

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»



М. Х. Дудов

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум для обучающихся направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения

Черкесск, 2025 г.

УДК 620.22
ББК 30.3:31.23
Д 81

Рассмотрено на заседании кафедры «Электроснабжение»
Протокол № 1 от 10 сентября 2024 г.
Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом СКГА.
Протокол № 27 от 11 ноября 2024 г.

Рецензенты:

Эркенов Н. Х. – к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение»
Гурин А. В. – к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение»

Д81 Дудов, М.Х. Электротехническое и конструкционное материаловедение: лабораторный практикум для обучающихся направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения / М.Х. Дудов. – Черкесск: БИЦ СКГА, 2025. – 28 с.

В лабораторном практикуме приведены необходимые теоретические сведения по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение». Представлены задания к практическим занятиям студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

УДК 620.22
ББК 30.3:31.23

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы	5
Раздел 1. Проводниковые материалы	5
Раздел 2. Изоляционные материалы	8
Раздел 3. Полупроводниковые материалы	12
Раздел 4. Магнитные материалы	15
Методические указания для подготовки к практическим занятиям	21
Задачи для практических занятий	22
Список литературы	27

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью освоения дисциплины является:

формирование у студентов знаний и умений по применению различных электротехнических материалов в системах электроснабжения и в электротехническом оборудовании промышленных предприятий.

Основными задачами дисциплины являются:

познакомить обучающихся с разнообразными материалами, с возможностью применения их в электроэнергетике, требованиями к ним и основными характеристиками;

научить принимать и обосновывать технические решения по применению различных электротехнических материалов;

приобретение студентами прочных знаний и практических навыков в области, определяемой основной целью курса.

В результате освоения дисциплины студент должен обладать следующими компетенциями:

Знать основы материаловедения и технологии конструкционных материалов; электротехнические материалы в качестве компонентов электротехнического и электроэнергетического оборудования; технические средства и приборы, нормативно-правовую базу, регламентирующую требования к техническим средствам и приборам, применяемым для измерения параметров режимов работы электроэнергетической системы и для энергетических обследований; технические средства и приборы, нормативно-правовую базу, регламентирующую требования к техническим средствам и приборам, применяемым для измерения параметров режимов работы электроэнергетической системы и для энергетических обследований.

Уметь применять методы математического анализа при решении инженерных задач; выявлять физическую сущность явлений и процессов в устройствах различной физической природы и выполнять применительно к ним простые технические расчеты; использовать основные элементарные методы химического исследования веществ и соединений; эксплуатировать и производить выбор электрических аппаратов, машин, электрического привода, оборудования электрических станций и подстанций, электроэнергетических систем и сетей, систем электроснабжения; использовать технические средства и приборы, применяемые для измерения параметров режимов работы электроэнергетической системы и энергетических обследований.

Владеть методами анализа физических явлений в технических устройствах и системах; информацией о назначении и областях применения основных химических веществ и их соединений; методиками выполнения расчетов применительно к использованию электротехнических и конструкционных материалов; навыками исследовательской работы; методами и методиками измерения параметров режимов работы электроэнергетической системы и показателей энергоэффективности.

Краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы

РАЗДЕЛ 1. Проводниковые материалы.

Плотность тока в проводнике с одним типом носителей заряда

$$J = \gamma \cdot E, \quad [\text{А/м}^2],$$

где γ - удельная электрическая проводимость, $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$; $E = U/l$ - напряженность электрического поля в проводнике длиной l , м, при разности потенциалов между его концами U , В.

Удельная электрическая проводимость металла:

$$\gamma = \bar{e} \cdot n \cdot \mu, \quad [\text{См/м}],$$

где n - концентрация свободных электронов, м^{-3} ; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $\mu = v/E$ - подвижность электронов, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; v - скорость, приобретаемая электронами в электрическом поле, м/с.

