



**Некоммерческое
акционерное
общество**

**АЛМАТИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ЭНЕРГЕТИКИ И
СВЯЗИ**

Кафедра электроники

**ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

Конспект лекций
для студентов специальности
5В071600 – Приборостроение

Алматы 2014

СОСТАВИТЕЛЬ: Б.Б. Ордабаев, Е.О. Елеукулов. Технология материалов и изделий электронной техники. Конспект лекций для студентов специальности 5В071600 – Приборостроение.- Алматы: АУЭС, 2013, - 60 с.

Конспект лекций предназначен для самостоятельного изучения курса «Технология материалов и изделий электронной техники» и имеет целью ознакомление студентов с применением различных материалов при изготовлении современных электронных компонентов, на основе которых ведётся разработка и совершенствование радиоэлектронной аппаратуры. Широкая номенклатура материалов и радиокомпонентов, огромное их разнообразие по свойствам ставят разработчиков аппаратуры перед необходимостью проявлять грамотный подход к выбору компонентов, которые будут надёжно работать в проектируемом оборудовании.

Конспект лекций предназначен для студентов специальности 5В071600 – Приборостроение.

Ил. 18, табл. 14, библиогр. 4 назв.

Рецензент: канд. техн. наук, проф. А.С.Байкенов.

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2013 г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2014 г.

Введение

Курс «Материаловедение» имеет целью ознакомление студентов с применением различных материалов при изготовлении современных электронных компонентов, на основе которых ведется разработка и совершенствование радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В настоящее время РЭА используется как бытовая, медицинская, измерительная, радиолакационная, радионавигационная, аэрокосмическая, РЭА также применяется и во многих других областях. Совершенствование РЭА обязано стремительному развитию микроэлектронной техники, которая в свою очередь базируется на совершенствовании используемых в электронике материалов и технологии изготовления интегральных микросхем и других электронных компонентов.

Значительная часть изделий электронной техники, выпускаемых миллионами тиражами на специализированных фабриках, составляют радиоэлектронные компоненты: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, фильтры, реле, переключатели, трансформаторы, соединители и многое другое. Широкая номенклатура радиокомпонентов и огромное их разнообразие по свойствам ставят разработчиков аппаратуры перед необходимостью проявлять грамотный подход к выбору компонентов, которые будут надежно работать в проектируемом оборудовании.

1 Лекция №1. Назначение, основные свойства и электрические характеристики радиоматериалов

Цели лекции:

- изучение классификации радиоматериалов;
- изучение основных электрических характеристик материалов.

Содержание лекции:

- классификация радиоэлектронных материалов;
- основные электрические характеристики материалов.

1.1 Классификация радиоэлектронных радиоматериалов

В отличие от конструкционных (пластмассы, металлы) и вспомогательных (припой, клеи) материалов электронные материалы в устройствах, находясь под действием электромагнитных полей, должны выполнять свои функции. Некоторые из радиоматериалов, например, диэлектрики, могут находиться одновременно под действием высокого электрического напряжения, постоянного и переменного токов. Это вызывает в материале особое напряженное состояние. Выход из строя, даже одного из диэлектриков, часто влечет за собой выход из работы радиокомпонента, в котором используется данный диэлектрик, (конденсатора, трансформатора, соединителя и т.д.), а иногда и всего аппарата.

Очень сложной задачей является правильный выбор материала, определяемый в первую очередь совокупностью его электрических, механических, магнитных, тепловых и физико-химических свойств. Эти свойства определяются величинами, называемыми характеристиками или параметрами материалов.

Все радиоматериалы можно разделить на четыре основные группы: проводники, полупроводники, диэлектрики, магнитные материалы.

Проводники – это металлические материалы, обладающие большой электропроводностью, обусловленной наличием у них большого числа свободных электронов.

Диэлектрики – это материалы, обладающие незначительной электропроводностью, т.к. у них очень мало свободных заряженных частиц (электронов и ионов).

Полупроводники – это материалы, обладающие меньшей электропроводностью, чем проводники, т.к. у них значительно меньше свободных электронов.

Магнитными называют материалы, которые под действием внешнего магнитного поля способны намагничиваться, т.е. приобретать магнитные свойства, что обусловлено их строением.

1.2 Основные электрические характеристики материалов

Каждый из радиоматериалов обладает электрическими свойствами, т.к. все радиоматериалы (в том числе и диэлектрики) обладают электропроводностью. Для оценки электрических свойств используются электрические характеристики.

Удельное электрическое сопротивление ρ – это электрическая характеристика, применяемая для оценки электропроводности материалов. Она выражается в омах на метр (Ом·м). В радиоэлектронике используют также меньшую единицу (Ом·см). Для оценки большой электропроводности металлических проводниковых материалов (меди, алюминия и др.) применяют еще меньшую величину удельного электрического сопротивления – микроом на метр (мкОм·м). Соотношение между перечисленными единицами: $1 \text{ Ом}\cdot\text{см} = 10\,000 \text{ мкОм}\cdot\text{м} = 0,01 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Все радиоматериалы по электропроводности можно разделить на три основные группы:

- 1) проводники $\rho = 10^{-8} \div 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- 2) полупроводники $\rho = 10^{-6} \div 10^7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- 3) диэлектрики $\rho = 10^7 \div 10^{18} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Удельное электрическое сопротивление любого радиоматериала зависит от температуры, (см. рисунок 1.1, а). Так, у проводников с повышением температуры удельное электрическое сопротивление возрастает. У полупроводников и диэлектриков, наоборот, с возрастанием температуры удельное электрическое сопротивление уменьшается.

Температурный коэффициент удельного сопротивления $TK\rho$ – величина, с помощью которой можно учитывать изменение удельного электрического сопротивления в зависимости от температуры материала $TK\rho = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1 (T_2 - T_1)$, где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления материала при начальной T_1 и конечной T_2 температурах материала.

У проводников с ростом температуры удельное сопротивление возрастает, т.е. $TK\rho > 0$ – положительная величина, у полупроводников и диэлектриков с ростом температуры удельное сопротивление уменьшается, т.е. $TK\rho < 0$ – величина отрицательная.

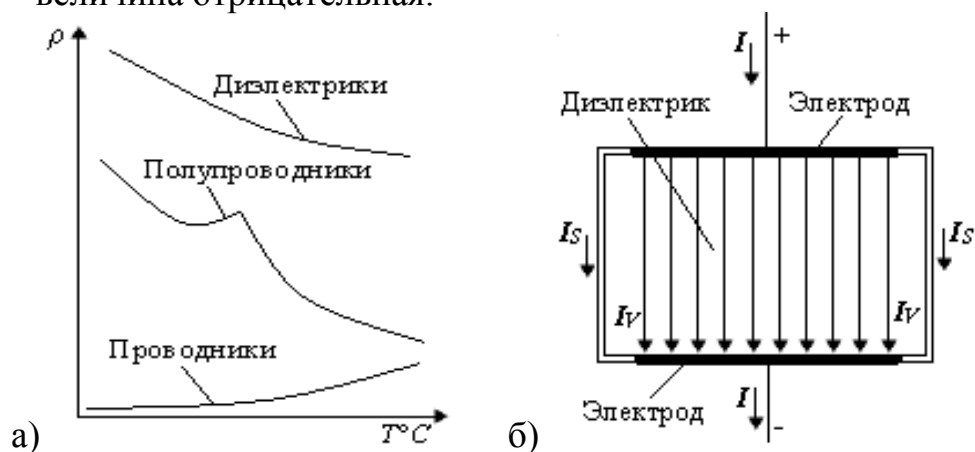


Рисунок 1.1 – Зависимость удельного электрического сопротивления материалов от температуры (а), токи объемной и поверхностной электропроводности в диэлектрике (б)

В твердых диэлектриках имеются токи объёмной I_V и поверхностной I_S электропроводности (см. рисунок 1.1,б), поэтому у них определяют удельное объёмное ρ_V и поверхностное ρ_S сопротивления. Удельное поверхностное сопротивление так же, как и общее, выражается в омах. Удельное объёмное сопротивление характеризует свойство диэлектрика проводить ток через свой объём, а удельное поверхностное сопротивление – по своей поверхности. У диэлектриков $\rho_V = 10^7 \div 10^{18}$ Ом·м; $\rho_S = 10^9 \div 10^{16}$ Ом.

Удельная проводимость γ (См /м) – величина, обратная удельному сопротивлению $\gamma = 1/\rho$. У твердых диэлектриков различают удельную объёмную $\gamma_V = 1/\rho_V$ (См /см, Ом⁻¹·м⁻¹) и удельную поверхностную проводимости $\gamma_S = 1/\rho_S$ (См).

Удельной проводимостью характеризуется степень электропроводности радиоматериала. Так, у проводников $\gamma = 10^5 \div 10^8$ См/м, а у полупроводников $\gamma = 10^6 \div 10^{-7}$ См/м. Удельные объёмная и поверхностная проводимости твердых диэлектриков очень малы: $\gamma_V = 10^{-7} \div 10^{-18}$ См/м, $\gamma_S = 10^{-8} \div 10^{-16}$ См. Это позволяет использовать их для изоляции частей радиоэлектронных устройств, находящихся под разными электрическими потенциалами.

Для оценки электрического сопротивления тонких пленок (диэлектриков, полупроводников и др.), например, в тонкопленочных интегральных

микросхемах, используют сопротивление пленки $R_{пл}$ (Ом/м), отнесенное к квадрату её поверхности (см. рисунок 1.2,а):

$$R_{пл} = \rho a / \Delta a = \rho / \Delta.$$

Диэлектрическая проницаемость ϵ_r (относительная диэлектрическая проницаемость) характеризует способность диэлектрика или полупроводника образовывать электрическую емкость. Емкость C (Ф) плоского конденсатора (см. рисунок 1.2,б) заданных размеров прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости применяемого в нем диэлектрика $C = \epsilon_a S / h$, где ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м, S – площадь одной 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, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость (безразмерная величина). Наименьшую диэлектрическую проницаемость имеет вакуум ($\epsilon_r = 1$), жидкие и твердые диэлектрики ($\epsilon_r \approx 2 \div 17$); диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_r = 1,00058$.

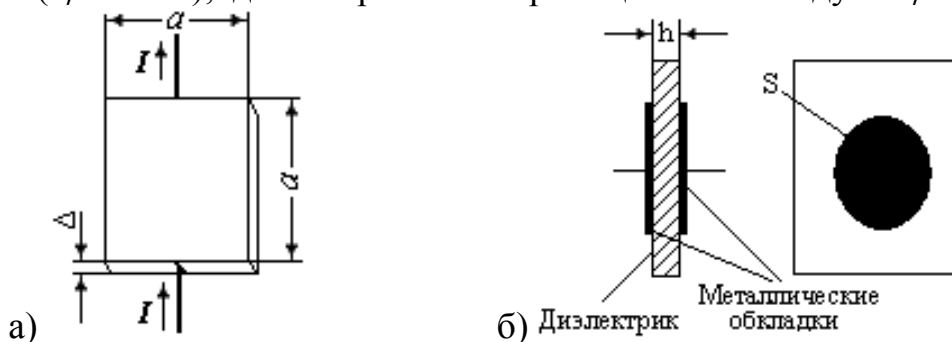


Рисунок 1.2 – Измерение электрического сопротивления тонких пленок (а), плоский конденсатор (б)

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости $TK\epsilon_r$ (К⁻¹) характеризует изменение диэлектрической проницаемости ϵ_r радиоматериалов от температуры (см. рисунок 1.3,а):

$$TK\epsilon_r = (\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}) / \epsilon_{r1}(T_1 - T_2),$$

где ϵ_{r1} и ϵ_{r2} – диэлектрическая проницаемость материала при начальной T_1 и при конечной T_2 температурах. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости имеет положительное или отрицательное значение и соответственно указывает, возрастает или убывает (при увеличении температуры) диэлектрическая проницаемость данного диэлектрика.

2 Лекция №2. Потери энергии в диэлектриках, механические и тепловые и физико-химические характеристики материалов

Цели лекции:

- изучение потерь энергии и электрическая прочности диэлектриков;
- изучение механических характеристик материалов;
- изучение тепловых характеристик материалов;
- изучение физико-химических характеристик материалов.

Содержание лекции:

- потери энергии в диэлектриках и его электрическая прочность;
- основные механические характеристики материалов;
- тепловые характеристики материалов;
- физико-химические характеристики материалов.

2.1 Потери энергии и электрическая прочность диэлектриков

Активные потери энергии в диэлектрике при его работе в переменном электрическом поле характеризуются *тангенсом угла диэлектрических потерь* $tg\delta$.

Известно, что мощность, выделяемая в проводнике, подключенном в цепь постоянного тока P_{\pm} , и мощность при его подключении в цепь переменного тока P_{\sim} будут одинаковыми, если действующее значение переменного тока будет равно значению постоянного $P_{\pm} = P_{\sim}$.

Если же диэлектрик один раз включить под постоянное напряжение, а другой – под переменное, мощность, выделяемая в диэлектрике, включенном под переменное напряжение, будет значительно больше мощности, теряемой при включении его под постоянное напряжение $P_{\sim} > P_{\pm}$.

В диэлектрике, работающем под переменным напряжением, проходят три тока, сдвинутые по фазе (по времени): смещения $I_{см}$, абсорбции $I_{абс}$, и проводимости $I_{пр}$. Эти токи и напряжение U , приложенное к диэлектрику, изображены в виде векторной диаграммы на рисунках 2.1,б.

Напряжение на векторной диаграмме изображено в виде горизонтального вектора U . Ток смещения $I_{см}$ опережает напряжение на 90° , ток абсорбции тоже опережает напряжение по фазе, но меньше, чем на 90° , а ток проводимости $I_{пр}$ совпадает по фазе с напряжением. На рисунке 2.1,в показан общий ток I в диэлектрике, полученный сложением векторов всех трех токов. Угол между вектором напряжения U и вектором общего тока I обозначают буквой φ и называют углом сдвига фаз. Угол между вектором общего тока I и вектором тока смещения $I_{см}$ обозначают буквой δ и называют углом диэлектрических потерь.

Вектор тока абсорбции $I_{абс}$ разложим на активную $I_{A\ абс}$ и реактивную $I_{P\ абс}$ составляющие. Сумма токов проводимости $I_{пр}$ и активной составляющей тока абсорбции $I_{A\ абс}$ является активной составляющей I_A общего тока I в диэлектрике, т.е. $I_A = I_{пр} + I_{A\ абс}$. Сумма токов смещения $I_{см}$ и реактивной составляющей тока абсорбции $I_{P\ абс}$ представляет собой реактивную составляющую I_P общего тока I , т.е. $I_P = I_{см} + I_{P\ абс}$.

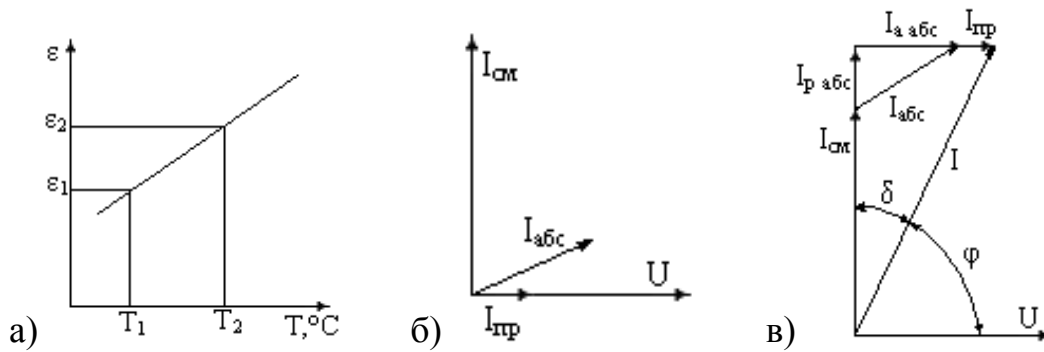


Рисунок 2.1 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры (а), векторное изображение токов (б), сложение токов в диэлектрике (в)

Активная мощность (Вт), рассеиваемая в диэлектрике (например, в конденсаторе), равна произведению напряжения, приложенного к конденсатору, на сумму активных токов $P_A = U I_A$. Реактивная мощность (В·А) равна произведению приложенного напряжения на сумму реактивных токов $P_P = U I_P$.

Из векторной диаграммы токов находим $I_A/I_P = \text{tg}\delta$, как известно реактивный (емкостный) ток $I_P = U \omega C$, отсюда находим выражение для активного тока конденсатора:

$$I_A = U \omega C \text{tg}\delta, \quad (1)$$

а активная мощность, рассеиваемая в диэлектрике конденсатора, будет соответственно

$$P_A = U^2 \omega C \text{tg}\delta. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что при заданных напряжении U , частоте ω , и емкости C активные потери в диэлектрике будут зависеть от $\text{tg}\delta$. Чем меньше значение $\text{tg}\delta$, тем лучшего качества диэлектрик, т.к. в нем меньше потери энергии.

