

Л.Ю. Солдатова

**МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

Содержание

1. Общие указания по решению задач	3
2. Проводниковые материалы и резисторы	4
3. Диэлектрические материалы и конденсаторы	9
4. Магнитные материалы и катушки индуктивности	14
Список литературы	16

1. Общие указания по решению задач

Прежде чем решать задачу, надо вспомнить физические процессы, законы и соотношения, относящиеся к данному вопросу. Обратите внимание на размерности заданных величин. При необходимости надо перевести размерности в одну систему единиц. Все аналитические решения следует проводить по общеизвестным правилам. Рекомендуется решать задачи в общем виде. Сначала записать исходные формулы, сделать при необходимости соответствующие преобразования, получить конечные формулы, а затем подставить в эти формулы числовые значения и вычислить результат. При выполнении вычислений рекомендуется сначала сократить порядки, а затем производить выполнение арифметических действий со значащими цифрами. Если решение задачи в общем виде связано с громоздкими выражениями, то можно производить решение по шагам. Ход всех преобразований должен быть объяснен. Вычисления, как правило, достаточно делать с точностью до второго знака после запятой, нет смысла производить вычисления с точностью до третьего знака, так как исходные данные обычно бывают заданы с меньшей точностью.

Для выполнения заданий студенту на практических занятиях необходимо иметь при себе тетрадь для практических занятий, ручку, конспект лекций или учебник по курсу, микрокалькулятор или другое устройство, с помощью которого можно проводить вычисления.

2. Проводниковые материалы и резисторы.

ТЕМА «Электропроводность металлов».

В общем случае величина сопротивления проводника R определяется формулой

$$R = \rho \frac{l}{S}, \text{ Ом}$$

где ρ – удельное сопротивление проводника,

l - длина проводника,

S - площадь проводника.

Плотность тока в проводнике можно определить по формуле

$$j = q_{\text{эл}} \cdot n \cdot v_{\text{др}},$$

где $q_{\text{эл}} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

n - концентрация электронов;

$v_{\text{др}}$ – дрейфовая скорость электронов.

Плотность тока в проводнике можно также определить по формуле

$$j = \gamma \cdot E,$$

где E – напряженность электрического поля;

γ – удельная электрическая проводимость ($\gamma = 1/\rho$), которую можно определить по формуле

$$\gamma = \frac{e^2 \cdot n \cdot l_{\text{cp}}}{m \cdot u_{\text{cp}}},$$

где l_{cp} – средняя длина пробега электрона,

$m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона,

u_{cp} – средняя тепловая скорость электрона, которую можно определить из формулы

$$\frac{m \cdot u_{\text{cp}}^2}{2} = \frac{3}{2} k \cdot T,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана,

T – температура.

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [1, с.28-34], [2с.12-13], [3, с.4-11], [6, с.22-27].

Задачи

1. Определить сопротивление провода из алюминия длиной 500 метров и диаметром 2 мм, если $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$.
2. Определить сопротивление провода из алюминия диаметром 4 мм, если его масса 0,54 кг, $\rho_{\text{Al}} = 0,027 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, плотность $2,7 \text{ Мг/м}^3$.
3. Медная проволока массой 103 кг имеет сопротивление 20 Ом. Определить диаметр и длину проволоки, если $\rho_{\text{Cu}} = 0,017 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.
4. У медного и алюминиевого проводов одинаковые сечения и сопротивления. Определить отношения длин и масс этих проводов ($l_{\text{Cu}}/l_{\text{Al}}$, $m_{\text{Cu}}/m_{\text{Al}}$). Для алюминия $\rho_{\text{Al}} = 0,027 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, плотность $2,7 \text{ Мг/м}^3$, для меди $\rho_{\text{Cu}} = 0,027 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, плотность $8,93 \text{ Мг/м}^3$.
5. Найти среднюю скорость упорядоченного движения электронов в проводнике сечением 2 мм^2 , по которому течет ток 5 А. В 1 м^3 проводника содержится 10^{29} электронов проводимости, $q_{\text{эл}} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.
6. Определить среднюю скорость дрейфа в медном проводнике диаметром 1 мм и сопротивлением 3 Ом при напряжении 2,5 В. Концентрация электронов 10^{29} м^{-3} .
7. Определить скорость дрейфа электронов в меди при температуре 20°C и напряженности электрического поля $0,02 \text{ В/м}$. $n = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, $\rho_{\text{Cu}} = 0,027 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.
8. При температуре 300 К и плотности тока 2 А/мм^2 определить тепловую и дрейфовую скорости электронов в медном проводнике. ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К,

$$m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}, n = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

