводника, называется
напряжение пробоя;
электрическая прочность;
диэлектрические потери

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры соответствует ... диэлектрику

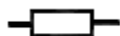


1 полярному

2 неполярному

3 сегнетоэлектрику

Приведенному УГО радиокон компонента соответствует



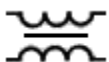
резистор;



конденсатор

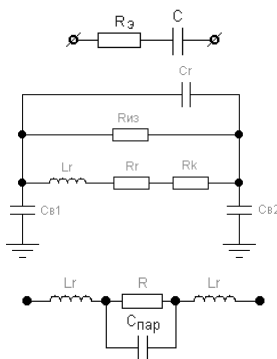


дроссель;



трансформатор

Эквивалентная схема постоянного резистора на высоких частотах:

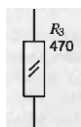


Правильное высказывание.

Принцип действия резисторов основан на:

- свойстве оказывать реактивное сопротивление переменному току при незначительном сопротивлении постоянному току;
- превращении электрической энергии в тепловую, рассеиваемую в окружающую среду;
- способности радиоматериалов оказывать сопротивление протекающему через них электрическому току.

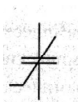
Предельное рабочее напряжение (В) резистора с точностью до 3-го знака равно



Неверное(-ые) утверждение(-я) следующие:

Магнитомягкие материалы обладают
малой коэрцитивной силой;
малыми потерями на перемагничивание;
высокой магнитной проницаемостью;
широкой петлей гистерезиса.

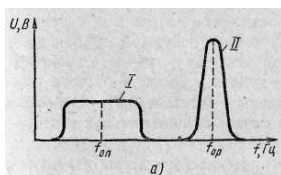
Название радиокомпонента, УГО которого приведено –



Переменный конденсатор
Вариконд
Варикап
Постоянный конденсатор

... .. – это вытеснение тока под воздействием вихревых токов и магнитного поля к периферии провода, прилегающей к каркасу катушки, в результате чего сечение, по которому течет ток, приобретает серповидный характер.

Частотной характеристике 1 соответствует ... контур.



Катушка, изменяющая индуктивность для перестройки частоты контуров, называется

Дроссель
Вариометр
Катушка связи

На высоких частотах применяют ... резисторы.

проволочные
непроволочные
ниточные
лакированные

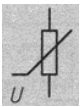
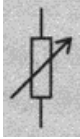
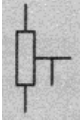
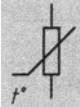
Согласно цветовой маркировке сопротивление резистора (Мом) равно



Подчиненность классов радиоэлектронных изделий:

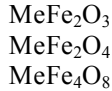
а) техническая документация	0
б) система	1
в) прибор	2
г) группа	3
д) комплекты,	4
е) узлы	5
ж) детали	6

Название, соответствующее УГО резистора

а) 	варистор
б) 	реостат
в) 	подстроечный
г) 	термистор

Частота, выше которой начинается резкое падение магнитной проницаемости и увеличение потерь энергии в феррите –

Общий вид химической формулы простого феррита



Отношение магнитной индукции B к напряженности магнитного поля H называется

Относительная магнитная проницаемость μ
Абсолютная магнитная проницаемость μ_a
Остаточная магнитная индукция B_r

Легирующие примеси, атомы которых снабжают полупроводник свободными электронами, называют

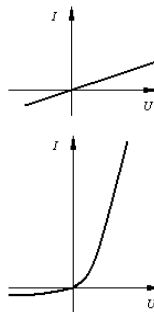
Донорами
Акцепторами
Вакансиями

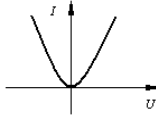
Полупроводники, кристаллическая решетка которых не содержит примесных атомов другой валентности, называются

Переходный слой, возникающий при контакте двух полупроводников, называется

Обедненный слой
Электронно-дырочный переход
Гальваническая пара

Вольт-амперная характеристика p - n -перехода имеет вид





Проводниковые материалы по возрастанию удельного сопротивления располагаются в ряд

Медь	2
Золото	3
Алюминий	4
Серебро	1
Ковар	5
Константан	6

Состав сплава X20H80T3 по массе в %

Cr – 12–15%, Ni – 0,6, Al – 3,5–5,5, Fe – остальное
 Cr – 19–23, Ni – остальное, Ti – 2–2,9, Fe – 2,5
 Cu – 58–59, Ni – 39–41, Mn – 1–2