Наименьшими значениями $\text{tg}\delta = 10^{-6} \div 10^{-5}$ обладают газообразные диэлектрики. У твердых качественных диэлектриков, применяемых в высокочастотных узлах РЭА, $\text{tg}\delta = (2 \div 5) \cdot 10^{-4}$.

Электрическая прочность E_{np} – напряженность электрического поля, при которой наступает пробой диэлектрика или полупроводника.

Электрическую прочность диэлектрика E_{np} (В/м) в однородном электрическом поле вычисляют по формуле

$$E_{np} = U_{np}/h,$$

где U_{np} – напряжение, при котором произошел пробой диэлектрика, В; h – толщина образца диэлектрика в месте пробоя, м.

2.2 Механические характеристики

Для полной оценки качества радиоматериалов необходимо знать не только электрические, но и механические характеристики, определяющие их 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

$$e_p = (l_p - l_0) 100 / l_0,$$

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 $e_p = 250 \div 300\%$, у металлических проводников $e_p = 15 \div 20\%$, у пластмасс $e_p = 2 \div 5\%$.

Для измерения и используют образцы материалов определенных размеров и формы. Образец зажимают в стальных зажимах машины для испытаний на растяжение.

Разрушающее напряжение при сжатии (Па) измеряется на образцах материалов определенных размеров и формы и вычисляется 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 σ_{II} определяют приложением изгибающего усилия к середине испытуемого образца материала, покоящегося на двух неподвижных стальных опорах. Разрушающее напряжение материала при статическом изгибе вычисляют по формуле

$$\sigma_{II} = P_{II} L / (bh^2),$$

где P_{II} – изгибающее усилие, Н;
 L – расстояние между опорами, м;
 b – ширина образца, м;
 h – толщина образца, м.

Ударная вязкость a – отношение работы ΔA , затраченной на разрушение образца материала, к площади его поперечного сечения S_0 : $a = \Delta A / S_0$. Для определения ударной вязкости материала используют удар по образцу маятником, поднятым на определенную высоту. Ударная вязкость позволяет судить о степени хрупкости материала. Чем меньше ударная вязкость, тем более хрупок материал. Так, у радиокерамических материалов, отличающихся хрупкостью, $a = 1,8 \div 4,5$ кДж/м², в то время, как у стеклотекстолитов $a = 100 \div 150$ кДж/м².

Эта характеристика имеет большое значение для материалов, применяемых в бортовом радиооборудовании.

2.3 Тепловые характеристики

Для полной оценки качества радиоматериалов, кроме механических и электрических, необходимо знать их тепловые характеристики. Большинство

радиоматериалов, особенно органических диэлектриков, очень чувствительны к высоким и низким температурам.

Температура плавления ($^{\circ}\text{C}$) определяется у материалов кристаллического строения – металлов, полупроводников и диэлектриков (германий, кремний, слюда, парафин и др.).

Температура размягчения ($^{\circ}\text{C}$) определяется у материалов аморфного строения (компаунды, стекла, многие полимерные диэлектрики). Материал кристаллического строения по достижении температуры плавления переходит из твердого в жидкое состояние. У материалов аморфной структуры переход из твердого состояния в жидкое совершается постепенно, в широком интервале температур.

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 и компонентов радиоаппаратуры. Так, нельзя соединять друг с другом детали с резко отличающимися КТР. Наименьшим значением КТР обладает кварцевое стекло ($5,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), наибольшим – некоторые полимерные диэлектрики, например, полиэтилен и поливинилхлорид ($150 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

Таблица 2.1

Класс нагревостойкости	Предельная температура $^{\circ}\text{C}$	Примерный перечень диэлектриков, относящихся к данному классу нагревостойкости
У	90	Полистирол, полиэтилен, бумаги, картоны, хлопчатобумажные ткани
А	105	Гетинакс, текстолит, хлопчатобумажные и шелковые ткани, пропитанные лаком
Е	120	Лавсановые пленки, стеклоткани на масляных лаках, пластмассы с неорганическими наполнителями
В	130	Пластмассы с нагревостойкими неорганическими наполнителями
Ф	155	Пластмассы на основе полиуретана, эпоксидов с наполнителями из слюды, асбеста, стекловолокна
Н	180	Кремнийорганические диэлектрики
Г	Выше 180	Слюда, радиокерамические материалы, фторопласт-4, полиамиды

Коэффициент теплопроводности λ позволяет оценить способность материала проводить теплоту от более нагретой её поверхности к менее нагретой. Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{K})$, 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 заданного материала, м², толщиной h , м;

$(T_2 - T_1)$ – разность температур поверхностей образца материала.

Известно, что наибольшей теплопроводностью обладают металлы [(68÷415Вт/(м·К)], значительно меньшей – твердые органические диэлектрики [(0,09÷0,35Вт / (м·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 (см. таблицу 2.1).

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°С и ниже) эти материалы теряют механическую прочность и растрескиваются.

2.4 Физико-химические характеристики

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

$$w = (G_2 - G_1) 100 / G_1,$$

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.

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÷55°С); резкое изменение температуры в течение суток; высокая влажность воздуха (90÷95%); солнечная радиация; воздух, содержащий соли и пыль; плесневые грибки, повреждающие многие материалы органического происхождения; насекомые, повреждающие органические диэлектрики.

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

Радиационная стойкость – характеристика, позволяющая оценить стойкость радиоматериалов к воздействиям ионизирующих излучений: α , β , 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 материалов. Особенно сильное воздействие ионизирующее излучение оказывает на органические диэлектрики, часто вызывая их разрушение. Однако при небольших дозах облучения у некоторых органических диэлектриков (полиэтилен, пропилен) улучшается их структура и основные характеристики. Особенно сильным излучениям подвергаются узлы радиоустройств и радиоматериалы летательных аппаратов (ракеты, космические корабли и др.).

3 Лекция №3. Электрические процессы в диэлектриках, поляризация, электропроводность и пробой диэлектриков

Цели лекции:

- изучение различных видов поляризации диэлектриков;
- изучение электропроводности и пробоя диэлектриков.

Содержание лекции:

- поляризация диэлектриков, виды поляризации;
- электропроводность и пробой диэлектриков;

3.1 Поляризация диэлектриков, виды поляризации

При приложении напряжения в диэлектрике протекают различные электрические процессы – поляризация, электропроводность и др. При большом напряжении может произойти разрушение диэлектрика (пробой).

Поляризация диэлектрика – это процесс упорядочения его связанных зарядов под действием приложенного электрического поля.

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 (см. рисунок 3.1, а).

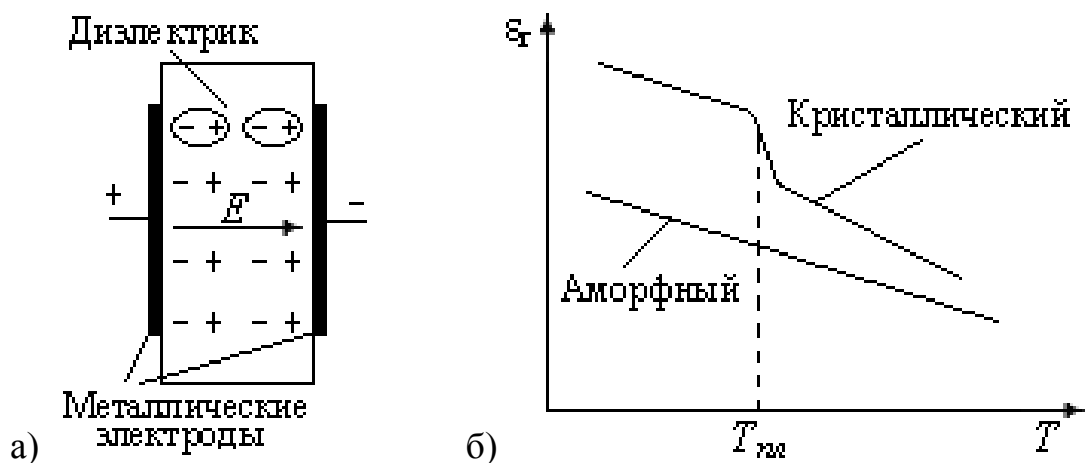


Рисунок 3.1 – Электронная поляризация диэлектрика (а), зависимость диэлектрической проницаемости неполярных диэлектриков от температуры (б)

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 (см. рисунок 3.1, б).

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:

$$\epsilon_r = 1 + 4 \pi n \alpha_{\text{э}}, \quad (3)$$

где n – концентрация частиц (атомов, молекул) в диэлектрике;

$\alpha_{\text{э}}$ – электронная поляризуемость – величина, зависящая от структуры молекулы.

Из уравнения (3) видно, что ϵ_r зависит от концентрации поляризующихся частиц и их способности поляризоваться, т.е. от величин n и $\alpha_{\text{э}}$. Поэтому диэлектрическая проницаемость диэлектриков с кристаллической структурой больше диэлектрической проницаемости диэлектриков с аморфной структурой, т.к. плотность упаковки поляризующихся атомов и молекул в первом случае больше, чем во втором.

На основании уравнения (3) также можно сказать, что ϵ_r с увеличением температуры диэлектрика уменьшается, как показано на рисунке 2.1, б. Это объясняется увеличением объема диэлектрика и уменьшением концентрации поляризующихся частиц в единице объема.

Дипольная поляризация. Полярные диэлектрики состоят из полярных молекул, имеющих положительно и отрицательно заряженные ионы, центры

зарядов которых не совпадают (см. рисунок 3.2, а). Полярные молекулы являются

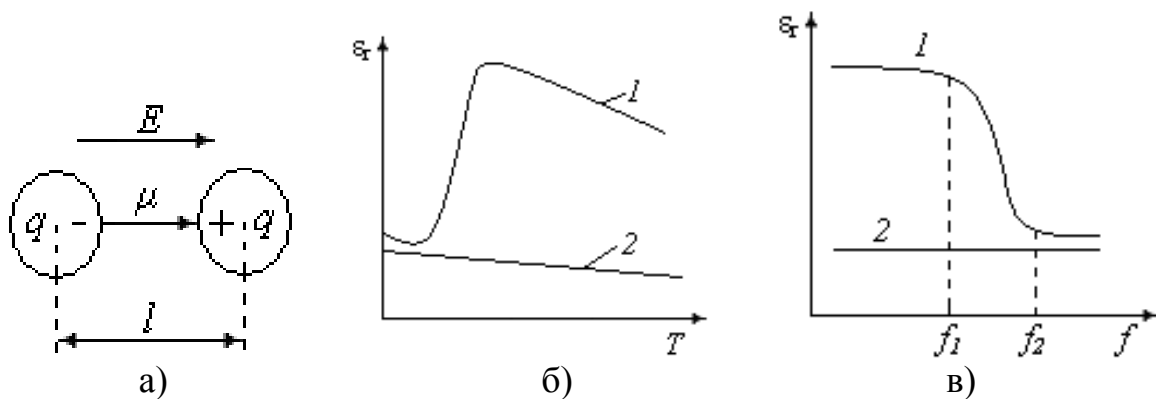


Рисунок 3.2 – Схема полярной молекулы (а), зависимость диэлектрической проницаемости от температуры полярного 1 и неполярного 2 диэлектриков (б), зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для полярного 1 и неполярного 2 диэлектриков (в)

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. $\mu = ql$. Электрический момент μ обозначается вектором, направленным от отрицательного иона к положительному. Такая система зарядов называется твердым диполем в отличие от упругого диполя, образующегося из нейтральной молекулы под действием электрического поля.

Твердые диполи возникают в диэлектрике до воздействия приложенного напряжения. Образование твердых диполей и, следовательно, полярных молекул обусловлено асимметрией строения молекул многих диэлектриков. Если к полярному диэлектрику приложить электрическое напряжение, в нем возникнут два вида поляризации: электронная и дипольная. Сначала происходит процесс быстрого (порядка сотых долей пикосекунды) смещения электронов относительно ядер в атомах диэлектрика – электронная поляризация. Затем протекает более замедленный процесс дипольной поляризации. Он представляет собой поворот полярных молекул под действием сил электрического поля. Внешне поворот полярных молекул проявляется в виде тока абсорбции.

Поскольку в полярных диэлектриках происходят два вида поляризации, их диэлектрическая проницаемость будет значительно больше, чем у неполярных диэлектриков. Рост диэлектрической проницаемости у полярного диэлектрика при увеличении температуры (см. рисунок 3.2, б, кривая 1) вызван повышением интенсивности процесса дипольной поляризации. Это объясняется уменьшением межмолекулярных сил, что облегчает поворот полярных молекул под действием сил электрического поля. Изменение значения ϵ_r у неполярных диэлектриков (кривая 2) связано с уменьшением концентрации молекул.

Зависимость диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика от частоты (см. рисунок 3.2, в, кривая 1) имеет резкий излом. Так, до частоты f_1 почти все молекулы успевают совершить поворот за время одного полупериода электрического поля. При частоте f_2 и выше полярные молекулы не успевают развернуться и ориентироваться в электрическом поле, т.е. интенсивность процесса дипольной поляризации резко снижается. Соответственно уменьшается и диэлектрическая проницаемость ϵ_r . В области частот выше f_2 имеет место процесс только электронной поляризации, дипольная же поляризация практически отсутствует. Диэлектрическая проницаемость неполярного диэлектрика не зависит от частоты приложенного напряжения в широком диапазоне частот (кривая 2), поскольку имеет место мгновенный процесс электронной поляризации, практически не зависящий от частоты. Поэтому в технике высоких частот широко используют неполярные диэлектрики.

Ионная поляризация имеет место в ионных кристаллических диэлектриках. Приложение напряжения вызывает появление сил, под воздействием которых ионы упруго смещаются относительно своего первоначального положения за время $10^{-13} \div 10^{-12}$ с, образуя упругий диполь. Наряду с процессом ионной поляризации имеет место и электронная поляризация, поэтому общая интенсивность поляризации у ионных кристаллических диэлектриков большая, поэтому диэлектрическая проницаемость у них $\epsilon_r = 5 \div 12$ и более, не зависящая от частоты. Ионные диэлектрики (радиокерамика, слюда) широко применяются в радиоэлектронике.

Спонтанная поляризация. У некоторых диэлектриков (сегнетова соль) наблюдается процесс самопроизвольной ориентации диполей при отсутствии внешнего электрического поля. Ориентированные диполи образуют области с одинаковым направлением вектора дипольного момента – домены, но разные домены имеют разные направления векторов и общий электрический момент сегнетоэлектрика равен нулю. Если к сегнетоэлектрику приложить напряжение, домены начинают ориентироваться по направлению сил электрического поля.

Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков весьма велика ($\epsilon_r = 1500 \div 7500$), и она в сильной степени зависит как от температуры, так и от напряженности электрического поля.

3.2 Электропроводность и пробой диэлектриков

Известно, что любой материал (проводник, полупроводник, диэлектрик) проводит электрический ток, но в диэлектриках протекают очень малые токи, даже если они находятся под действием очень большого напряжения.

Электрический ток в твердых диэлектриках представляет собой направленное движение ионов. Источниками свободных ионов являются различные примеси (вода, органические кислоты, оксиды и др.), молекулы которых под действием электрических сил распадаются на ионы.

Ионы примесей порождают в твердом диэлектрике примесную проводимость, которая наблюдается в области невысоких температур. В области повышенных температур появляется еще и собственная электропроводность, обусловленная появлением свободных ионов самого диэлектрика. График, показывающий логарифмическую зависимость удельной проводимости кристаллического диэлектрика от температуры, изображен на рисунке 3.3, а.

Таким образом, для полной оценки качества диэлектрика необходимо исследование его характеристик в широком интервале температур. Так, ультрафарфор является вполне приемлимым диэлектриком до 150°C . С превышением этой температуры его проводимость резко возрастает, что выражается в резком повышении $\text{tg}\delta$ и падении электрического сопротивления.

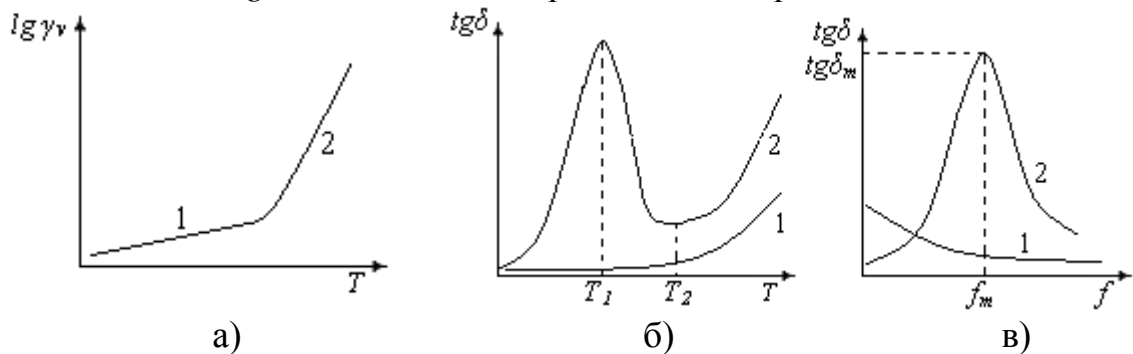


Рисунок 3.3

Рассмотренные нами процессы поляризации и электропроводности диэлектриков позволяют проанализировать характер изменения $\text{tg}\delta$ в зависимости от температуры и частоты приложенного напряжения. Так, с ростом температуры $\text{tg}\delta$ неполярного диэлектрика растет (см. рисунок 3.3, б, кривая 1). Это связано с увеличением тока проводимости, а, следовательно, активных потерь мощности в диэлектрике.