9. При напряжении 0,12 В по проводнику длиной 63 м и диаметром 1 мм течет ток 3А. Определить удельное сопротивление материала.
10. Определить диаметр провода из меди, если при падении напряжения 20 В на расстоянии 16 км ток равен 2,1 А. $\rho_{\text{Cu}} = 0,017 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.
11. Какое напряжение приложено к реостату из нихромовой проволоки длиной 8 м, если плотность тока равна 6 А/мм^2 . $\rho_{\text{NiCr}} = 1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.
12. Какой длины должна быть лента из манганина шириной 1,5 см толщиной 2 мм, чтобы ее сопротивление было 0,7 Ом? $\rho_{\text{манганина}} = 0,45 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.
13. Определить время, в течение которого электрон пройдет расстояние 200 м по медному проводу, если $\rho_{\text{Cu}} = 0,017 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, $n = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, постоянное напряжение на концах провода 10 В.

ТЕМА «Факторы, влияющие на удельное сопротивление металлов (температура)»

Влияние температуры на удельное сопротивление металлов можно учесть с помощью температурного коэффициента сопротивления ТК ρ

$$TK\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}$$

На практике чаще пользуются формулой

$$TK\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 \cdot (T_2 - T_1)}$$

В общем случае температурный коэффициент сопротивления провода определяется по формуле

$$TKR = TK\rho - TKl,$$

где ТК l – температурный коэффициент линейного расширения

$$TKl = \frac{l_2 - l_1}{l_1 \cdot (T_2 - T_1)},$$

Но для чистых металлов ТК $l \ll$ ТК ρ , поэтому для них можно приближенно считать

$$TKR = TK\rho/$$

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [1, с.35-39], [2, с.12-13], [3, (2.12, 2.14, 2.34, 2.41, 2.42, 2.43, 2.45-2.51)]

14. Удельное сопротивление алюминия при 20°C равно $2,7 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{мм} \cdot \text{м}^{-1}$, температурный коэффициент удельного сопротивления $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Найти сопротивление этого провода длиной 300 м и сечением 2 мм^2 при $T = 80^\circ\text{C}$.
15. Сопротивление электрической лампочки мощностью 100 Вт (напряжение 220 В) в накаливаем состоянии больше, чем в холодном в 10 раз. Найти ее сопротивление в холодном состоянии и температурный коэффициент удельного сопротивления, если температура накала 2000°C .
16. Насколько изменяется при переходе от зимы к лету сопротивление телеграфной линии, если она проложена железным проводом с поперечным сечением в 10 мм^2 ? Температура изменяется от -30 до $+30^\circ\text{C}$. Длина провода зимой равна 100 км. Удельное сопротивление зимой $\rho_0 = 8,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, температурный коэффициент сопротивления равен $6 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$. Как изменится результат, если учесть удлинение провода при нагревании? Коэффициент линейного расширения железа ТК $l = 12 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.
17. Сопротивление провода из константана при 20°C равно 700 Ом. Определить сопротивление этого провода при 400 °C, если при 20°C ТК $\rho = -15 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, ТК $l = 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$?