Последовательность появления во времени типов маркировки резисторов

цифровая

цветовая

цифро-буквенная

Правильная(-ые) пара(-ы): маркировка – значение номинала резистора

- | | |
|------------------|--------|
| а) M27 – 270 кОм | + а, г |
| б) ЗК6 – 360 Ом | а |
| в) К12 – 12 Ом | б, в |
| г) 27E – 27 Ом | б, г |

Резисторы подразделяют на постоянные, переменные, специальные по характеру изменения

Условное обозначение всеклиматического керамического конденсатора постоянной емкости номиналом 27 пФ с допуском $\pm 10\%$ на

номинальное напряжение 50 В с температурным коэффициентом емкости $47 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ имеет вид

К15-7В-50В-М47-27пФ±10%

К10-7В-50В-М47-27пФ±10%

К22-7В-50В-М47-27нФ±10%

ЛИТЕРАТУРА

- Пасынков В.В., Сорокин В.С.* Материалы электронной техники. СПб. : Лань, 2001. 368 с.
- Никулин Н.В., Назаров А.С.* Радиоматериалы и радиокомпоненты. М. : Высш. шк., 1986. 208 с.
- Покровский Ф.Н.* Материалы и компоненты радиоэлектронных средств. М. : Горячая линия – Телеком, 2005. 352 с.
- Петров К.С.* Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. СПб. : Питер, 2006. 522 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Общие свойства материалов	4
1.1. Введение	4
1.2. Характеристики и параметры материалов	5
1.3. Типы химических связей	6
1.3.1. Межатомные связи	6
1.3.2. Межмолекулярные связи	8
1.4. Кристаллическое состояние вещества	9
1.5. Дефекты кристаллической структуры	10
1.6. Аморфное состояние вещества	11
2. Электрические характеристики вещества	11
3. Механические характеристики вещества	13
4. Тепловые характеристики	14
5. Физико-химические характеристики вещества	16
6. Электрические процессы в диэлектриках	18
6.1. Поляризация диэлектриков	18
6.2. Электропроводность диэлектриков	23
6.3. Потери энергии в диэлектриках	24
6.4. Пробой диэлектриков	26
7. Твердые диэлектрики, применяемые в радиоэлектронной аппаратуре	27
7.1. Основные понятия об органических твердых диэлектриках	27
7.2. Полимеризационные диэлектрики	28
7.3. Поликонденсационные диэлектрики	35
7.4. Пластмассы	41
7.5. Электроизоляционные лаки, эмали и компаунды	45
7.6. Радиокерамические материалы	47
7.6.1. Радиоустановочные керамические материалы	48
7.6.2. Конденсаторные керамические материалы	51
7.7. Стекла и ситаллы	52
7.8. Пьезоэлектрические материалы	54

7.9. Электреты	57
8. Проводниковые материалы и провода	59
8.1. Основные свойства металлических проводниковых материалов	59
8.2. Чистые металлы и сплавы, применяемые в радиоэлектронике	60
8.3. Сплавы, обладающие большим удельным электрическим сопротивлением	63
8.4. Жаростойкие проводниковые материалы	64
9. Магнитные материалы	64
9.1. Классификация веществ по магнитным свойствам	64
9.2. Магнитные характеристики материалов	67
9.3. Классификация магнитных материалов	71
9.4. Металлические магнитно-мягкие материалы	72
9.5. Металлические магнитно-твердые материалы	74
<i>Приложение А. Характеристики диэлектрических материалов</i>	<i>77</i>
<i>Приложение Б. Характеристики проводниковых материалов</i>	<i>80</i>
<i>Приложение В. Пример тестовых заданий по дисциплине «Радиоматериалы и радиокомпоненты»</i>	<i>82</i>
<i>Приложение Г. Пример тестовых заданий по дисциплине «Радиоматериалы и радиокомпоненты»</i>	<i>83</i>
Литература	93

Учебное издание

РАДИОМАТЕРИАЛЫ И РАДИОКОМПОНЕНТЫ

Часть 2. Характеристики радиоматериалов

Составитель: Ольга Александровна Доценко

Учебно-методическое пособие

Издание подготовлено в авторской редакции

Подписано к печати 20.12.2012 г. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Times.

Усл. печ. л. 5,58. Тираж 50 экз. Заказ № .

Отпечатано на оборудовании
редакционно-издательского отдела
Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. Корп. 4. Оф. 011
Тел. 8+(382-2)–52-98-49