У полярного диэлектрика увеличение $\text{tg}\delta$ вызвано ростом тока проводимости при температуре T_2 и выше (кривая 2). До температуры T_1 рост $\text{tg}\delta$ 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 теплового разброса, т.е. в беспорядочные тепловые колебания. Энергия, затрачиваемая на дипольную поляризацию, уменьшается, на это указывает снижение величины $\text{tg}\delta$ в интервале температур от T_1 до T_2 .

Зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты переменного напряжения для неполярного и полярного диэлектриков показана на рисунке 3.3-в. Уменьшение $\text{tg}\delta$ неполярного диэлектрика (кривая 1) объясняется понижением тока проводимости, т.к. ионы не успевают перемещаться за время одного полупериода электрического поля. В полярном диэлектрике (кривая 2) с увеличением частоты сначала возрастают потери энергии, т.к. диполи вынуждены чаще переориентироваться, а это требует затрат большей энергии. Это происходит лишь до определенной частоты f_m , соответствующей максимальной величине $\text{tg}\delta$. Начи-

ная с частоты f_m , время одного полупериода становится настолько малым, что полярные молекулы не успевают ориентироваться и потери энергии уменьшаются, на что указывает снижение $tg\delta$ в области высоких частот.

Пробой диэлектриков происходит, когда напряженность E электрического поля превысит допустимую величину. В результате пробоя диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства, т.к. в месте пробоя образуется сквозной канал с повышенной проводимостью.

Пробой может произойти в результате нагрева диэлектрика протекающим через него током, это вызывает тепловое разрушение диэлектрика (про-

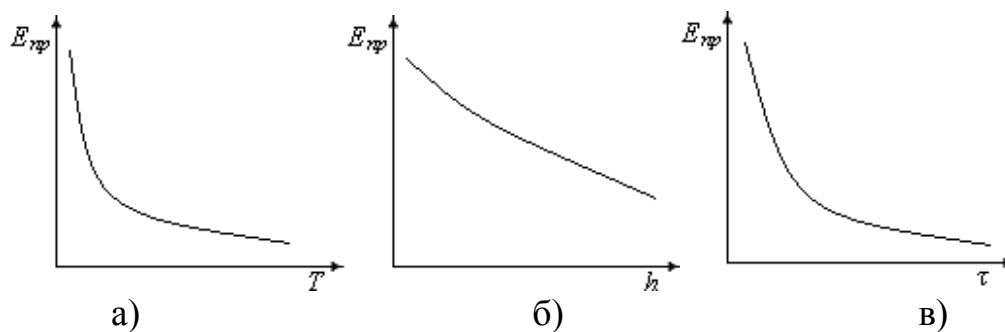


Рисунок 3.4

жигание, расплавление) – *тепловой пробой*. При тепловом пробое электрическая прочность $E_{нр}$ твердого диэлектрика зависит от температуры T и толщины h диэлектрика (рисунок 3.4-а, 3.4-б), т.к. с их увеличением теплоотвод затрудняется, что ускоряет процесс теплового разрушения диэлектрика.

Электрический пробой обусловлен образованием лавины свободных электронов в каком либо месте объема диэлектрика, причем, электрическая прочность диэлектрика в малой степени зависит от его температуры и толщины. Электрическая прочность твердого диэлектрика зависит от времени действия напряжения. На рисунке 3.4-в показано, что при увеличении времени τ выдержки диэлектрика под напряжением значение его электрической прочности $E_{нр}$ снижается. Эту кривую часто называют «кривой жизни», т.к. по ней можно определить срок службы диэлектрика при заданной напряженности электрического поля.

4 Лекция №4. Виды твердых диэлектриков, полимеризационные и поликонденсационные диэлектрики

Цели лекции:

- изучение полимеризационных диэлектриков;
- изучение поликонденсационных диэлектриков.

Содержание лекции:

- полимеризационные диэлектрики;
- поликонденсационные диэлектрики.

4.1 Виды твердых диэлектриков

По агрегатному состоянию диэлектрики делят на газообразные, жидкие и твердые. С точки зрения процессов поляризации все диэлектрики независимо от их агрегатного состояния делят на полярные и неполярные. Твердые диэлектрики бывают органические и неорганические. Органические диэлектрики представляют собой различные соединения на основе углерода. В неорганических диэлектриках углерод не содержится. Все неорганические диэлектрики и большинство органических представляют собой твердые вещества кристаллического или аморфного строения. В электронных устройствах применяют преимущественно твердые диэлектрики.

4.2 Полимеризационные диэлектрики

Полимеризация – процесс соединения исходного мономера в большие молекулы, образующие новый полимерный материал. В результате полимеризации элементарный состав вещества не меняется, следовательно, сохраняются его электрические параметры.

Полистирол – аморфный диэлектрик получается в результате полимеризации путем ступенчатого нагрева исходного мономерного жидкого вещества – стирола. Степень полимеризации полистирола колеблется в широких пределах, молекулярная масса составляет 50000 – 200000 в зависимости от степени полимеризации. Полистирол – термопластичный прозрачный диэлектрик, относится к слабо полярным диэлектрикам, диэлектрическая проницаемость и $\operatorname{tg}\delta$ так же малы и не зависят от частоты. Поэтому полистирол относят к высокочастотным диэлектрикам и применяют в радиоэлектронике. Блочный полистирол имеет высокий уровень электрических характеристик при 20°C:

$$\begin{aligned}\rho_v &\approx 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \\ \rho_s &\approx 10^{16} \text{ Ом}; \quad \varepsilon_r = 2,4; \\ \operatorname{tg}\delta &= (2\div 4)10^{-4} \text{ (при частоте 1 МГц)}; \\ E_{np} &= 30\div 35 \text{ МВ/м (при толщине 1 мм)}; \\ &\text{холодостойкость } -50^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

Из блочного полистирола изготавливают изоляционные платы, диэлектрические антенны, части волноводов СВЧ и другие радиодетали.

Ударопрочный полистирол представляет собой продукт сополимеризации стирола с синтетическими каучуками или с акрилонитрилами. Основной их особенностью является повышенная ударная вязкость ($a = 40\div 50 \text{ кДж/м}^2$) при сохранении того же уровня теплостойкости и верхнего предела рабочих температур (65÷70°C), что и у обычных видов полистирола.

Электрические характеристики ударопрочных полистиролов несколько ниже, чем у блочного полистирола:

$$\begin{aligned}\rho_v &\approx 10^{12} \div 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \quad \varepsilon_r = 2,7; \\ E_{np} &= 26 \div 27 \text{ МВ/м}; \quad \operatorname{tg}\delta = (4\div 8)10^{-4}; \\ &\text{водопоглощаемость не более } 0,06\% \text{ (за 24 ч)}.\end{aligned}$$

Механические характеристики ударопрочных полистиролов следующие: $\sigma_p = 25 \div 35$ МПа; $\sigma_n = 45 \div 60$ МПа. Ударопрочные полистиролы применяют в узлах радиоаппаратуры с повышенной механической прочностью к нагрузкам. Холодостойкость -60°C .

Полиэтилены – высокополимерные диэлектрики, получаемые полимеризацией газообразного вещества – этилена $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$. В зависимости от давления, при котором протекает процесс полимеризации, различают полиэтилены высокого давления (ВД), низкого (НД), и среднего (СД). Полиэтилены – неполярные диэлектрики высокой химической чистоты, и следовательно, имеют высокие электрические характеристики, не зависящие от частоты приложенного напряжения. Изделия из полиэтилена получают методами горячего литья под давлением и экструзии – выдавливанием нагретого материала через формирующее отверстие (фильеру) заданной формы.

Полиэтилен ВД получают сжижением этилена под высоким давлением (≈ 200 МПа). Процесс полимеризации протекает при $180\text{-}200^\circ\text{C}$. Полиэтилен ВД обладает значительной гибкостью, что позволяет применять его в качестве основной изоляции высокочастотных проводов и кабелей. Основные характеристики полиэтилена ВД следующие:

плотность 920 кг/м^3 ; $\sigma_p = 12 \div 30$ МПа;

$\sigma_u = 12 \div 17$ МПа;

теплостойкость 70°C , холодостойкость -70°C , водопоглощаемость не более $0,02\%$ за 30 сут;

$\rho_v \approx 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\epsilon_r = 2,3$;

$E_{np} = 40 \div 50 \text{ МВ/м}$;

$\text{tg}\delta = (2 \div 5)10^{-4}$ (при частоте 1 МГц).

Полиэтилены СД и НД получают при сравнительно низких давлениях и температурах с использованием растворителя – ксилола. Отличаются они повышенной плотностью и температурой плавления, чем полиэтилен ВД. Механические и электрические характеристики их такие же, как и у полиэтилена ВД. Область применения та же, что и блочного полистирола (части волноводов, изоляционные детали переключателей, каркасы катушек индуктивности, платы и т.д.).

К достоинствам всех видов полиэтилена относятся их химическая инертность, влагостойкость и высокий уровень электрических характеристик, стабильных в широком диапазоне частот.

К недостаткам полиэтиленов можно отнести их невысокую теплостойкость, старение под действием световых лучей, что ухудшает электрические и механические характеристики. Кроме этого им свойственна теплопластичность, горючесть и сравнительно низкая рабочая температура (70°C).

Полиформальдегид – высокополимерный материал, получаемый в результате полимеризации газа формальдегида CH_2O в инертном растворителе. Полиформальдегид – термопластичный материал, из которого изготавливают изделия методом горячего литья под давлением или экструзии.

Характерные свойства полиформальдегида: высокий уровень механических характеристик, стойкость к истиранию, очень низкий коэффициент трения и стабильность размеров, что позволяет использовать его и для конструктивных деталей. Полиформальдегид поддается всем видам механической обработки. Из него изготавливают детали червячных передач и шестерни, работающие бесшумно при больших скоростях вращения.

Основные характеристики полиформальдегида:

плотность 1410 кг/м^3 ;

$\sigma_p = 70 \text{ МПа}$;

$\sigma_u = 100 \text{ МПа}$;

теплостойкость $100\text{-}110^\circ\text{C}$, холодостойкость -50°C , водопоглощаемость не более $0,3\%$ (за 24 ч);

$\rho_v \approx 10^{12} \div 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

$\varepsilon_r = 3,8$; $E_{np} = 20 \div 25 \text{ МВ/м}$;

$\text{tg}\delta = (2 \div 4)10^{-3}$;

$a = 95 \div 110 \text{ кДж/м}^2$.

Электрические характеристики полиформальдегида остаются практически постоянными в интервале температур от -40 до $+100^\circ\text{C}$ и мало изменяются от частоты.

Поливинилхлорид – высокополимерный материал, получаемый в результате полимеризации газа – хлористого винила $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{Cl}$ при участии перекиси водорода. Поливинилхлорид – термопластичный полярный диэлектрик, из которого изделия изготавливают методом горячего прессования, литья или экструзии. Это материал аморфного строения, характерными его свойствами являются высокая химическая стойкость, стойкость к возгоранию и тропикостойкость. Из поливинилхлорида получают винипласт и пластикат.

Поливинилхлоридный пластикат – мягкий гибкий материал в виде лент толщиной $0,5 - 1,75$ и шириной $10 - 105$ мм, а также в виде крошки. Основные характеристики пластиката: плотность $1260 - 1300 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_p = 12 \div 20 \text{ МПа}$; $\varepsilon_p = 180 \div 380\%$; температура термического разложения $180 - 200^\circ\text{C}$; холодостойкость от -20 до -50°C ; водопоглощаемость $0,2 - 0,8\%$ (за 24 ч); $\varepsilon_r = 4,5 \div 6$; $\rho_v \approx 10^{10} \div 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $E_{np} = 20 \div 30 \text{ МВ/м}$; $\text{tg}\delta = 0,05 - 0,8$.

Поливинилхлоридный пластикат применяется до частот $0,1 \text{ МГц}$ в качестве изоляции радиомонтажных проводов разных цветов, для изготовления оболочек высокочастотных кабелей.

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) получают в результате реакции газа – тетрафторэтилена $\text{F}_2\text{C}=\text{CF}_2$. Симметричность строения молекулы и высокая химическая чистота обеспечивают хорошие электрические характеристики, стабильные в широком диапазоне частот (до 10^{10} Гц). Детали, изготовленные из фторопласта-4, могут длительно работать в широком интервале температур (от -190 до $+250^\circ\text{C}$).

Изделия получают из порошка фторопласта-4 холодным прессованием при давлении $30\text{-}35 \text{ МПа}$, после чего их подвергают спеканию в печах при конечной температуре $370 - 380^\circ\text{C}$. Основные характеристики фторопласта-4 сле-

дующие: плотность 2200 кг/м^3 ; $\sigma_p = 14 \div 25 \text{ МПа}$; $\epsilon_p = 470\%$; $\sigma_p \approx 14 \text{ МПа}$; $\lambda = 0,24 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $a \approx 100 \text{ кДж/м}^2$; $\rho_v \approx 10^{16} \div 10^{17} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\rho_s = 10^{17} \text{ Ом}$; $\epsilon_r = 1,9 \div 2$; $E_{np} = 20 \div 30 \text{ Мв/м}$ (при толщине 4 мм); $E_{np} \approx 220 \text{ Мв/м}$ (при толщине 0,02 мм); $\text{tg} \delta = (2 \div 3) 10^{-4}$ (при частоте 1 МГц); водопоглощаемость 0% .

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 начинают деформироваться при 25°C , если механические напряжения достигают 14 МПа и более. С повышением температуры предел текучести понижается. Так, при 100°C предел текучести 6,7 МПа, а при 250°C – всего 2,8 МПа. Это следует учитывать при расчете механически нагруженных изделий из фторопласта-4.

4.3 Поликонденсационные диэлектрики

Поликонденсационные полимерные диэлектрики получают в результате реакции поликонденсации – процесса образования высокополимерного вещества из одного или нескольких низкомолекулярных веществ с выделением побочных продуктов реакции. В этом случае состав получаемого полимера отличается от состава исходных мономеров.

Поликонденсационные диэлектрики представляют собой терморезистивные вещества, не размягчающиеся при нагревании. Они имеют аморфную структуру, из-за чего называются смолами.

Фенолоальдегидные (резольные) полимеры. Из резольных полимеров наибольшее применение получили бакелиты. Они образуются при реакции поликонденсации, протекающей между кристаллическим фенолом $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ и газом – формальдегидом CH_2O в присутствии катализатора – гидроксида бария BaOH_2 или гидроксида аммония NH_4OH .

В результате первой стадии реакции образуется бакелитовая смола (олигомер), ее растворяют в этиловом спирте для получения лака. Бакелитовый лак используется для пропитки волокнистых основ (бумага, ткань), из которых методом горячего прессования получают слоистые диэлектрики – гетинакс, текстолит

Все резольные полимеры в конечной стадии реакции переходят в неплавкое и нерастворимое состояние. Основные характеристики резольных полимеров в конечной стадии следующие:

плотность $1250 \div 1270 \text{ кг/м}^3$;

$\sigma_p = 14 \div 25 \text{ МПа}$;

$\rho_v \approx 10^{10} \div 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

$\epsilon_r = 5 \div 6$;

$$\operatorname{tg}\delta = 0,008 \div 0,01;$$

$$E_{np} = 20 \div 30 \text{ МВ/м.}$$

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.

Новолачные полимеры так же, как резольные получают в результате реакции поликонденсации между фенолом (или крезолом) и формальдегидом, но при других весовых соотношениях.

Характеристики отвержденных новолачных полимеров более низкие по сравнению с характеристиками резольных:

$$\rho_v \approx 10^9 \div 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$\varepsilon_r = 6 \div 7;$$

$$\operatorname{tg}\delta = 0,04 \div 0,05;$$

$$E_{np} = 10 \div 12 \text{ МВ/м.}$$

Пониженный уровень электрических характеристик и повышенная водопоглощаемость позволяют использовать новолачные полимеры главным образом для производства вспомогательных деталей в радиоаппаратуре (ручки, кнопки и др.).