18. Напряженность электрического поля в меди 0,12 В/м. Как и во сколько раз измениться скорость дрейфа электронов в меди при температуре 320°C по сравнению с дрейфовой скоростью при температуре 20°C? При 20°C $\rho_{Cu} = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, $\text{TK}\rho = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $n = 8,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.
19. Обмотка катушки из медной проволоки при температуре 14°C имеет сопротивление 10 Ом. После пропуска тока сопротивление обмотки стало 12,2 Ом. До какой температуры нагрелась обмотка?
20. Из железной проволоки диаметром 0,2 мм надо намотать электронагревательный элемент мощностью 90 Вт с рабочей температурой 520°C. Напряжение сети 220 В. Какова должна быть длина проволоки элемента, если удельное сопротивление железа при комнатной температуре $\rho = 0,1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, а $\text{TK}\rho = 6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$?
21. Из нихромового провода диаметром 2 мм изготовлен электронагревательный элемент, мощность которого при 820°C равна 1кВт. Напряжение 220 В. Чему равна длина провода нагревательного элемента? При 20°C для нихрома $\rho = 1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, $\text{TK}\rho = 6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, $\text{TKI} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

ТЕМА «Влияние примесей на удельное сопротивление металлов, правило Маттиссена, сплавы, закон Нордгейма»

Введение любой примеси приводит к увеличению удельного сопротивления металла. Удельное сопротивление металлов и сплавов подчиняется правилу Маттиссена:

$$\rho = \rho_T + \rho_{\text{ост}},$$

где ρ_T – тепловое сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебания узлов кристаллической решетки;

$\rho_{\text{ост}}$ – остаточное или добавочное сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на дефектах структуры.

Но для сплавов $\rho_T \ll \rho_{\text{ост}}$.

Для сплавов, состоящих из двух компонентов, зависимость $\rho_{\text{ост}}$ от содержания компонент подчиняется закону Нордгейма

$$\rho_{\text{ост}} = C \cdot x_A \cdot x_B = C \cdot x_B \cdot (1 - x_B)$$

где C – константа, характеризующая данный сплав,

x_A и x_B – атомные доли компонентов в сплаве ($x_A + x_B = 1$).

Если содержание компонента x_B мало и его можно рассматривать как примесь, то выражение для $\rho_{\text{ост}}$ упрощается

$$\rho_{\text{ост}} = C \cdot x_B$$

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [1, с.42-45], [3, (2.27, 2.28, 2.35, 2.59-2.61)]

ТЕМА «Сопротивление проводников на высоких частотах. Закон Видемана-Франца-Лорентца»

Глубина, на которую электрическое поле и ток проникают в проводник, зависит как от частоты тока, так и от электрических и магнитных характеристик материала и определяется по формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \mu_0}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \mu_0}},$$

где Δ – глубина проникновения поля в проводник,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная,

μ – относительная магнитная проницаемость проводника,

f – частота тока.

Так как в случае сильно выраженного поверхностного эффекта ток протекает только в тонком приповерхностном слое и центральная часть сечения проводника практически не используется, то сопротивление проводника при прохождении по нему переменного тока высокой частоты больше сопротивления этого же провода постоянному току. Обозначим через S_1 площадь по которой течет ток высокой частоты. Для провода круглого сечения $S_1 = \pi \cdot d \cdot \Delta$ (d – диаметр провода). Если через R_1 обозначим сопротивление провода переменному току высокой частоты, а через R_0 – сопротивление этого же провода постоянному току и $S_0 = \pi \cdot d^2 / 4$ – площадь поперечного сечения провода, то можно найти коэффициент увеличения сопротивления k_R :

$$k_R = \frac{R_1}{R_0} = \frac{S_0}{S_1} = \frac{\pi d^2 / 4}{\pi d \Delta} = \frac{d}{4\Delta}$$

Закон Видемана-Франца-Лорентца:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = L_0 \cdot T,$$

где λ – коэффициент теплопроводности металла

$L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$ – число Лорентца.

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [1, с.45-48], [2, с.13], [3, (2,16, 2.21-2.23, 2.34, 2.52-2.57, 2.17,)]

ТЕМА «Резисторы»

Сопротивление резистора в зависимости от конструкции определяется по следующим формулам.

Для резисторов поверхностного типа цилиндрической формы:
без спиральной нарезки

$$R = \rho \frac{l}{\pi D h}, \text{ Ом}$$

со спиральной нарезкой

$$R = \rho \frac{N \pi D}{(t - a) h}, \text{ Ом}$$

где l – длина образующей цилиндра токопроводящего слоя резистора без нарезки,

h – толщина токопроводящего слоя,

D – наружный диаметр стержня,

N – число витков спиральной нарезки,

t – шаг спиральной нарезки,

a – ширина спиральной нарезки.