Эпоксидные смолы – преимущественно маловязкие жидкости желтого или светло-коричневого цвета. Это низкомолекулярные вещества (олигомеры), получаемые в результате поликонденсации хлорированного глицерина и диана (или резорцина). При введении в жидкий эпоксидный олигомер порошкообразных или жидких отвердителей в нем начинают протекать процессы соединения молекул олигомера в большие группы, в результате чего образуется твердое терморезистивное вещество – эпоксидный прозрачный полимер с высокими электрическими и механическими характеристиками. Эти свойства эпоксидных полимеров широко используют для герметизации различных компонентов и узлов аппаратуры.

Лавсан (полиэтилентерефталат) – высокополимерный материал, получаемый в результате поликонденсации терефталевой кислоты и этиленгликоля. Образующийся при этом полимер представляет собой твердый прозрачный материал с аморфной структурой, устойчивой до 80°C.

Лавсановая пленка имеет кристаллическую структуру, но остается прозрачной. Пленка имеет следующие характеристики:

$$\sigma_p = 120 \div 172 \text{ МПа};$$

$$e_p = 50 \div 60\%; \sigma_p \approx 14 \text{ МПа};$$

водопоглощаемость не более 0,5% (за 7 сут);

$$\varepsilon_r = 3,2; \rho_v \approx 10^{12} \div 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$\operatorname{tg}\delta = (5 \div 8)10^{-3};$$

$$E_{np} = 120 \div 160 \text{ МВ/м (в зависимости от толщины)};$$

$$\lambda = 0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Лавсановая пленка применяется в производстве конденсаторов, выпускается толщиной 3-25 мкм.

Из расплавленного лавсана изготавливают изделия различной формы (платы, каркасы катушек). На основе лавсана изготавливают электроизоляционные лаки, обладающие хорошей адгезией к металлам, их применяют для изоляции обмоточных проводов.

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 кремнийорганические материалы, обладающие способностью работать в широком интервале температур (от -60 до +200°C), отличающиеся влаго- и тропикостойкостью, высоким уровнем электрических характеристик.

В основе молекул силиконов лежит силоксанная группировка атомов Si-O-Si (кремний – кислород – кремний), имеющая большую энергию связи. Это обуславливает большую нагревостойкость этих диэлектриков. В зависимости от вида присоединенного органического радикала и их числа могут быть получены жидкие, каучукоподобные, эластичные, твердые и хрупкие диэлектрики, а также лаки и эмали.

Кремнийорганические диэлектрики – слабополярные вещества, их электрические характеристики следующие:

$$\rho_v \approx 10^{12} \div 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\text{tg } \delta = 0,0005 \div 0,005;$$

$$\varepsilon_r = 2,6 \div 4;$$

$$E_{np} = 30 \div 80 \text{ МВ/м (у лаковых пленок } E_{np} = 130 \div 150 \text{ МВ/м)}.$$

Электрические характеристики этих диэлектриков мало изменяются при нагревании, тепловом старении и пребывании в воде.

Полиамиды – нагревостойкие негорючие полимерные диэлектрики, которые могут длительно работать в широком интервале температур (от -190 до +250°C). Полиамиды получают в результате поликонденсации диангирида, пиромеллитовой кислоты и ароматических соединений – диаминов. Эти диэлектрики обладают нагревостойкостью, они не размягчаются до температуры начала их разложения (435°C) и ни в чем не растворяются, за исключением концентрированной серной и азотной кислот и некоторых щелочей.

Из полиамидов изготавливают пленку толщиной 5 – 100 мкм, используемую для изоляции. Пленка обладает следующими характеристиками:

$$\text{плотность } 12420 \text{ кг/м}^3;$$

$$\sigma_p = 80 \div 100 \text{ МПа};$$

$$\text{нагревостойкость } 220\text{--}250^\circ\text{C};$$

$$\text{холодостойкость от } -60 \text{ до } -150^\circ\text{C};$$

водопоглощаемость не более 0,8% (за 24 ч);

$\rho_V \approx 10^{14} \div 10^{15}$ Ом·м;

$\varepsilon_r = 12,8 \div 3,5$;

$\operatorname{tg} \delta = (2 \div 8) 10^{-3}$;

$E_{np} = 70 \div 150$ МВ/м.

Существуют хорошо растворимые разновидности полиамидов, используемых для изготовления клеев, изоляционных лаков и эмаль-лаков для изоляции обмоточных проводов. Растворителями для полиамидных лаков служат ксилол, диметилформамид. Все полиамидные лаки обладают хорошей адгезией к металлам, многим пластмассам и керамике.

5 Лекция №5. Пластмассы, лаки и компаунды

Цели лекции:

- изучение пластмасс;
- изучение лаков, эмалей и компаундов.

Содержание лекции:

- назначение и состав пластмасс;
- назначение и состав лаков, эмалей и компаундов.

5.1 Назначение и состав пластмасс

Пластмассы представляют собой твердые материалы, которые на определенной стадии производства приобретают свойство эластического течения. В результате этого из пластмасс могут быть получены литые или прессованные изделия заданной формы. Многие из пластмасс являются многокомпонентными материалами, состоящими из связующего вещества, наполнителей, отвердителей, красителей, порообразователей и др. Отдельные виды пластмасс представляют собой чистые полимеры (полистирол, полиэтилен), которые называются незаполненными пластмассами.

Связующие – термопластичные или терморезистивные полимеры или олигомеры, которые предназначены для пропитки и обволакивания наполнителей и монолитного соединения компонентов в пластмассовом изделии.

Наполнители – химически инертные вещества, не вступающие в реакцию со связующими веществами. Они служат для повышения механической прочности и уменьшения объемной усадки изготавливаемых пластмассовых изделий. Волокнистые наполнители (стеклянные, асбестовые и хлопковые волокна) повышают механическую прочность пластмасс. Неорганические наполнители (кварцевый и слюдяной порошки, стекловолокно) повышают их нагревостойкость. В пластмассах содержится 40 – 60% наполнителей.

Пластификаторы – густые маслообразные синтетические жидкости, вводимые в пластмассы для снижения хрупкости.

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

Порообразователи – вещества, создающие пористую структуру в газонаполненных пластмассовых изделиях.

Исходными материалами для изготовления пластмассовых изделий являются пресс-порошки, содержащие все компоненты пластмасс. Методом горячего или холодного прессования в стальных пресс-формах из пресс-порошков изготавливают пластмассовые изделия. Для обеспечения высоких электрических характеристик изделия должны подвергаться тепловой обработке в течение нескольких часов.

Наиболее высокой нагревостойкостью (180-220°C) обладают изделия на основе кремнийорганических связующих веществ и минеральных наполнителей (молотый кварц, стеклянное волокно).

Если в качестве связующего вещества взять полимер с наивысшим уровнем электрических характеристик (полистирол, полиэтилен), при введении в него 40-60% наполнителя, красителя и других компонентов электрические характеристики полимера заметно ухудшаются.

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 называют слоистыми пластиками.

В *гетинаксе* наполнителем являются листы бумаги толщиной 0,1 мм, пропитанные одним из бакелитовых спиртовых лаков на основе фенолформальдегидного или других бакелитовых олигомеров. Листы бумаги собирают в пакеты, соответствующие толщине прессуемого гетинакса. Собранные пакеты подвергают горячему прессованию, в процессе которого отдельные листы соединяются связующим веществом, образуя монолитный материал. Разные сорта гетинакса выпускают в виде листов толщиной 0,2 – 4 мм и площадью от 550x700 до 980x1430 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. Текстолит выпускают в виде листов толщиной 0,5 – 8 мм (марка ВЧ) и площадью от 450x600 до 750x1000 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. По нагревостойкости гетинакс и текстолит относятся к классу А (105°C).

Стеклотекстолит – слоистая пластмасса, наполнителем в которой является стеклоткань толщиной 0,06 мм. В качестве связующих веществ в нагревостойких стеклотекстолитах применяют кремнийорганические смолы. Стеклотекстолит выпускают толщиной 0,5 – 30 мм в листах площадью от 450x600 до 980x1480 мм. Все слоистые электроизоляционные пластмассы представляют собой монолитные, механически прочные материалы с хорошими электрическими характеристиками (см. таблицу 5.1).

Слоистые пластики изготовляют путем наклеивания медной фольги толщиной 0,03 – 0,05 мм на одну или обе поверхности слоистого пластика с помощью клея (БФ-4 и др.) горячим прессованием.

Газонаполненные пластмассы представляют собой совокупность мельчайших ячеек, образованных вспененным полимером и заполненных воздухом. Такие электроизоляционные композиции обладают малыми ϵ_r и ρ_v и являются радиопрозрачными материалами. Газонаполненные пластмассы, состоящие из ячеек, изолированных друг от друга, называются пенопластами. Это легкие материалы, оформляемые в различного рода конструкции: излучатели, обтекатели антенн и др. В РЭА наибольшее применение имеют пенопласты на основе полистирола и кремнийорганических полимеров. Полистирольные пенопласты обладают высокими электрическими характеристиками: $\rho_v \approx 10^{13} \div 10^{15}$ Ом·м; $\epsilon_r = 1,1 \div 1,4$; $tg\delta = 0,0006 \div 0,00012$. При контакте с металлическими частями конструкций РЭА полистирольные пенопласты не вызывают коррозии последних даже во влажной атмосфере.

Таблица 5.1 - Электрические характеристики пластмасс

Характеристика	Единица измерения	Гетинакс	Текстолит	Стеклотекстолит
Удельное объемное сопротивление	Ом·м	$10^{10} \div 10^{12}$	$10^9 \div 10^{10}$	$10^{10} \div 10^{12}$
Диэлектрическая проницаемость	Отн. ед	5 – 7	6 – 7	5 - 6
Тангенс угла диэлектрических потерь (при частоте 10^6 Гц)	Отн. ед	0,015 – 0,03	0,03 – 0,05	0,01 – 0,02
Допустимая температура припоя	°С	255	200	270
Интервал рабочих температур	°С	-60 ÷ +85	-60 ÷ +70	-60 ÷ +100
Водопоглощаемость	%	3 - 4	4 - 5	0,5 - 1

Недостатком полистирольных пенопластов является сравнительно низкая теплостойкость (65 - 70°С). Этого недостатка нет у кремнийорганических пенопластов, теплостойкость которых 180 - 200°С.

5.2 Электроизоляционные лаки, эмали, 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 исполь-

зуют 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, прилагающие 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 электронной аппаратуре для пропитки обмоток трансформаторов, дросселей и др. Обмотки пропитывают лаками для прочного соединения витков друг с другом, а также для устранения пористости изоляции проводов обмоток и повышения теплопроводности.

Таблица 5.2 - Характеристики лаков

Состав	Марка лака	Температура сушки, °С	Время сушки, ч	Термопластичность	Электрические характеристики при 20°С		Интервал рабочих температур, °С
					удельное объем. сопр-е, Ом·м	электрич. прочность, МВ/м	
Смесь растворов алкидной и резольной смол	ФЛ-98	120	2	Не менее 50 ч при 150°С	10^{12}	70 – 80	-50 ÷ +130
Смесь растворов глифталевой и меламинаформальдегидной смолы в бутаноле	МЛ-92	105	2	Не менее 24 ч при 150°С	10^{11}	60 – 70	-50 ÷ +130
Раствор кремнийорганической смолы в толуоле	КО-921	200	4	Не менее 75 ч при 200°С	10^{13}	70 – 80	-60 ÷ +180

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 и тропикостойкостью.

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

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. В зависимости от основы отвержденные пленки лаков могут быть термопластичными веществами (полистирольные, поливинилхлоридные) или терморезистивными (бакелитовые, эпоксидные).

Важнейшими характеристиками лаков являются вязкость, время высыхания, термопластичность, водопоглощаемость и электрические характеристики. В таблице 5.2 приведены основные характеристики лаков горячей сушки.

Электроизоляционные эмали – это лаки с введенными в них тонкодисперсными веществами (пигментами), в качестве которых применяют оксиды различных металлов. Эмали являются покровными материалами, так как обладают повышенной вязкостью. Ими покрывают пропитанные лаком катушки трансформаторов, печатные платы и другие изделия для защиты от влаги, атмосферных и других воздействий.

Компаунды – это жидкие составы из органических веществ. В отличие от лаков компаунды не содержат растворителей и поэтому при отверждении образуют плотные беспористые блоки. По назначению компаунды делят на пропиточные и заливочные (герметики). Герметизация означает полную изоляцию радиокомпонента от воздействия внешней среды.

В *эпоксидных компаундах горячего отверждения* в качестве отвердителей применяют ангидриды кислот (малеиновой, фталевой), Ангидриды, введенные в эпоксидную смолу, вызывают её отверждение только при длительном нагреве (4–20 ч) при 70 – 150 °С.

В *эпоксидных компаундах холодного отверждения* в качестве отвердителей применяют амины (полиэтиленполиамин, пиридин и др.). Эпоксидные компаунды с отвердителями холодного отверждения имеют ограниченный срок жизни (30 – 60 мин.).

Отвержденные эпоксидные компаунды представляют собой терморезистивный диэлектрик, обладающий следующими характеристиками:

плотность 1200 – 1800 кг/м³;

$\sigma_p = 40 \div 60$ МПа;

$a = 5 \div 15$ кДж/м²;
теплостойкость 50–110°C;
температура разложения 340 – 350°C;
холодостойкость от -45 до -60°C;
водопоглощаемость не более 0,1 ÷ 0,5 % (за 24 ч); $\rho_V \approx 10^{12} \div 10^{13}$ Ом·м;
 $\varepsilon_r = 4 \div 5,2$; $tg\delta = (3 \div 20)10^{-3}$;
 $E_{np} = 18 \div 30$ МВ/м (при толщине слоя 1 мм).

Кремнийорганические компаунды обладают высоким уровнем электрических характеристик, большой нагревостойкостью и температурной стабильностью. Отвержденный кремнийорганический компаунд представляет собой резиноподобное эластичное вещество, имеющее следующие характеристики:

плотность 1000 – 1200 кг/м³;
 $a = 10 \div 15$ кДж/м²;
холодостойкость от -60 до -70°C;
водопоглощаемость 0,05 ÷ 0,09 %);
 $\rho_V \approx 10^{12} \div 10^{13}$ Ом·м;
 $\varepsilon_r = 3 \div 4$;
 $tg\delta = 0,003 \div 0,008$;
 $E_{np} = 20 \div 50$ МВ/м;
нагревостойкость 180 - 220°C;
срок жизни исходных составов 0,5 – 0,6 ч.

6 Лекция №6. Радиокерамические материалы, стекла и ситаллы

Цели лекции:

- изучение радиокерамических материалов;
- изучение стекол и ситаллов.

Содержание лекции:

- назначение и состав радиокерамических материалов;
- назначение и состав стекол и ситаллов.

6.1 Назначение и состав радиокерамических материалов

В готовом виде радиокерамические материалы представляют собой твердые хрупкие тела, получаемые в результате реакции, протекающей между их исходными компонентами при высоких температурах (1200 – 1600°C). Особенности всех керамических материалов являются химическая инертность, негигроскопичность, высокая нагревостойкость.

Все керамические изделия изготавливают из исходных керамических масс, состоящих из нескольких компонентов, измельченных до тонкодисперсного состояния в виде исходных тестообразных масс. Из этих масс получают изделия заданной формы методом пластичной формовки или протяжки через мундштук. Готовые керамические детали имеют окраску преимущественно

светлых тонов и шероховатую поверхность. Гладкая поверхность деталей получается шлифованием или покрытием стекловидной глазурью.

Недостатком всех керамических деталей является их хрупкость и возможность механической обработки только абразивным инструментом.

Радиокерамические материалы условно делят на радиоустановочные и конденсаторные. Радиоустановочные керамические материалы применяют в качестве изоляционных оснований плат в интегральных толстопленочных микросхемах. Из этой керамики также изготавливают ламповые панели, каркасы катушек, основания галетных переключателей и др.

Электротехнический фарфор изготавливают из исходной массы, состоящей 50% природных глин, 25% кварца и 25% полевого шпата. Из-за больших диэлектрических потерь и высокой электропроводности при 80°C и выше электротехнический фарфор в настоящее время в радиоэлектронике не применяют, его заменили ультрафарфор и стеатит.