Для тонкопленочного резистора

$$R = \rho_{\square} \frac{l}{b}, \text{ Ом}$$

где ρ_{\square} – сопротивление квадрата пленки,

l, b – длина и ширина тонкопленочного резистора.

Сопротивление квадрата пленки ρ_{\square} связано с удельным сопротивлением следующим соотношением

$$\rho_{\square} = \frac{\rho}{h},$$

где h – толщина пленки.

Температурный коэффициент сопротивления резистора (ТКС) характеризует относительное изменение сопротивления резистора при изменении температуры окружающей среды на 1°C

$$TKC = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta T},$$

где R_0 – сопротивление резистора при нормальной температуре T_0 ,

$\Delta T = T - T_0$, T – положительная или отрицательная температура,

$\Delta R = R - R_0$, R – сопротивление резистора при температуре T .

При прохождении тока через токопроводящий элемент в нем выделяется тепловая энергия, которая рассеивается в окружающую среду. Эта тепловая энергия оценивается мощностью рассеивания резистора

$$P = I^2 \cdot R \text{ Вт,}$$

где I – величина протекающего через резистор тока.

В соответствии с ГОСТами в нашей стране установлены шесть рядов для выпуска резисторов: E6, E12, E24, E48, E96, E192. Для ряда E6 резисторы имеют в каждой декаде следующие номиналы: 1,0, 1,5, 2,2, 3,3, 4,7, 6,8. А для ряда E12 следующие номиналы: 1,0, 1,2, 1,5, 1,8, 2,2, 2,7, 3,3, 3,9, 4,7, 5,6, 6,8, 8,2.

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [2, с.82-114], [4, с.4-9], [5, с. 6-32].

Методические указания

При изучении раздела «Проводниковые материалы и резисторы» обратите внимание на такие понятия как тепловая и дрейфовая скорость, подвижность, длина свободного пробега электронов и их зависимость от температуры, примесей, дефектов. Необходимо усвоить, как и почему изменяется удельное сопротивление металлов при изменении температуры, введении примесей и влиянии других внешних факторов, в чем смысл правила Маттиссена. Важной характеристикой зависимости удельного сопротивления от температуры является температурный коэффициент удельного сопротивления, который имеет разное значение в чистых металлах и в сплавах. Это связано с увеличением остаточного сопротивления сплавов.

Необходимо знать порядок величин основных характеристик проводниковых материалов в зависимости от области их применения. Механического запоминания числовых значений не требуется, но студент должен отчетливо представлять себе порядок этих величин, чтобы сравнивать между собой по тому или иному параметру различные материалы.

При изучении резисторов важно знать их основные параметры: номинальное сопротивление, допуск, номинальная мощность рассеивания, предельное рабочее напряжение, температурный коэффициент сопротивления и как влияют тип и конструкция резисторов на основные параметры. Следует обратить внимание на такие факторы, как уровень собственных шумов, высокочастотная граница, нелинейность вольтамперной характеристики, которые ограничивают чувствительность электронных схем и создают помехи при воспроизведении полезного сигнала.

3. Диэлектрические материалы и конденсаторы.

ТЕМА «Поляризация диэлектриков»

Поляризованность диэлектрика определяется по формуле

$$P = dp/dV.$$

где dp – индуцированный электрический момент,

dV – объем диэлектрика.

Для большинства диэлектриков в слабых электрических полях поляризованность пропорциональна напряженности поля

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E = \varepsilon_0\chi E,$$

$$\text{где } \varepsilon = 1 + \chi$$

χ – диэлектрическая восприимчивость;

ε_0 – электрическая постоянная = $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

В случае ионной поляризации $p_i = q\Delta x = q^2 E / k_{\text{упр}}$.

Для дипольной поляризации при включении электрического поля поляризация нарастает по закону:

$$P_d = P_{d,ст} [1 - \exp(-t/\tau)],$$

где $P_{d,ст}$ – наибольшее значение поляризованности при длительном воздействии поляризирующего напряжения.