Ультрафарфор по составу исходной массы отличается от электрофарфора тем, что природный минерал – полевой шпат заменен углекислым барием $BaCO_3$. Так же, как и полевой шпат, оксид бария, образующийся при термическом разложении $BaCO_3 = BaO + CO_2$, является стеклообразующим компонентом, создающим стекловидной аморфное вещество (стеклофазу). Введение углекислого бария позволило уменьшить электропроводность и диэлектрические потери в ультрафарфоре. Компоненты шихты для производства ультрафарфора измельчается до размеров частиц 2 – 3 мкм. После обжига полученный ультрафарфор по массе состоит из кристаллов корунда (30–35%), муллита (35%), и стекла (30–35%). Основные характеристики радиокерамических материалов при 20°C приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Характеристики радиокерамических материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Механические		Электрические			Электрическая прочность, Мв/м
		разруш. напряж. при статич. изгибе, МПа	ударн. вязкость, кДж/м ²	удельн. объемн. сопротивление, Ом·м	диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрич. потерь	
Ультрафарфор	3850	220-390	3,5-4,6	10^{12} - 10^{13}	8 – 8,5	$(3-8)10^{-4}$	28 – 36
Стеатит	3000	150-190	3,0-4,0	10^{12} - 10^{14}	6 – 7	$(3-8)10^{-4}$	40 – 42
22ХС	3700	410-450	7,9-8,0	10^{14} - 10^{15}	9,3	$(5-6)10^{-4}$	50 – 52
Поликор	1000	250-300	–	10^{15} - 10^{16}	9,8	$0,5 \cdot 10^{-4}$	35 – 40
Микролит	3900	420-450	4,1	10^{14} - 10^{15}	9,5	$1,0 \cdot 10^{-4}$	32 – 36

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). Все компоненты шихты тонко измельчают, затем из исходной пластичной стеатитовой массы формируют изделия методом пластичной формовки с последующим обжигом в печах при 1200°C – 1600°C . Структуры готовых стеатитовых изделий состоят из 60 – 70 % кристаллов $\text{MgO}\cdot \text{SiO}_2$ – клиноэнстатита и 30 – 40 % стекла. Наличие в стеатите значительного количества кристаллического вещества обеспечивает высокие электрические и механические характеристики материала.

Поликор – беспористый высокоглиноземистый керамический материал, 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. Достоинствами высокоглиноземистых керамических материалов являются большая механическая прочность даже при температурах до 1500°C и высокие электрические характеристики, сохраняющиеся до 400°C .

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 карбидов с металлами в процессе спекания при высоких температурах. Получается металлодиэлектрический материал, в котором частицы металла связывают друг с другом зерна керамики. Керметы сочетают в себе высокую нагревостойкость, большую твердость и химическую инертность керамики с хорошей теплопроводностью и несколько повышенной электропроводностью, что придает металлической частью керметов. В керметы вводят изоляционное стекло для увеличения удельного электрического сопротивления ($\rho_V = 10^2 \div 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). В электронике керметы применяют в пленочных интегральных микросхемах для создания резистивных тонкопленочных слоев.

6.2 Конденсаторные керамические материалы

Технология изготовления керамических конденсаторов значительно проще технологии приготовления 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: например, титанат магния MgTiO_3 , титанат кальция CaTiO_3 , титанат стронция SrTiO_3 ; на основе диоксида олова – станнатами: например, станнат кальция CaZrO_3 , станнат стронция SrSnO_3 ; на основе диоксида циркония – цирконатами: например, цирконат кальция CaZrO_3 , цирконат бария BaZrO_3 .

На их поверхность методом вжигания наносят сплошные серебряные электроды толщиной 15 – 20 мкм, к которым припаивают медные проводники. Для защиты электродов от коррозии всю поверхность конденсатора покрывают слоем влагостойкой эмали различных цветов. Цвет эмали указывает на температурную стабильность. Титанатная керамика, как правило, имеет отрицательное значение температурного коэффициента диэлектрической проницаемости.

Таблица 6.2 - Характеристики конденсаторных керамических материалов

Материал	Диэлектрическая проницаемость при частоте 10^6 Гц	Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^6 Гц	Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, $1/^\circ\text{C}$	Разрушающее напряжение при статическом изгибе, МПа
Титанат магния	14	0,0003	$+ 70 \cdot 10^{-6}$	100 – 120
Титанат кальция	150	0,0004	$-1500 \cdot 10^{-6}$	120 – 150
Титанат стронция	250	0,0003	$-250 \cdot 10^{-6}$	90 – 110
Станнат кальция	150	0,0005	$+ 110 \cdot 10^{-6}$	80 – 90
Станнат стронция	18	0,0005	$+ 180 \cdot 10^{-6}$	90 – 100
Цирконат кальция	25	0,0003	$+ 50 \cdot 10^{-6}$	80 – 90
Цирконат бария	38	0,0005	$-350 \cdot 10^{-6}$	80 – 100

Все конденсаторные керамические материалы обладают большими значениями удельных объемных электрических сопротивлений и электрической прочности: $\rho_v \approx 10^{11} \div 10^{13}$ Ом·м; $E_{np} = 20 \div 30$ Мв/м. Характеристики конденсаторных керамических материалов приведены в таблице 6.2.

6.3 Стекла и ситаллы

Стекла являются аморфными термопластичными материалами неорганического или органического происхождения. В РЭА наибольшее применение получили стекла неорганического происхождения. Они представляют собой сплавы специально подобранных оксидов: диоксид кремния

SiO₂, глинозем Al₂O₃, щелочные Na₂O и K₂O и щелочноземельные оксиды CaO и BaO, свинца PbO и цинка ZnO. Сырьевыми материалами для стекол служат кварцевый песок, полевопшпатовый шпат, борная кислота H₃BO₃, кальцинированная сода Na₂CO₃, доломит и др.

Сырьевые материалы измельчают и перемешивают, затем полученную шихту плавят в стекловарной печи при 1300 – 1650°C, летучие части CO₂, SO₃ удаляются из нее, оставшиеся оксиды вступают в сложные реакции, образуя жидкую однородную стеклообразную массу. Из нее методами горячего прессования, литья и другими способами получают изделия различных форм и размеров.

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:

$$\begin{aligned}\rho_V &= 10^{14} \div 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \\ \varepsilon_r &= 3,2 \div 3,5; \text{ tg} \delta = 0,0002; \\ E_{np} &= 35 \div 40 \text{ МВ/м}.\end{aligned}$$

Эти изделия обладают самым малым значением КТР = $5 \cdot 10^{-7}$ 1/°C, что придает им очень высокую термостойкость. Кварцевое стекло относится к высокочастотным диэлектрикам, но изготовление из него изделий ограничено из-за очень высокой температуры плавления (выше 1713°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 (не более 5% щелочных оксидов).

Это сравнительно легкоплавкие стекла (1450°C) с вполне удовлетворительными электрическими характеристиками:

$$\begin{aligned}\text{плотность} &= 2600 - 3500 \text{ кг/м}^3; \\ \sigma_{и} &= 250 \text{ МПа}; \rho_V \approx 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \\ \varepsilon_r &= 4,2 \div 7,0; \\ E_{np} &= 20 \div 30 \text{ МВ/м}; \\ \text{tg} \delta &= 0,001 \div 0,008.\end{aligned}$$

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

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 объему однородна с равномерным распределением стеклофазы. Это обеспечивает высокие механические и электрические харак-

теристики ситаллов и полное отсутствие пористости, газопроницаемости и водопоглощаемости. По механической прочности ситаллы превосходят керамические материалы и даже многие металлы. Ситаллы применяются в качестве механически прочных изоляционных оснований (подложек) для тонкопленочных микросхем.

7 Лекция №7. Пьезокерамические материалы и электреты

Цели лекции:

- изучение радиокерамических материалов;
- изучение электретов.

Содержание лекции:

- назначение и состав пьезокерамических материалов;
- назначение и состав электретов.

7.1 Назначение и состав радиокерамических материалов

Пьезокерамические 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 противоположных поверхностях наводятся электрические заряды противоположного знака (см. рисунок 7.1, а). 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 ВЧ-колебаний генераторов, прямого пьезоэффекта – в датчиках давления, микрофонах и др. Основной характеристикой пьезоэлектрика является пьезомодуль d , выражающий отношение наведенного электрического заряда к механическому усилию. Пьезомодуль выражают в кулонах на ньютон.

Природный кварц SiO_2 представляет собой полупрозрачные кристаллы в виде шестигранных призм, заканчивающихся шестигранными пирамидами. В кристалле кварца различают главные оси x , y , z (см. рисунок 7.1, б).

Электрические характеристики кварца изменяются в зависимости от направления кристаллографической оси, по которой их определяют. Так, в направлении оси z :

$$\rho_V \approx 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\varepsilon_r = 4,58;$$

$$\text{tg} \delta = 0,0003$$

и в направлении оси x или y :

$$\rho_V \approx 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\varepsilon_r = 4,41;$$

$$\text{tg} \delta = 0,0002;$$

плотность 2650 кг/м^3 , температура плавления 1713°C .

Из кристаллов кварца алмазным инструментом вырезают пластины, рёбра которых параллельны осям, затем их шлифуют. На противоположные поверхности кварцевых пластин наносят металлические электроды. Наибольший пьезомодуль ($d = 2,3 \cdot 10^{-12}$) имеют пластинки, имеющие поверхности, перпендикулярные оси x .

Сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ является монокристаллическим диэлектриком, плавящимся при 55°C и растворяющимся в воде. Пьезоэффект у сегнетовой соли наблюдается при кручении ее образца.

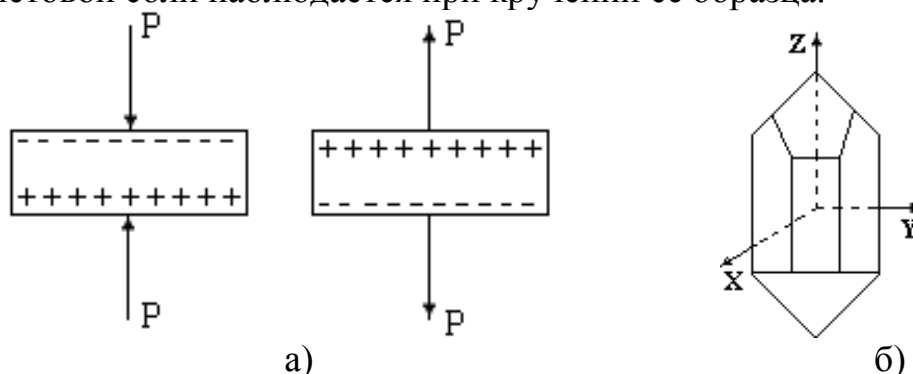


Рисунок 7.1 – Прямой и обратный пьезоэффекты (а), монокристалл кварца с главными осями (б)

Характерные свойства сегнетоэлектриков следующие: большие значения диэлектрической проницаемости, достигающие нескольких тысяч; зависимость диэлектрической проницаемости от приложенного напряжения; определенный интервал рабочих температур – ниже точки Кюри (T_K); наличие прямого и обратного пьезоэффекта; наличие электрического гистерезиса, т.е. отставания электрического заряда Q от приложенного напряжения U (см. рисунок 7.2, а).

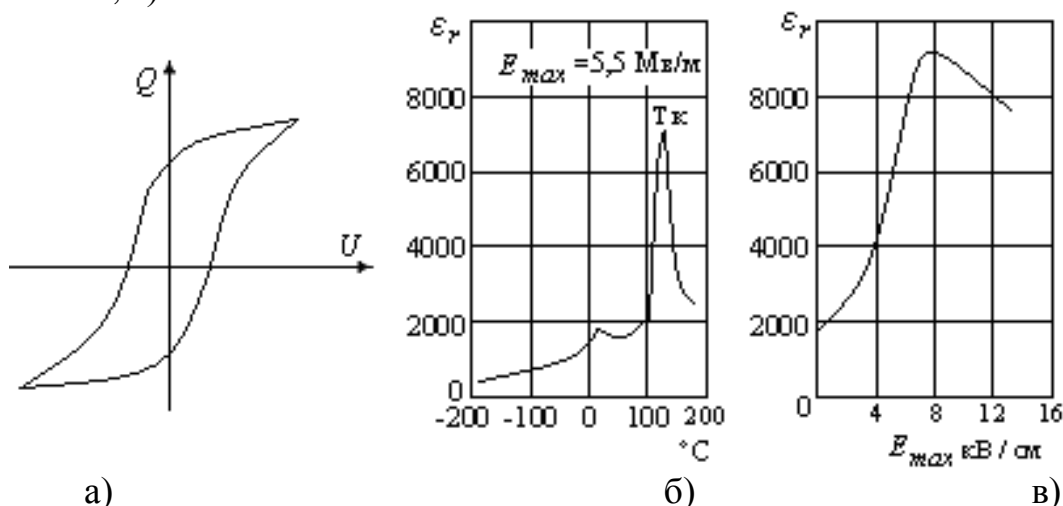


Рисунок 7.2

Керамические сегнетоэлектрики отличаются высокой нагревостойкостью и механической прочностью, негигроскопичностью и простотой технологии изготовления. Наибольшее практическое значение имеет титанат бария

BaTiO_3 . Это поликристаллический материал, получаемый по керамической технологии. Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры показана на рисунке 7.2, б. На графике отмечена температура Кюри T_K , равная для этого материала 120°C . При температурах ниже точки Кюри титанат бария обладает всеми сегнетоэлектрическими свойствами, а при температуре выше T_K сегнетоэлектрические свойства исчезают.

Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности электрического поля E изображена на рисунке 7.2, в. Возрастание диэлектрической проницаемости и, следовательно, емкости с увеличением приложенного напряжения наблюдается только у сегнетоэлектриков. Это свойство используется в диэлектрических (параметрических) усилителях.

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. Они отличаются друг от друга главным образом значениями температуры Кюри. Так, у титаната бария $T_K = +120^\circ\text{C}$, у титаната кадмия $T_K = -223^\circ\text{C}$, у ниобата лития $T_K = +450^\circ\text{C}$. Наилучшими пьезосвойствами обладает твердый раствор цирконата свинца в титанате свинца $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$, называемый цирконатом-титанатом свинца (марка ЦТС). Сегнетоэлектрики применяют для изготовления малогабаритных низко-частотных конденсаторов на низкие напряжения, поскольку значения $\text{tg}\delta$ этих материалов относительно велики, а электрическая прочность мала.

7.2 Электреты

Электреты представляют собой твердые диэлектрики, которые после их электризации и поляризации длительное время сохраняют электрический заряд и могут служить источниками электричества. На противоположных сторонах пластины электрета сосредоточены электрические заряды, равные по величине, но противоположные по знаку.

Основной характеристикой электрета является поверхностная плотность электрического заряда σ , выражаемая в кулонах, отнесенных к единице поверхности пластины электрета. Числовые значения поверхностной плотности заряда электретов находятся в пределах $\sigma = 10^{-8} \div 10^{-6}$ Кл / м².

Для получения электретов используют твердые диэлектрики, обладающие большим удельным объемным сопротивлением (см. таблицу 7.1).

Электреты могут быть получены путем воздействия на нагретый диэлектрик внешнего электрического поля с последующим охлаждением диэлектрика в этом поле. Нагрев облегчает дипольную поляризацию полярного диэлектрика, а также вызывает накопление зарядов у поверхности поляризуемого диэлектрика. После охлаждения диэлектрика достигнутая ориентация диполей и накопление объемных зарядов у поверхности диэлектрика сохраняется. В результате такой обработки получают *термоэлектреты*.

Фотозлектреты получают при воздействии мощного источника света на диэлектрик, к которому приложено постоянное напряжение. Под действи-

ем света и электрического напряжения заряды из объёма диэлектрика притекают к его поверхности. После выключения света и напряжения накопленные заряды на противоположных поверхностях электрета сохраняются.

Таблица 7.1

Электрет	Диэлектрическая проницаемость	Удельное объемное сопротивление Ом·м	Поверхностная плотность зарядов мкКл/м ²	Материал
Политетрафторэтилен	2	10 ¹⁶	80	Полимер
Поликарбонат	3	10 ¹⁴	50	Полимер
Полиэтилентерафталат	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

Электреты могут быть также получены при воздействии на диэлектрик радиоактивного излучения (например, при бомбардировке поверхности диэлектрика быстрыми электронами при воздействии на диэлектрик сильного электрического поля).

На электрические свойства электретов оказывают влияние температура, влажность и проникающая радиация. Значения критических температур электретов находятся в пределах от 50 до 120°С в зависимости от состава. Действие влаги и радиации имеет обратимый характер. Электреты применяют в электроакустических преобразователях, измерителях вибрации и др.

8 Лекция №8. Проводниковые материалы и провода

Цели лекции:

- изучение проводниковых материалов;
- изучение проводов.

Содержание лекции:

- назначение проводниковых материалов;
- назначение и виды проводов.

8.1 Назначение проводниковых материалов

Большинство металлических проводниковых материалов обладает высокой электропроводностью ($\rho = 0,015 \div 0,028$ 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 металличе-

ских (резистивных) $\rho = 0,4 \div 2,0$ мкОм·м. Эти сплавы составляют группу металлических материалов с малым температурным коэффициентом удельного сопротивления (ТК ρ) и применяются для изготовления проволочных резисторов и других радиокомпонентов.