Поляризованность P_d дипольной поляризации за время t с момента снятия приложенного напряжения уменьшается по экспоненциальному закону:

$$P_d = P_d(0)\exp(-t/\tau).$$

Диэлектрическую проницаемость сложных диэлектриков, представляющих собой смесь химически невзаимодействующих друг с другом компонентов с различными диэлектрическими проницаемостями, можно в первом приближении (при не слишком большом различии ε компонентов) определить на основании уравнения Лихтенеккера, с помощью которого в общем случае рассчитывают самые различные свойства (например, теплопроводность, показатель преломления и др.):

$$\varepsilon^x = Q_1 \varepsilon_1^x + Q_2 \varepsilon_2^x,$$

где ε , ε_1 , ε_2 – соответственно относительные диэлектрические проницаемости смеси и отдельных компонентов; Q_1 и Q_2 – объемные доли компонентов смеси; $Q_1 + Q_2 = 1$; x – величина, характеризующая распределение компонентов и принимающая значения от +1 до -1.

При параллельном включении компонентов $x = +1$ и

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

При последовательном включении компонентов, когда $x = -1$:

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{Q_1}{\varepsilon_1} + \frac{Q_2}{\varepsilon_2}.$$

Если оба компонента распределены хаотически (что имеет место в ряде интересующих нас технических диэлектриков, например, в керамике), то после преобразования ($y = a^x$; $y' = a^{x \ln a}$) уравнения Лихтенеккера и подстановки $x=0$, получим:

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

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости сложного диэлектрика определяют дифференцированием соответствующего уравнения по температуре. Для хаотического расположения компонент получаем:

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

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [1, с.182-192], [2, с.21-23], [3, с. 12-14], [8, с.9-10].

ТЕМА «Электропроводность диэлектриков»

Электропроводность диэлектриков, как правило, носит ионный характер.

На зависимости плотности тока от напряженности электрического поля для газообразных диэлектриков можно выделить три участка. В области слабых полей выполняется закон Ома и плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля:

$$J = q \cdot n \cdot (\mu_+ + \mu_-) \cdot E.$$

Когда все ионы, созданные внешним ионизатором уходят на электроды без рекомбинации, наступает область тока насыщения:

$$J_n = q \cdot N \cdot h,$$

где N - мощность внешнего ионизатора (число актов ионизации в 1 м^3 за 1 секунду), h - расстояние между электродами. При дальнейшем повышении напряженности до значений, близких к $E_{кр}$, возникает ударная ионизация электронами и ток резко возрастает. Плотность тока равняется

$$J = q \cdot n_0 \cdot \exp(\alpha h),$$

где n_0 - концентрация свободных электронов около катода,
 α - коэффициент ударной ионизации.

При изучении электропроводности диэлектриков необходимо учитывать наряду с объемным и поверхностный сквозной ток, полагая общий ток участка изоляции

$$I = I_v + I_s$$

Общее сопротивление изоляции определяют как результирующее двух параллельно включенных сопротивлений:

$$R = \frac{1}{\gamma} = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s}.$$

Где R_v - объемное сопротивление диэлектрика,
 R_s - поверхностное сопротивление диэлектрика.

$$R_s = \rho_s \cdot a/b,$$

где a - ширина электрода,
 b - расстояние между электродами.

Электропроводность диэлектриков зависит от температуры.

$$\gamma = q \cdot N_0 \cdot \mu \cdot \exp\left(\frac{-W}{k \cdot T}\right)$$

где N_0 - концентрация ионов,
 μ - их подвижность,
 W - энергия активации ионов.

Для ограниченного интервала температур можно с достаточной точностью пользоваться формулами:

$$\gamma(T) = \gamma(T_0) \cdot \exp[\alpha(T - T_0)]$$

$$\text{и } \rho(T) = \rho(T_0) \cdot \exp[\alpha(T - T_0)]$$

где $\gamma(T)$ и $\gamma(T_0)$ - удельная проводимость при температурах T и T_0 ;
 $\rho(T)$ и $\rho(T_0)$ - удельное сопротивление при температурах T и T_0 ;
 α - температурный коэффициент.

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [1, с.193-199], [2, с.24-26], [3, с. 15-19], [8, с.22-30].