8.2 Чистые металлы и сплавы, применяемые в радиоэлектронике

Медь – главный материал, обладающий высокой пластичностью, достаточной механической прочностью и высокой электропроводностью. Температура плавления меди 1083°C , коэффициент температурного расширения КТР $= 17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Для изготовления изделий (обмоточные, радиомонтажные провода и кабели) применяют чистую медь марок М00к; МОКу; Мок; М1к и М00б; Моб; М1б. Содержание меди - 99,99 – 99,90%. У изделий из мягкой меди (при 20°C) плотность 8900 кг/м^3 ; $\sigma_p = 200 \div 280 \text{ МПа}$; $\epsilon = 6 \div 35\%$; $\rho = 0,072 \div 0,01724$ мкОм·м. Температурный коэффициент удельного сопротивления для всех марок меди ТК $\rho = 0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Бронза представляет собой сплавы меди с оловом (оловянная бронза), алюминием (алюминиевая), бериллием (бериллиевая) и другими легирующими элементами. В отношении электропроводности бронза уступает меди, но превосходит ее по механической прочности, упругости, сопротивлению истиранию и коррозионной стойкости. Из бронзы изготавливают пружинящие контакты, контактные части разъемов и другие детали.

Латунь – сплав меди с цинком, в котором наибольшее содержание цинка может составлять 45% (по массе). Из листовой латуни изготавливают различные детали: зажимы, контакты, крепежные детали. Основные характеристики бронзы, латуни и меди приведены в таблице 8.1.

Ковар – сплав никеля (около 29% по массе), кобальта (около 18%), железа (остальное). Характерной особенностью ковара является близость значений его КТР $= (4,3 \div 5,4) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ к значениям КТР стекла и керамики в интервале температур $20 - 200^\circ\text{C}$. Это позволяет производить согласованные, герметичные спаи ковара со стеклом и керамикой. Его применяют для изготовления корпусов ИС и полупроводниковых приборов.

Алюминий является вторым после меди проводниковым материалом благодаря его сравнительно большой электропроводности и стойкости к атмосферной коррозии.

Плотность алюминия - 2700 кг/м^3 , т.е. он в 3,3 раза легче меди, температура плавления - 658°C . Алюминий отличается малой твердостью и небольшой прочностью при растяжении ($\sigma_p = 80 \div 180 \text{ МПа}$) и больший по сравнению с медью КТР $= 24 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Это является недостатком алюминия.

Из марок алюминия особой чистоты изготавливают обкладки электролитических конденсаторов, а также фольгу. Алюминиевую проволоку выпускают $\varnothing 0,08 - 8 \text{ мм}$ трех разновидностей: мягкую (АМ), полутвердую (АПТ), твердую (АТ).

Таблица 8.1

Материал	Обработка	Проводимость %	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	Относительное удлинение при растяжении, %
Проводниковая медь (99,95% меди)	Мягкая	100	200 – 250	40
	Твердая	88	360 – 420	3
Фосфористая Бронза (6-7 % олова, 0,15 % фосфора)	Мягкая	15	400 – 450	60
	Твердая	10	950 – 1050	3
Бериллиевая бронза (2 % бериллия, 0,5% никеля)	Мягкая	36	700 – 790	20
	Твердая	26	1600 – 1750	9
Латунь Л62	Мягкая	25	400	60
	Твердая	24	880	5

Серебро относится к группе благородных металлов, не окисляющихся в воздухе при комнатной температуре. Окисление начинается при 200°С. Серебро отличается высокой пластичностью, позволяющей получать фольгу и проволоку Ø до 0,01мм, и наивысшей электропроводностью.

Основные характеристики серебра:

плотность 1050 кг/м³;

температура плавления 960,5 °С;

$\sigma_p = 150 \div 180$ Мпа (мягкое серебро);

$\sigma_p = 200 \div 300$ Мпа (твердое серебро);

$\rho = 0,0158$ мкОм·м;

$TK\rho = 0,00369$ 1/°С;

$KTR = 24 \cdot 10^{-6}$ 1/°С.

Из серебра выполняют защитные слои на медных жилах радиомонтажных проводов, используемых при температуре до 250°С. 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 в воздухе даже при высоких температурах. Оно обладает весьма высокой пластичностью, из него получают фольгу толщиной до 0,005 мм и проволоку Ø до 0,01мм.

Основные характеристики золота:

плотность 1930 кг/м³;

температура плавления 1063°С;

$\sigma_p = 150 \div 180$ Мпа, $\rho = 0,0224$ мкОм·м;

$TK\rho = 0,00369$ 1/°С;

$KTR = 14,2 \cdot 10^{-6}$ 1/°С.

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

8.3 Сплавы большого удельного электрического сопротивления

Основными представителями этой группы проводниковых материалов являются манганин и константан.

Манганин – сплав 85 – 89% меди, 2 – 3% никеля, и 11 – 13% марганца. Манганин, как и все сплавы с большим удельным сопротивлением, имеет неупорядоченную кристаллическую структуру, плотность 8400 кг/м^3 ; температура плавления 960°C ; $\text{КТР} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Из манганина изготавливают мягкие (ПММ), и твердые (ПМТ) проволоки $\varnothing 0,02 - 6 \text{ мм}$ и ленты толщиной до $0,08 \text{ мм}$. Манганиновые провода применяют при производстве резисторов высокого класса.

Константан – сплав 58 – 59% меди, 39 – 41% никеля, и 1 – 2% марганца. Плотность 8900 кг/м^3 ; температура плавления 1260°C ; $\text{КТР} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Основные характеристики изделий из манганина: $\sigma_p = 400 \div 638 \text{ Мпа}$, $\rho = 0,45 \div 0,52 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$; $\text{ТК}\rho = (0 \div 6) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. У многих составов константана удельное сопротивление не изменяется с изменением его температуры.

К сплавам с большим удельным электрическим сопротивлением относится резистивный сплав МЛТ. В его состав входят 43,6% (по массе) кремния, 17,6% хрома, 14,1% железа и 24,7% вольфрама. Электрические характеристики сплава МЛТ:

$$\rho = 0,052 \text{ мкОм}\cdot\text{м};$$

$$\text{ТК}\rho = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}.$$

Сплав выпускают в виде порошка. Основная область применения сплава МЛТ – производство металлопленочных резисторов.

8.4 Жаростойкие проводниковые материалы

Жаростойкими материалами являются сплавы на основе никеля, хрома и некоторых других компонентов. Основой жаростойких оксидных пленок является оксид хрома CrO_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 – *фехралями* и *хромалями*.

В марках сплавов буквы обозначают главные компоненты сплава: хром (Х), никель (Н), алюминий (Ю) и титан (Т). Цифра, стоящая за буквой, указывает среднее количество этого металла в сплаве. Например, в нихроме марки Х20Н80 содержится 20% хрома и 80% никеля (по массе).

8.5 Обмоточные и радиомонтажные провода

Обмоточные провода покрывают эмалевой изоляцией толщиной от 0,005 мм (провода с \varnothing 0,03 – 0,04 мм медной жилы) до 0,04 мм (провода с \varnothing 1 – 2,5 мм медной жилы). Медные провода с эмалевой изоляцией приведены в таблице 8.1. Практический интерес представляют обмоточные провода с высокопрочной эмалевой изоляцией на основе винифлекса (ПЭВ-1 и ПЭВ-2) и полиуретана (ПЭВТЛ-1 и ПЭВТЛ-2). Провода ПЭВ ТЛ отличаются повышенной нагревостойкостью изоляции. При расплавлении в процессе пайки проводов эта изоляция служит флюсующим веществом. Следовательно, эти провода можно лудить без предварительной зачистки эмалевой изоляции. Наиболее высокой нагревостойкостью обладают провода, эмалированные высокопрочной эмалью на полиамидной основе (ПНЭТ-ИМИД).

Таблица 8.2

Марка провода	Диаметр медной жилы, мм	Характеристика провода	Толщина слоя изоляции, мм	Нагревостойкость, °С
ПЭВ-1	0,02 – 0,05 0,06 – 2,44	Изолированный высокопрочной эмалью на основе винифлекса	0,006–0,01 0,01–0,09	До 106 (класс А)
ПЭВ-2	0,05 – 2,44	То же, но с утолщенным слоем изоляции	0,012–0,07	То же
ПЭТВ-1	0,06 – 2,44	Изолированный высокопрочной эмалью на полиэфирной основе	0,05–0,065	До 130 (класс В)
ПЭТ-155А	0,06 – 2,44	Изолированный высокопрочной эмалью на полиэфирно-эмидной основе	0,013–0,045	До 155 (класс F)
ПИЭТ-ИМИД	0,1 – 1,3	Никелированный и изолированный высокопрочной эмалью на полиамидной основе	0,012–0,03	До 200 (класс С)

Важнейшими характеристиками обмоточных проводов с эмалевой изоляцией являются: эластичность эмалевой изоляции, стойкость к тепловым ударам, сопротивление истиранию и пробивное напряжение двух слоев эмалевых покрытий на двух скрученных друг с другом проводах (см. таблицу 8.2).

Радиомонтажные провода изготавливают из мягкой медной проволоки (марка ММ) одножильными и многожильными. В многожильных проводах жила состоит из свитых друг с другом отдельных тонких проволок, что позволяет изгибать и укладывать провода в плотные жгуты. Монтажные провода

применяют в аппаратуре для внутриблочного и межблочного монтажа. Различают провода низкого напряжения, используемые до 1000 В, и высокого – выше 1000 В.

Таблица 8.3

Диаметр медной жилы, мм	Число скруток по длине 125 мм	Наименьшее пробивное напряжение эмалевой изоляции двух скрученных проводов, В			
		ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭВТЛ-1	ПЭТВ
0,05 – 0,11	40	350 – 500	450 – 700	350 – 500	650 – 800
0,05 – 0,11	40	500 – 900	700 – 1200	500 – 800	900 – 1600
0,05 – 0,11	40	800 – 900	1200 – 1250	800 – 900	1600
0,05 – 0,11	40	850 – 1000	1250 – 1350	850 – 1000	1800
0,05 – 0,11	40	850 – 1000	1350 – 1500	850 – 1000	2000
0,05 – 0,11	40	1000 – 1200	1500 – 1800	1000 – 1200	2200
0,05 – 0,11	40	1200 – 1300	1800 – 2000	1200 – 1300	2400 – 2600

Большой нагревостойкостью обладают провода с изоляцией из кремнийорганической резины (РКГМ, ПРКС и др.). Интервал их рабочих температур от -60 до +180°С. Кремнийорганические резины обладают высокими электрическими характеристиками и водостойкостью. Их недостатками являются относительно низкие механические характеристики.

Монтажные провода низкого и высокого напряжения с повышенной нагревостойкостью изготавливают из фторопласта-4. По нагревостойкости, интервалу рабочих температур и химической стойкости фторопласт-4 превосходит все органические диэлектрики. Кроме того, он не горит и имеет повышенные электрические характеристики

9 Лекция №9. Характеристики магнитных материалов

Цели лекции:

- изучение характеристик магнитных материалов.

Содержание лекции:

- назначение и характеристики магнитные материалов.

9.1 Назначение и характеристики магнитных материалов

Материалы, способные под действием внешнего магнитного поля намагничиваться, т.е. приобретать особые магнитные свойства, называются магнитными. Основными из них являются железо, никель, кобальт и сплавы на основе технически чистого железа. Материалы с ярко выраженными магнитными свойствами называются ферромагнитными.

Поведение ферромагнитного материала в магнитном поле характеризуется начальной кривой намагничивания (см. рисунок 9.1,а, кривая 1), показывающей зависимость магнитной индукции B в материале от напряженности магнитного поля H . Свойства магнитных материалов оценивают магнитными свойствами. Рассмотрим основные из них.

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a материала, представляющая собой отношение магнитной индукции B к напряженности магнитного поля H в заданной точке кривой намагничивания для данного материала, выражается в генри на метр (Гн/м):

$$\mu_a = B/H,$$

где B – магнитная индукция, Тл, H – напряженность магнитного поля, А/м.

Относительная магнитная проницаемость μ материала есть отношение абсолютной магнитной проницаемости к магнитной постоянной:

$$\mu = \mu_a / \mu_0,$$

где магнитная постоянная μ_0 – величина, характеризующая магнитное поле в вакууме ($\mu_0 = 1,25663710^{-6}$ Гн/м), μ – безразмерная величина. Абсолютная магнитная проницаемость μ_a применяется только в расчетах. Для оценки же свойств магнитных материалов используют относительную магнитную проницаемость μ , не зависящую от выбранной системы единиц. Ее называют магнитной проницаемостью.

На графике кривой начального намагничивания (см. рисунок 5.1,а, кривая 1) видно, что с увеличением напряженности магнитного поля индукция в начале растет быстро, затем медленно, а начиная с B_s , почти не изменяется.

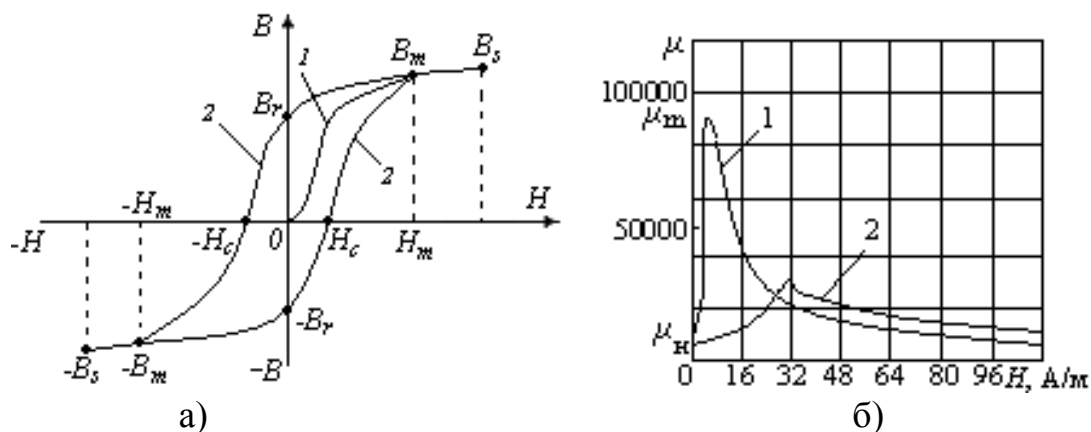


Рисунок 9.1

Магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля (см. рисунок 9.1, б). Кривая 1 на этом рисунке относится к пермаллою, а кривая 2 – для чистого железа. Различают начальную магнитную проницаемость μ_n и максимальную μ_m . Начальную магнитную проницаемость измеряют при напряженности магнитного поля, близкой к нулю. Большие значения μ_n и μ_m показывают, что данный магнитный 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.

Типичная зависимость магнитной проницаемости от температуры показана на рисунке 9.2. Температура, при которой магнитная проницаемость резко снижается почти до нуля, называется точкой Кюри (T_K). При температурах выше 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.

Если образец магнитного материала намагничивать, непрерывно повышая напряженность магнитного поля H , магнитная индукция B тоже будет монотонно 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.

Остаточная магнитная индукция B_r наблюдается в ферромагнитном материале при его размагничивании, когда напряженность магнитного поля равна нулю. Для размагничивания образца 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.

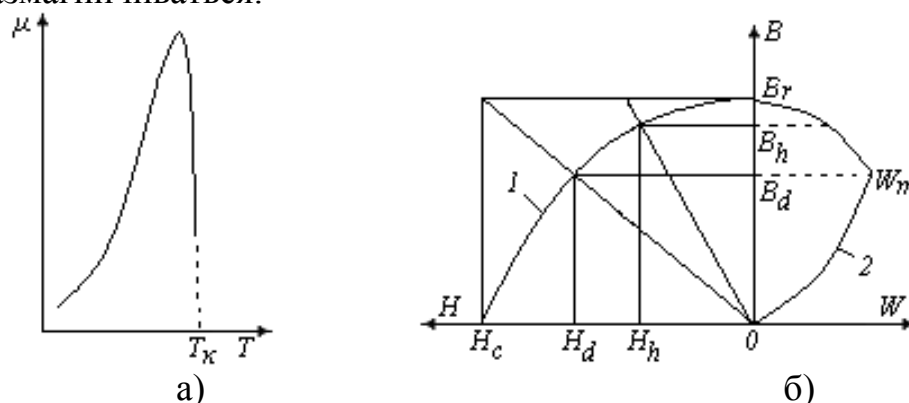


Рисунок 9.2

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 об-

разуется замкнутая петля, которую называют предельной (или статической) петлей гистерезиса.

Удельные потери энергии на гистерезис P_H – это потери, затрачиваемые на перемагничивание единицы массы материала за один цикл. Удельные потери на гистерезис измеряют в ваттах на килограмм (Вт/кг) магнитного материала. Их величина зависит от частоты перемагничивания и значения магнитной индукции B_m . Удельные потери на гистерезис определяется площадью петли гистерезиса.

Потери энергии на вихревые токи P_B зависят от удельного электрического сопротивления ρ магнитного материала. Чем больше ρ , тем меньше потери на вихревые токи. Потери энергии на вихревые токи зависят от 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_B (Вт/кг) подсчитывают по формуле

$$P_B = (164 \cdot h^2 B_m^2 f^2) / d\rho,$$

где h – толщина листа, м;

B_m – амплитуда магнитной индукции, Тл;

f – частота, Гц;

d – плотность материала кг/м³, ρ – удельное сопротивление, Ом·м.

Для оценки формы гистерезисной петли пользуются коэффициентом прямоугольности гистерезисной петли K_H – характеристикой, вычисляемой по предельной петле гистерезиса: $K_H = B_r / B_m$. Чем больше K_H , тем ближе форма петли гистерезиса к форме прямоугольника, тем больше остаточная намагниченность. Большое значение $K_H = 0,7 \div 0,9$ имеют постоянные магниты.

Удельная объемная энергия W_M (Дж/м³) – характеристика, применяемая для оценки свойств магнитно-твердых материалов, – выражается формулой

$$W_M = (B_d H_d / 2),$$

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 рисунке 9.2, б. 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 . Это наибольшая энергия, создаваемая постоянным магнитом в воздушном зазоре между его полюсами, отнесенная к единице объема магнита. Чем больше значение W_M , тем лучше магнитотвердый материал и, следовательно, лучше изготовленный из него магнит.

9.2 Классификация магнитных материалов

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

Магнито-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 соответствуют узкие гистерезисные петли (рисунок 9.3-а,б).

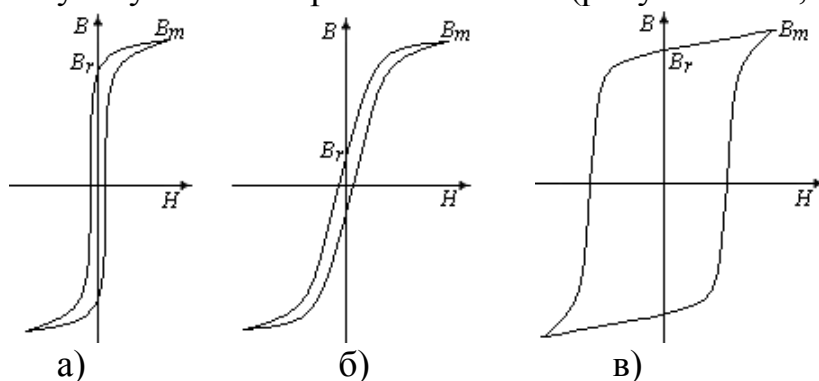


Рисунок 9.3

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

Магнито-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 (см. рисунок 9.3, в), т.е. они с большим трудом намагничиваются. Будучи намагничеными, магнито-твердые материалы могут долго сохранять магнитную энергию, т.е. служить источником постоянного магнитного поля, поэтому их применяют главным образом для изготовления различных видов постоянных магнитов.

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 материалов. Магнитодиэлектрики представляют собой композиционные материалы, состоящие из 60 – 80% порошкообразного материала и 40 – 20% диэлектрика.

10 Лекция №10. Металлические магнитно-мягкие и магнитно-твердые материалы

Цели лекции:

- изучение магнитно-мягких материалов;
- изучение магнитно-твердых материалов.

Содержание лекции:

- назначение и характеристики магнитно-мягких материалов;
- назначение и характеристики магнитно-твердых материалов.

10.1 Металлические магнитно-мягкие материалы

Основными металлическими магнитно-мягкими материалами, применяемыми в РЭА, являются карбонильное железо, пермаллой, альсиферы и низкоуглеродистые кремнистые стали.

Карбонильное железо – это тонкодисперсный порошок, состоящий из частиц $\varnothing 1 - 8$ мкм. Карбонильное железо получают термическим разложением пентакарбонила железа $\text{Fe}(\text{CO})_5$ – соединения оксида углерода с железом. Карбонильное железо обладает высокими магнитными характеристиками: $\mu_n = 2500 \div 3000$; $\mu_m = 20000 \div 21000$; $H_C = 4,5 \div 6,2$ А/м.

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

Пермаллой – пластичные железоникелевые сплавы с содержанием никеля 45 – 80% – обладают высокой пластичностью, поэтому легко прокатываются в тонкие листы и ленты толщиной до 1 мкм.

Все пермаллои отличаются высокими магнитными характеристиками (см. таблицы 10.1 и 10.2), которые обеспечиваются не только их составом и химической чистотой сплава, но также специальной термической обработкой.

Из таблиц 10.1 и 10.2 следует, что наибольшим удельным электрическим сопротивлением, а следовательно, малыми потерями на вихревые токи и лучшими магнитными характеристиками обладают легированные пермаллои, поэтому их применяют в ВЧ узлах РЭА.

Все виды пермаллоев чувствительны к механическим деформациям материала – наклепу при резке, штамповке и другим механическим воздействиям. Поэтому изделия из пермаллоя, полученные такими способами, подвергают дополнительной термической обработке – отжигу в вакууме и охлаждению со скоростью, установленной для пермаллоя данного состава.

Пермаллои поставляют в виде лент толщиной 0,002 – 0,5 мм, листов толщиной 1 – 2 мм и прутков $\varnothing 5 - 50$ мм. Низконикелевые пермаллои применяют для изготовления сердечников дросселей, малогабаритных трансформаторов. Легированные низконикелевые и высоконикелевые пермаллои применяют для деталей аппаратуры, работающих на частотах до 1 – 5 м. В магнитных усилителях применяют пермаллои (50НП, 79НМ, НМ), обладающие прямоуголь-

ной гистерезисной петлей, мало зависящей от температуры. Магнитные характеристики пермаллоев стабильны в интервале температур от -60 до +60°C.

Таблица 10.1 - Основные характеристики нелегированных пермаллоев

Содержание никеля, %	Начальная магнитная проницаемость	Максимальная магнитная проницаемость	Коэрцитивная сила, А/м	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м
78,5	7000 – 14000	130000–270000	2 – 3	0,25
66	3000 – 3700	120000–200000	3 – 5	0,33
50	2000 – 3000	50000 – 70000	6 – 10	0,45

Таблица 10.2 - Основные характеристики легированных пермаллоев

Содержание никеля, %	Содержание легирующих элементов, %	Начальная магнитная проницаемость	Максимальная магнитная проницаемость	Коэрцитивная сила, А/м	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м
78,5	3,8 Мо	30000	250000	2	0,55
66	2 Мо	4000	120000	0,7	0,48
50	4 Cr	3000	30000	3	0,95

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

$$\mu_n = 6000 \div 7000;$$

$$\mu_m = 30000 \div 35000;$$

$$H_C = 2,2 \text{ А/м}, \quad \rho = 0,8 \text{ мкОм} \cdot \text{м}.$$

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. Для изготовления магнитных головок применяют стойкий к истиранию сплав 16ЮХ на основе 16% алюминия, 2,5% хрома и остальное железо. Магнитные характеристики этого сплава:

$$\mu_n = 15000;$$

$$\mu_m = 140000;$$

$$\rho = 1,5 \text{ мкОм} \cdot \text{м}.$$

Низкоуглеродистые кремнистые стали представляют собой сплавы железа с 0,8 – 4,8% кремния. Кремний способствует росту кристаллов железа, а также вызывает распад цементита Fe₃C, что повышает магнитные характеристики стали. 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. Введение большого количества кремния в сталь улучшает ее магнитные характеристики, но повышает хрупкость, которая затрудняет изготовление из стали штампованных деталей. Кремнезем повышает удельное электрическое сопротивление стали и снижает потери на вихревые токи. Основные характеристики кремнистых высоколегированных сталей приведены в таблице 10.3.

Таблица 10.3

Содержание кремния в Стали, %	Характер прокатки стали	Начальная магнитная проницаемость	Максимальная магнитная проницаемость	Коэрцитивная сила, А/м
4,0	Горячекатаная	300 – 400	6000 – 8000	31 – 33
3,8	Холоднокатаная	600 – 900	2000 – 3500	9,5 – 14

Сравнивая магнитные характеристики кремнистых сталей с магнитными характеристиками пермаллоев, можно заметить огромные преимущества последних. Поэтому стали применяют в менее ответственных узлах аппаратуры, где не требуется большая магнитная проницаемость и можно допустить некоторые потери энергии.

10.2 Металлические магнитно-твердые материалы

Магнитно-твердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов, используемых в радиоаппаратуре. Основное требование к постоянным магнитам заключается в том, что они должны создавать в воздушном зазоре между своими полюсами магнитное поле с постоянными 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 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.

В качестве мартенситных сталей применяют хромистые, вольфрамовые и кобальтовые (в соответствии с легирующими элементами). Постоянные магниты изготавливают из стальных пруткови полос мартенситных сталей горячей ковкой или штамповкой. После механической обработки их закачивают на мартенсит, а затем намагничивают. Для стабилизации магнитных характеристик все магниты подвергают искусственному старению – многочасовой выдержке в кипящей воде.

Основные магнитные характеристики стальных магнитов следующие:

хромистых

$$B_r = 0,90 \text{ Тл};$$

$$H_C = 4600 \text{ А/м}; W_m = 2,4 \text{ кДж /м}^3;$$

вольфрамовых

$$B_r = 1 \text{ Тл};$$

$$H_C = 5000 \text{ А/м};$$

$$W_m = 5,5 \text{ кДж /м}^3;$$

кобальтовых

$$B_r = 0,95 \div 1,1 \text{ Тл};$$

$$H_C = 8000 \div 13600 \text{ А/м};$$

$$W_m = 11,0 \text{ кДж /м}^3.$$

Лучшими являются кобальтовые стали, но они значительно дороже хромистых и вольфрамовых. Применение металлических магнитно-твердых материалов ограничено из-за относительно невысоких магнитных характеристик.

Магнитно-твердые сплавы на основе железа – алюминия – никеля, обладают более высокими магнитными характеристиками. Эти сплавы легируют кобальтом, медью, титаном и ниобием, например ЮНД12, ЮНДК15, ЮНДК18, ЮН13ДК14 и др. Буквы в марках сплавов обозначают: Ю – алюминий, Н – никель, Д – медь, К – кобальт, Б – ниобий, Т – титан. Цифры, стоящие за буквой, показывают содержание данного компонента сплава в процентах (по массе). Магниты из этих сплавов получают только методом литья и имеют высокие магнитные характеристики:

$$B_r = 0,5 \div 1,4 \text{ Тл};$$

$$H_C = (42 \div 145)10^3 \text{ А/м};$$

$$W_m = 14 \div 32 \text{ кДж /м}^3.$$

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 их хрупкости.

Металлокерамические магнитно-твердые материалы изготавливают из металлических порошков: железо – никель – алюминий; железо – никель – алюминий – кобальт. Из порошкообразной исходной массы магниты прессуют при давлении 1,0 – 1,5 МПа. Отпрессованные магниты спекают при 1100 – 1300°C, спеченные магниты закаливают, а затем производят отпуск, охлаждая их с заданной скоростью, после чего подвергают термомагнитной обработке под действием внешнего магнитного поля.

Достоинствами металлокерамических магнитов являются чистота их поверхности, не требующая дополнительной обработки, и точность заданных размеров. Магниты из металлокерамических материалов можно обрабатывать только шлифованием.

11 Лекция №11. Ферриты и магнитодиэлектрики

Цели лекции:

- изучение ферритов;
- изучение магнитодиэлектриков.

Содержание лекции:

- назначение и характеристики ферритов;
- назначение и характеристики магнитодиэлектриков.

11.1 Назначение и характеристики ферритов

Ферриты представляют собой соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов ZnO ; NiO и др. Ферриты изготовляют из порошкообразной смеси оксидов этих металлов. Отпрессованные ферритовые изделия подвергают спеканию при высоких температурах. Название феррита определяется названием двухвалентного или (реже) одновалентного металла, оксид которого входит в состав феррита. Так, если в состав феррита входит оксид цинка, то феррит называется ферритом цинка, если оксид никеля – ферритом никеля и т.д.

Ферриты изготовляют по технологии производства керамики, т.е. исходные порошкообразные оксиды металлов измельчают в мельницах. Из этой смеси тонкомолотых порошков прессуют брикеты, которые подвергают первоначальному обжигу в печи. Спекшиеся брикеты размалывают и в полученный тонкодисперсный порошок вводят какой-либо пластификатор, например, раствор поливинилового спирта. Из полученной массы прессуют ферритовые изделия (сердечники, кольца, горшки), которые обжигают при $1000 - 1400^\circ C$. Полученные твердые хрупкие изделия (преимущественно черного цвета) можно обрабатывать только шлифованием.

Наиболее широко применяют в РЭА смешанные магнито-мягкие ферриты: никель-цинковые, марганец-цинковые, литий-цинковые. Условные обозначения ферритов: НН – никель-цинковые, НМ – марганец-цинковые, ВЧ – литий-цинковые высокочастотные, СЧ – сверхвысокочастотные, ВТ – с прямоугольной гистерезисной петлей. Цифры, стоящие впереди буквенных обозначений, указывают среднее значение начальной магнитной проницаемости. В марках СВЧ-ферритов эти цифры обозначают среднюю длину волны (см), в марках ферритов с прямоугольной гистерезисной петлей – коэрцитивную силу (А/м). Например: 4000НМ – марганец-цинковый феррит с начальной магнитной проницаемостью, равной 4000; 150ВЧ – высокочастотный феррит с начальной магнитной проницаемостью 150.

Магнитные характеристики широко применяемых магнито-мягких ферритов приведены в таблице 11.1. Дополнительными характеристиками ферритов являются: плотность $3800 - 5000 \text{ кг/м}^3$; $KTR = (5 \div 12)10^{-6} \text{ 1/}^\circ C$; пористость $1 - 15\%$.

Таблица 11.1

Марка феррита	Начальная магнитная проницаемость	Коэрцитивная сила, А/м	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Граничная частота, МГц	Температура Кюри, °С
6000НМ	6000	12	0,1	0,01	130
4000НМ	4000	16	0,5	0,7	130
3000НМ	3000	24	0,5	0,8	140
2000НМ	2000	20	0,5	1,5	200
1000НМ	1000	80	0,5	1,6	200
1000НН	1000	32	20	0,4	110
600НН	600	56	10^2	1,2	110
400НН	400	80	10^3	2,0	120
200НН	200	160	10^3	3,0	120
150ВЧ	150	640	10^6	25	400
100ВЧ	100	720	10^4	35	400
50ВЧ2	50	800	10^6	70	450
10ВЧ1	10	560	10^8	250	500

Ферриты по сравнению с металлическими магнитно-мягкими материалами обладают малой индукцией насыщения, поэтому в сильных полях их применять не рационально. Имеются ферриты, например, НМС, которые обладают большой индукцией насыщения. Чем меньше начальная магнитная проницаемость феррита, тем в более широком диапазоне частот он может быть использован.

Таблица 11.2

Марка феррита	Остаточная магнитная индукция, Тл	Коэрцитивная сила, кА/м	Максимальная магнитная энергия, кДж/м ³	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Температура Кюри, °С
6БИ240	0,19	240	6	$10^3 - 10^3$	450
7И300	0,20	300	7	$10^3 - 10^3$	450
16БА190	0,30	190	16	$10^3 - 10^3$	450
15БА300	0,30	300	15	$10^3 - 10^3$	450
17БА220	0,33	220	18	$10^3 - 10^3$	450
22БА220	0,36	220	22	$10^3 - 10^3$	450
24БА210	0,37	210	24	$10^3 - 10^3$	450
25БА150	0,38	150	25	$10^3 - 10^3$	450
28БА170	0,38	170	25	$10^3 - 10^3$	450
28БА190	0,39	1900	28	$10^3 - 10^3$	450

Достоинствами ферритов являются стабильность магнитных характеристик в широком диапазоне частот, малые потери на вихревые токи, малый коэффициент затухания электромагнитной волны, а также простота изготовления ферритовых деталей. Как все магнитные материалы, ферриты сохраняют свои магнитные свойства только до точки Кюри T_K . У различных по составу ферритов значения T_K колеблются в широких пределах: от 70 до 500°C. В радиоаппаратуре СВЧ металлические магнитные материалы и низкочастотные ферриты (никель-цинковый и др.) не могут применяться из-за малого удельного электрического сопротивления, которое приводит к большим потерям на вихревые токи.

В технике СВЧ применяют поликристаллические и монокристаллические ферриты. К поликристаллическим относятся литиевый (10СЧ9), магниевые, никелевые и другие ферриты. Эта группа ферритов обладает большим удельным электрическим сопротивлением ($10^8 - 10^{10}$ Ом·м) и стабильностью магнитных характеристик в диапазоне СВЧ.

Для изготовления постоянных магнитов используют магнитно-твердые ферриты, наибольшее применение из которых получили ферриты бария $BaO \cdot 6Fe_2O_3$. В отличие от магнитно-мягких бариевые ферриты отличаются хорошей стабильностью своих характеристик, но чувствительны к резкому изменению температуры.

Недостатками всех ферритов являются хрупкость, а также резко выраженная зависимость магнитных свойств от температуры и механических воздействий. Ферриты являются магнитными полупроводниками и, следовательно с ростом температуры их удельное сопротивление уменьшается, что вызывает увеличение потерь на вихревые токи. Широко применяемые бариевые ферриты приведены в таблице 5.5.