ТЕМА «Пробой диэлектриков»

Если диэлектрик однороден и поле однородно, то напряженность поля E , равная электрической прочности диэлектрика $E_{пр}$, достигается одновременно во всей толщине изоляции. Поэтому пробивное напряжение определяется по формуле

$$U_{пр} = E_{пр} \cdot h$$

Отношение пробивного напряжения к номинальному U_n называют коэффициентом запаса электрической прочности

$$K = \frac{U_{пр}}{U_n}$$

Отношение импульсного пробивного напряжения к статическому пробивному напряжению называют коэффициентом импульса

$$K_{им} = \frac{U_{им.пр}}{U_{ст.пр}}$$

При тепловом пробое пробивное напряжение определяется по формуле

$$U_{пр} = K \sqrt{\frac{\sigma h}{f \varepsilon \alpha \operatorname{tg} \delta_0}}$$

где K – числовой коэффициент, равный $1,15 \cdot 10^5$, если все величины, имеющие размерности, выражены в единицах СИ, $\operatorname{tg} \delta_0$ – тангенс угла потерь диэлектрика при температуре окружающей среды, α – температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь, σ – суммарный коэффициент теплопередачи от диэлектрика во внешнюю среду, h – толщина диэлектрика, f – частота.

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [1, с.211-224], [3, с. 19-22], [8, с.48-53], [7].

ТЕМА «Потери в диэлектриках»

Диэлектрическими потерями называют электрическую мощность, затрачиваемую на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле. Различают 3 основных вида потерь: потери на электропроводность, потери на поляризацию, потери на ионизацию.

Приближенно ионизационные потери могут быть вычислены по формуле:

$$P_{и} = A_1 f (U - U_{и})^3,$$

где A_1 – постоянный коэффициент; f – частота;

U – приложенное напряжение;

$U_{и}$ – напряжение, соответствующее началу ионизации.

Наличие сквозного тока в переменном поле приводит к рассеянию мощности

$$P_{скв} = \gamma E^2$$

в единице объема диэлектрика. Эту часть потерь, обусловленную сквозным током диэлектрика, называют диэлектрическими потерями на электропроводность. Мощность потерь на электропроводность не зависит от частоты. Однако тангенс угла потерь, обусловленных сквозным током

$$\operatorname{tg} \delta_{скв} = \gamma / (\omega \varepsilon \varepsilon_0) = 1,8 \cdot 10^{10} / (f \cdot \varepsilon \cdot \rho),$$

зависит от частоты и от температуры

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \operatorname{tg} \delta_1 \cdot \exp[\alpha (T_2 - T_1)],$$

где $\operatorname{tg} \delta_1$ – значение тангенса угла потерь при температуре T_1 ,

$\operatorname{tg} \delta_2$ – значение тангенса угла потерь при температуре T_2 .

Активная мощность потерь

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

Для последовательной схемы замещения диэлектрика

$$\operatorname{tg} \delta = r_s \cdot \omega \cdot C_s$$

Для параллельной схемы замещения

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{r_p \cdot \omega \cdot C_p}$$

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [1, с.200-211], [2, с. 27-29], [8, с.38--47], [7].

ТЕМА « Конденсаторы »

$$\text{Емкость конденсатора } C = \frac{Q}{U},$$

где Q – заряд конденсатора,

U – напряжение на его обкладках.

$$\text{В случае плоского конденсатора } C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика,

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

S- площадь диэлектрика, м²,

d – его толщина, м.

Напряжение, приложенное к конденсатору, заряжает его, при этом совершается определенная работа (W), измеряемая в Дж. Она равна запасенной потенциальной энергии (E):

$$W = E = \frac{C \cdot U^2}{2},$$

Скорость заряда и разряда конденсатора определяется постоянной времени

$\tau = R \cdot C$, где R – сопротивление конденсатора. Напряжение на зажимах конденсатора при зарядке нарастает со временем по экспоненте, стремясь достичь максимальной величины E

$$U(t) = E(1 - \exp(-t/\tau))$$

Через время, соответствующее τ , конденсатор зарядится до 63% от максимальной величины, через время 3τ – до 95%, а через 5τ – до 99,3%.