11.2 Назначение и характеристики магнитодиэлектриков

Магнитодиэлектрики представляют собой композиционные материалы, состоящие из мелкодисперсных частиц магнитно-мягкого материала, соединенных друг с другом каким-либо органическим или неорганическим диэлектриком. В качестве мелкодисперсных магнитно-мягких материалов применяют карбонильное железо, альсифер и некоторые сорта пермаллоев, измельченных до порошкообразного состояния. В качестве диэлектриков применяют эпоксидные и бакелитовые смолы, полистирол, жидкое стекло.

Назначение диэлектрика состоит не только в том, чтобы соединить частицы магнитного материала друг с другом, но и создать между ними электроизоляционные прослойки и тем самым повысить удельное электрическое сопротивление магнитодиэлектрика. Это резко снижает потери на вихревые токи и создает возможность использования магнитодиэлектриков на высоких частотах (от 10 до 100 МГц в зависимости от состава магнитодиэлектрика). Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа и полистирола могут

работать на более высоких частотах по сравнению с магнитодиэлектриками на основе альсифера и бакелитовых смол.

Интервал рабочих температур карбонильных магнитодиэлектриков – от -60 до +100°C, а из альсифера – от -60 до +120°C.

Несмотря на несколько пониженные магнитные характеристики, чем у ферритов, магнитодиэлектрики применяют для изготовления сердечников высокочастотных узлов радиоаппаратуры. Это обусловлено большой стабильностью магнитных характеристик магнитодиэлектриков по сравнению с ферритами и возможностью изготовления из них сердечников сложной формы. Магнитодиэлектрические изделия получают горячим прессованием или литьем под давлением. Производство изделий из магнитодиэлектриков значительно проще, чем из ферритов, так как они не нуждаются в высокотемпературной тепловой обработке. Кроме того, изделия из магнитодиэлектриков отличаются более высокой чистотой поверхности и точностью размеров.

Наиболее высокими магнитными характеристиками обладают магнитодиэлектрики, наполнителем в которых служит молибденовый пермаллой или карбонильное железо. Чем выше давление при прессовании магнитодиэлектрических деталей, тем выше их магнитная проницаемость. Эти давления колеблются в пределах $(14 \div 20) \cdot 10^2$ МПа в зависимости от формы и сложности прессуемого изделия. Удельное электрическое сопротивление магнитодиэлектриков $10^4 - 10^6$ Ом·м.

12 Лекция №12. Полупроводниковые материалы

Цели лекции:

- изучение характеристик полупроводниковых материалов;
- изучение примесных полупроводников.

Содержание лекции:

- назначение и характеристики полупроводниковых материалов;
- примесные полупроводники.

12.1 Полупроводниковые материалы

Из большого количества полупроводниковых материалов неорганического и органического происхождения монокристаллической и поликристаллической структуры в радиоэлектронике применяют главным образом германий, кремний, селен, карбид кремния и арсенид галлия.

Германий Ge – элемент 4-й группы Периодической системы. В очищенном полупроводниковом материале примеси должны составлять не более 10^{-9} (% по массе) у германия и не более 10^{-11} (% по массе) у кремния.

Германий широко применяют для изготовления диодов, фотоэлементов и других полупроводниковых приборов.

Кремний Si является также элементом 4-й группы. Он широко распространен в природе в виде кремнезема SiO_2 , который служит одним из исходных веществ для получения технических сортов кремния.

Кремний применяют более широко, чем германий, так как верхний предел рабочей температуры полупроводниковых приборов на основе кремния $130 - 200^\circ\text{C}$, а на основе германия $80 - 100^\circ\text{C}$. Кремний применяют в качестве основания в интегральных полупроводниковых схемах.

Селен Se – элемент 6-й группы периодической системы. Селен применяют для изготовления фотоэлементов и фоторезисторов.

Карбид кремния SiC представляют собой материал с ярко выраженной нелинейной зависимостью между током и напряжением.

Основной областью применения наиболее чистых сортов карбида кремния является производство варисторов, обладающих нелинейной симметричной вольт-амперной характеристикой и могущих работать в интервале температур от -50 до $+80^\circ\text{C}$. Кроме этого, из поликристаллического карбида кремния изготавливают диоды и транзисторы на рабочие температуры до 500°C , а также светодиоды.

Арсенид галлия GaAs представляет собой соединение мышьяка и галлия и является монокристаллическим полупроводником. Характерными особенностями арсенида галлия являются большая подвижность электронов и дырок. Это позволяет создавать на основе арсенида галлия приборы, которые могут работать в области высоких частот и повышенных температур. Для *p-n*-переходов могут быть допущены рабочие температуры до $300 - 400^\circ\text{C}$, т.е. значительно выше, чем в приборах на основе германия и кремния.

Аморфные полупроводники. В отличие от рассмотренных полупроводниковых материалов кристаллической структуры аморфные полупроводники представляют собой специальные стекла.

Простая технология получения халькогенидных стеклообразных полупроводников, легкость управления их электрическими свойствами обеспечивают им широкое применение в РЭА.

Полупроводники по электропроводности занимают промежуточное место между металлическими проводниками и диэлектриками.

Кристаллическая решетка кремния и германия имеет объемную структуру, но ради наглядности ее можно изобразить плоской, как это сделано на рисунке 12.1. Большими кружочками показаны ионы кремния или германия. Ядра атомов вместе с электронами во внутренних оболочках обладают положительным зарядом $+4$, который уравнивается отрицательными зарядами четырех электронов на внешней оболочке. Внешние электроны показаны маленькими кружочками. Вместе с электронами соседних атомов они образуют ковалентные связи, показанные линиями на кристаллической решетке.

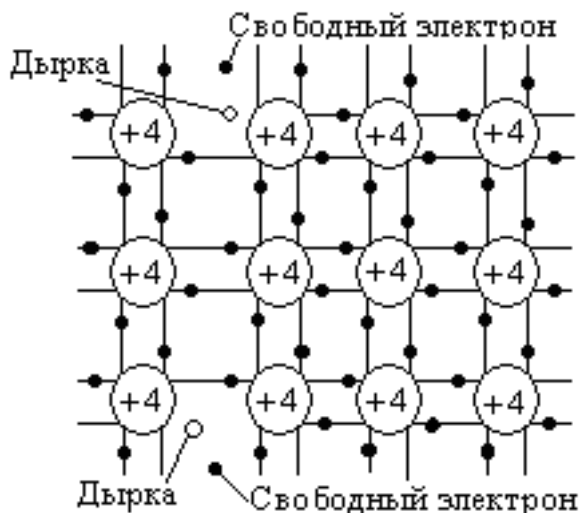


Рисунок 12.1

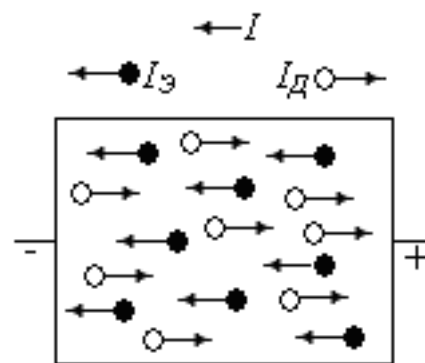


Рисунок 12.2

Чем выше температура полупроводника, тем больше в нем свободных электронов, а следовательно, и ток в полупроводнике. В результате в полупроводнике возникает электронная электропроводность n -типа, такую электропроводность называют собственной. Атомы полупроводника, потерявшие электроны, превращаются в положительно заряженные ионы, которые закреплены на своих местах и не могут перемещаться. Место на внешней орбите атома, покинутое электроном, называется дыркой, которую может занять другой электрон, покинувший свое место в соседнем атоме. В результате такого перескока электрона у соседнего атома тоже появится дырка (см. рисунок 12.1).

Если к полупроводнику приложить электрическое напряжение, электроны будут перемещаться с одних атомов на другие в одном направлении, а дырки – в противоположном. Электропроводность, обусловленная дырочным током, называется дырочной или электропроводностью p -типа.

Таким образом, перемещение электронов и дырок определяет собственную электропроводность полупроводника, поскольку носители тока (электроны и дырки) принадлежат собственным атомам полупроводника. В этом случае общий ток I складывается из электронного $I_Э$ и дырочного $I_Д$ токов, т.е. $I = I_Э + I_Д$ (см. рисунок 12.2). В случае собственной электропроводности полупроводника количество электронов $N_Э$ и дырок $N_Д$ равно. Но $N_Э > N_Д$, так как подвижность электрона больше подвижности дырки. Подвижность носителя тока есть отношение скорости перемещения электрона $v_Э$ или скорости перемещения дырки $v_Д$ к напряженности электрического поля E в полупроводнике. Тогда подвижность электрона $\mu_Э = v_Э / E$; подвижность дырки $\mu_Д = v_Д / E$. Таким образом, подвижность показывает, какой путь проходит электрон или дырка при $E = 1$ В/см за 1 с. Подвижность электронов в кремнии и германии в два раза выше, чем подвижность дырок, поэтому проводимость носит в основном электронный характер. Учитывая изложенное, можно написать выражение для электронного и дырочного токов:

$$I_Э = N_Э e v_Э = N_Э e \mu_Э E;$$

$$I_D = N_D e v_D = N_D e \mu_D E,$$

где e – заряд электрона или дырки.

Тогда общий ток в полупроводнике

$$I = I_{\text{Э}} + I_D \quad \text{или} \quad I = N_{\text{Э}} e \mu_{\text{Э}} E + N_D e \mu_D E.$$

В случае собственной электропроводности полупроводника число электронов равно числу дырок, т.е. $N = N_{\text{Э}} + N_D$, тогда

$$I = N_{\text{Э}} e (\mu_{\text{Э}} + \mu_D) E.$$

При температуре абсолютного нуля (-273°C) электроны не обладают подвижностью, поэтому полупроводники становятся диэлектриками.

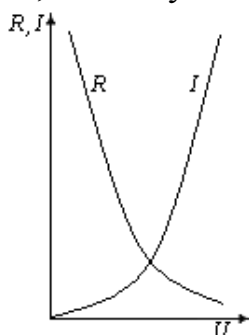


Рисунок 12.3

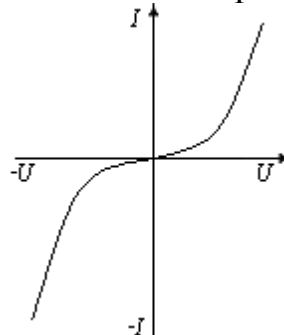


Рисунок 12.4

Характерным свойством полупроводников является нелинейность зависимости тока в полупроводнике от приложенного напряжения, (см. рисунок 12.3), т.е. ток I растет значительно быстрее, чем напряжение U .

При изменении напряжения с $+U$ на $-U$ ток в полупроводнике пойдет в обратном направлении и будет изменяться по такому же закону (см. рисунок 12.4), это значит, что полупроводник имеет симметричную вольтамперную характеристику

12.2 Примесные полупроводники

Полупроводник, который не имеет посторонних примесей, называется *собственным полупроводником*. В полупроводниковых приборах широко применяются полупроводниковые материалы с электропроводностью n -типа или p -типа. В тщательно очищенный полупроводник с содержанием примесей $10^{-9} - 10^{-11}$ (% по массе) вносят соответствующую легирующую примесь. Легирующие примеси, атомы которой снабжают полупроводник свободными электронами, называются донорными. В качестве донорных примесей используются элементы 5-й группы периодической системы такие, как фосфор P , мышьяк As и сурьма Sb , состоящие из пятивалентных атомов. Четыре электрона каждого из атомов введенной примеси устанавливают четыре ковалентные (парные) связи с соответствующими атомами основного полупроводника, пятый электрон остается без такой связи (см. рисунок 12.5).

Основными носителями тока являются электроны, обуславливающие примесную электропроводность n -типа. Общий ток в полупроводнике равен

сумме электронного и дырочного токов, но электронный ток во много раз больше дырочного.

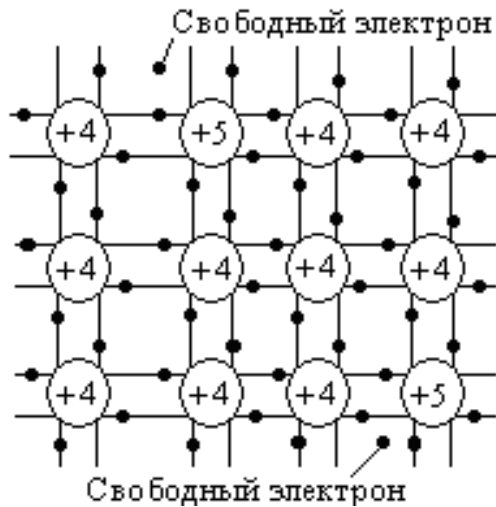


Рисунок 12.5

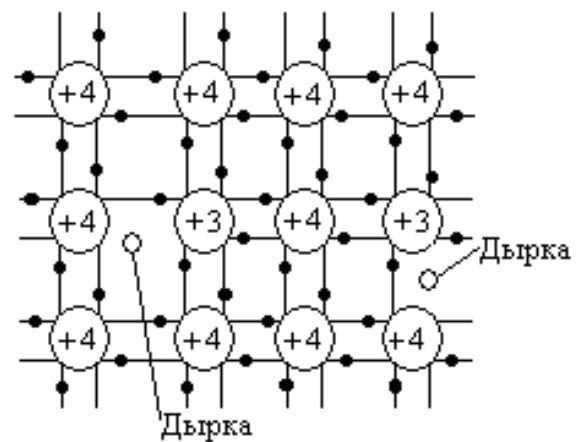


Рисунок 12.6

В качестве акцепторных примесей применяются элементы 3-й группы: бор, галлий и индий. Каждый из атомов примеси установит три ковалентные связи с соответствующими атомами полупроводника: кремния или германия. Но так как у атома примеси всего три валентных электрона, он может установить связи только с тремя ближайшими атомами полупроводника. Для связи с четвертым атомом полупроводника у атома примеси нет электрона. Таким образом, у нескольких атомов полупроводника будет по одному электрону без ковалентной связи. Достаточно теперь небольших внешних энергетических воздействий, чтобы эти электроны покинули свои места, образовав дырки у атомов полупроводника (см. рисунок 12.6).

Образовавшаяся положительно заряженная дырка будет переходить от одного атома полупроводника к другому, от него к следующему и т.д. Под действием приложенного напряжения это движение дырок упорядочится, т.е. в полупроводнике возникнет примесный дырочный ток основных носителей, в результате которого образуется электропроводность p -типа.

В полупроводнике с примесной электропроводностью p -типа будет еще небольшое количество свободных электронов – неосновных носителей, следовательно, будет еще собственная электропроводность. Общий ток в полупроводнике по-прежнему будет равен сумме электронного и дырочного токов, из которых дырочный будет значительно больше электронного.

Концентрация основных носителей в легированном полупроводнике практически не зависит от температуры. Что касается концентрации неосновных носителей, то она сильно зависит от температуры. Неосновные носители играют важную, но вредную роль в работе полупроводниковых приборов.

Список литературы

1. Электротехнические и конструкционные материалы: Учеб. пособие под ред. В.А. Филикова – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 280 с.
2. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Учеб. пособие – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.
3. Никулин Н.В., Назаров А.С. Радиоматериалы и радиокомпоненты: Учеб. пособие – М.: Высшая школа, 1986, - 208 с.
4. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами: пер. с англ. – М.: Мир, 1990 – 238 с.

Содержание

1 Лекция №1. Назначение, основные свойства и электрические характеристики радиоматериалов	4
2 Лекция №2. Потери энергии в диэлектриках, механические, тепловые и физико-химические характеристики материалов	7
3 Лекция №3. Электрические процессы в диэлектриках, поляризация, электропроводность и пробой диэлектриков	13
4 Лекция №4. Виды твердых диэлектриков, полимеризационные и поликонденсационные диэлектрики	18
5 Лекция №5. Пластмассы, лаки и компаунды	25
6 Лекция №6. Радиокерамические материалы, стекла и ситаллы	30
7 Лекция №7. Пьезокерамические материалы и электреты	35
8 Лекция №8. Проводниковые материалы и провода	38
9 Лекция №9. Характеристики магнитных материалов	43
10 Лекция №10. Металлические магнитно-мягкие и магнитно-твердые материалы	48
11 Лекция №11. Ферриты и магнитодиэлектрики	52
12 Лекция №12. Полупроводниковые материалы	55
Список литературы	60

Булат Баймуханович Ордабаев
Ерлан Онланович Елеукулов

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Конспект лекций для студентов специальности
5В071600 - Приборостроение

Редактор Т.С.Курманбаева
Специалист по стандартизации Н.К.Молдабекова

Подписано в печать __ «__» __
Тираж 75 экз.
Объем 3,8 уч.- изд. л.

Формат 60x84 1/16
Бумага типографская №1
Заказ _____ Цена 1900 тг

Копировально-множительное бюро
Некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
050013, Алматы, ул.Байтурсынова, 126