При разрядке конденсатора напряжение на его обкладках уменьшается по экспоненте:

$$U(t) = U(0) \cdot \exp(-t/\tau)$$

При разрядке конденсатора через время, соответствующее τ , на конденсаторе остается 37% от первоначального напряжения, через 3τ останется 5%, а через 5τ – только 0,7%.

Если в нижеприведенные формулы для определения емкости различных типов конденсаторов геометрические размеры подставлять в сантиметрах, то емкости получатся в пФ.

Так для плоского конденсатора $C = 0,0885 \frac{\varepsilon S}{d}$, пФ.

Для многопластинчатых, литых секционированных и пакетных конденсаторов

$$C = 0,0885 \frac{\varepsilon S}{d} (n - 1), \text{ пФ},$$

где n – число пластин (обкладок).

Температурный коэффициент емкости (ТКЕ) характеризует относительное изменение емкости конденсатора при изменении температуры окружающей среды на 1°C :

$$TKE = \frac{\Delta C}{C_0 \Delta T},$$

где C_0 – емкость конденсатора при нормальной температуре,

ΔC - изменение емкости при отклонении температуры от нормальной на величину ΔT .

Величину ТКЕ можно определить через температурные коэффициенты параметров конструкции по формуле

$$TKE = ТК\varepsilon + 2ТКЛР_l - ТКЛР_d,$$

где $ТК\varepsilon$ – температурный коэффициент диэлектрической проницаемости диэлектрика,

$ТКЛР_l$ – температурный коэффициент изменения стороны квадратной обкладки, равной l ,

$ТКЛР_d$ - температурный коэффициент линейного расширения диэлектрика.

Для конденсаторов с напыленными обкладками (слюдяные) или вожженными (керамические) $ТКЛР$ обкладок будет определяться $ТКЛР$ диэлектрика, поэтому

$$TKE = ТК\varepsilon + ТКЛР_d.$$

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [2, с.116-153], [4, с. 10-15], [5, с.33--51], [7].

Методические указания.

Обратите внимание на физическую сущность явлений, происходящих в диэлектриках под влиянием электрического поля: поляризация, электропроводность, диэлектрические потери и пробой. Важно знать какие существуют виды поляризации, какие диэлектрики обладают теми или иными видами поляризации, как влияет температура и агрегатное состояние на диэлектрическую проницаемость.

Необходимо знать, что ток утечки в диэлектриках обусловлен как током сквозной проводимости, так и абсорбционным током, в который вносят вклад замедленные виды поляризации. При этом следует учесть, что электропроводность зависит от агрегатного состояния диэлектрика, температуры и влажности.

Изучите основные механизмы потерь в диэлектриках. Обратите внимание, что тангенс угла диэлектрических потерь является характеристикой данного материала и не зависит от его геометрических размеров.

Изучите механизмы пробоя газообразных, жидких и твердых диэлектриков. Обратите внимание на такие параметры. Как пробивное напряжение, электрическая прочность, коэффициент запаса электрической прочности.

При изучении конденсаторов обратите внимание на разнообразие их конструкций, а также на основные характеристики и параметры, их взаимосвязь с геометрическими параметрами и свойствами диэлектриков, зависимость от режимов работы и внешних условий.

4. Магнитные материалы и катушки индуктивности.

ТЕМА «Магнитные материалы»

Магнитный момент единицы объема вещества называют намагниченностью J_M :

$$J_M = M/V,$$

где V – объем вещества.

Намагниченность связана с напряженностью магнитного поля соотношением:

$$J_M = k_M \cdot H,$$

где k_M – безразмерная величина, характеризующая способность данного вещества намагничиваться в магнитном поле и называется магнитной восприимчивостью.

Магнитная индукция в веществе определяется алгебраической суммой индукции внешнего и собственного полей:

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

где $\mu = 1 + k_M$ - относительная магнитная проницаемость, показывающая во сколько раз магнитная индукция поля в данной среде больше, чем магнитная индукция в вакууме.

Для большинства твердых парамагнетиков температурное изменение магнитной восприимчивости подчиняется закону Кюри – Вейса:

$$k_M = C/(T-\theta),$$

где C и θ – постоянные величины для данного вещества.

При перемагничивании в переменных полях в магнитных материалах возникают потери на гистерезис, на вихревые токи и на магнитное последствие.

Потери на гистерезис при частоте перемагничивания f определяются по формуле:

$$P'_H = f \frac{\oint HdB}{D} .$$

Потери на вихревые токи зависят не только от магнитных, но и от электрических свойств (удельного электрического сопротивления) материала и от формы сердечника. Для плоского образца эти потери

$$P_B = \frac{1,64 \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2}{D\rho} \text{ [Вт / кг]},$$

где B_{\max} – амплитуда магнитной индукции, Т;

f - частота переменного тока, Гц;

d - толщина листа, м;

D - плотность, кг/м³;

ρ - удельное электрическое сопротивление, Ом м .

В общем виде:

$$P_B = \xi \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \cdot V,$$

где V – объем образца,

ξ - коэффициент, пропорциональный удельной проводимости вещества и зависящий от геометрической формы и размеров поперечного сечения намагничиваемого образца.

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [1, с.296-322], [2, с. 49-81], [3, с.23--24], [7].

ТЕМА « Катушки индуктивности»

Для бесконечно длинного соленоида (катушки) или тороидальной катушки величину индуктивности L рассчитывают по формуле

$$L = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N^2}{l} \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн}$$

где D - диаметр каркаса, см;

l – длина намотки, см;

N - число витков.

В действительности катушки индуктивности часто имеют соизмеримые размеры диаметра и длины намотки, что делает магнитное поле катушки не полностью замкнутым, часть магнитной энергии рассеивается в пространство. Это учитывают введением в формулу для индуктивности коэффициента K .

При наличии магнитного сердечника индуктивность L_c увеличивается в μ_c раз. μ_c – действующая магнитная проницаемость сердечника, зависящая как от магнитных свойств материала, так и от его формы.

Добротность катушки индуктивности при заданных индуктивности и рабочей частоте определяется суммарным сопротивлением потерь в катушке

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R_{\Sigma}}$$

$$R_{\Sigma} = R_f + R_{\theta} + R_{\omega} + R_C + R_{CL}$$

где R_f - сопротивление провода обмотки току высокой частоты,

R_{θ} – диэлектрические потери в каркасе и изоляции провода обмотки,

R_{ω} – сопротивление потерь, вносимых экраном,

R_C – сопротивление потерь в сердечнике,

R_{CL} – сопротивление потерь за счет резонансных свойств катушки.

Собственная емкость катушки складывается из емкости между витками через диэлектрик каркаса или изоляции провода $C_{L\theta}$ и емкости между витками через воздух C_{LB}

$$C_L = C_{L\theta} + C_{LB}$$

Более подробную информацию по этой теме можно получить из литературы [2, с.153-170], [4, с. 16-21], [5, с.52--66].

Список литературы

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – СПб.: Лань, 2003. – 366с.
2. Кузбных Н.И., Солдатова Л.Ю. Радиоматериалы и радиокомпоненты. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2012 – 177 с. : [электронный ресурс].- режим доступа: edu.tusur.ru/training/publications/2733.
3. Солдатова Л.Ю. Материаловедение и материалы электронных средств: Методические указания и задания для проведения практических занятий.- Томск: ТУСУР, 2007.-25 с.
4. Солдатова Л.Ю. Физические основы микроэлектроники, часть 2. Методические указания и задания для проведения практических занятий.- Томск: ТУСУР, 2007.-30 с.
5. Солдатова Л.Ю. Физические основы микроэлектроники, часть 2. Конспект лекций.- Томск: ТУСУР, 2007.-102 с.
6. Битнер Л.Р. Материалы и элементы электронной техники: учебное пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе. – Томск: ТУСУР. 2007.- 47 с.
7. Битнер Л.Р. Материалы и элементы электронной техники: учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. - 214 с.
8. Трубицын А.М. Электрорадиоэлементы. Диэлектрики. Учебное пособие. – Томск: ТАСУР. – 1995.- 76 с.