Удельное электрическое сопротивление - это величина, обратная удельной электрической проводимости

$$\rho = \frac{1}{\gamma}, \quad [\text{Ом/м}].$$

В соответствии с классической электронной теорией металлов выражение для удельного электрического сопротивления имеет вид

$$\rho = \frac{2 \cdot m_0 \cdot v_T}{e^2 \cdot n \cdot l_{\text{ср}}}, \quad [\text{Ом/м}],$$

где $m_0 = 0,91 \cdot 10^{-30}$ кг - масса электрона; $l_{\text{ср}}$ - средняя длина свободного пробега электронов, м; v_T - средняя скорость теплового движения электронов, м/с, которая определяется из соотношения

$$\frac{m_0 \cdot v_T^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T,$$

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

Если атомы в металле ионизированы однократно, то концентрация свободных электронов n будет равна концентрации атомов N и может быть рассчитана по формуле

$$n = N = \frac{d}{M} N_A, \quad [\text{м}^{-3}],$$

где d - плотность вещества, кг/м^3 ; M - молярная масса, кг/моль ; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль - постоянная Авогадро.

В соответствии с квантовой теорией удельное электрическое сопротивление металлов

$$\rho = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{1/3} \cdot \frac{h}{e^2 \cdot n^{2/3} \cdot l_{\text{ср}}}, \quad [\text{Ом}\cdot\text{м}],$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка.

Средняя скорость дрейфа за время свободного пробега

$$v = \frac{e \cdot E}{2m_0} \cdot \tau_0, \quad [\text{м/с}],$$

где τ_0 – время свободного пробега.

Среднюю скорость можно также найти по формулам

$$v = \frac{E}{\rho \cdot e \cdot n}; \quad v = \frac{U}{\rho \cdot e \cdot n \cdot l}.$$

В промежутках между столкновениями с узлами кристаллической решетки электрон при воздействии электрического поля движется с ускорением $a = e \cdot E / m_0$.

Удельная проводимость проводника может быть определена как

$$\gamma = (e^2 \cdot n \cdot l) / (m_0 \cdot u),$$

где u – средняя скорость теплового движения (температуре 300 К соответствует средняя скорость порядка 10^5 м/с).

Время дрейфа электрона по проводнику $t = l/v$.

Время пролета при движении электрона без соударений $t_{\text{пр}} = \sqrt{2l/a}$.

Примеси и структурные дефекты увеличивают удельное сопротивление металлов. В соответствии с правилом Маттиссена

$$\rho = \rho_{\text{т}} + \rho_{\text{ост}}, \quad \text{Ом} \cdot \text{м},$$

где $\rho_{\text{т}}$ – удельное электрическое сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки;

$\rho_{\text{ост}} = \rho_{\text{пр}} + \rho_{\text{деф}}$ – остаточное удельное сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на статических дефектах структуры: примесных атомах ($\rho_{\text{пр}}$) и собственных дефектах структуры ($\rho_{\text{деф}}$).

Наиболее существенный вклад в остаточное сопротивление вносит рассеяние на примесях. При малом содержании примесей удельное сопротивление возрастает пропорционально концентрации примесных атомов. Кроме примесей, некоторый вклад в остаточное сопротивление вносят собственные дефекты структуры – вакансии, атомы внедрения, дислокации, границы зерен. Остаточное сопротивление представляет собой характеристику химической чистоты и структурного совершенства металла. Для оценки содержания примесей измеряют отношение удельного сопротивления металла при комнатной температуре и температуре жидкого гелия: $\beta = \rho_{300} / \rho_{4,2}$.

Удельное сопротивление металлических сплавов, имеющих структуру неупорядоченного твердого раствора, $\rho_{\text{ост}}$ может существенно превышать $\rho_{\text{т}}$. Для многих двухкомпонентных сплавов металлов, не принадлежащих к числу переходных или редкоземельных элементов, зависимость $\rho_{\text{ост}}$ от состава описывается законом Нордгейма

$$\rho_{\text{ост}} = C \cdot X_A X_B = C \cdot X_A (1 - X_B), \quad \text{Ом} \cdot \text{м},$$

где C – константа, зависящая от природы сплава; X_A , X_B – атомные доли компонентов в сплаве.

В диапазоне температур, где зависимость ρ от T близка к линейной, справедливо выражение

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_{\rho}(T - T_0)], \quad \text{Ом} \cdot \text{м},$$

где ρ_0 - удельное сопротивление в начале температурного диапазона;

$$\alpha_\rho = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0(T - T_0)} \text{ - средний температурный коэффициент удельного}$$

сопротивления в данном диапазоне температур, K^{-1} ;

ρ - удельное сопротивление при температуре T .

Температурные коэффициенты удельного сопротивления α_ρ , сопротивления α_R и удлинения α_l связаны соотношением

$$\alpha_\rho = \alpha_R + \alpha_l.$$

Температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha_R = (R_2 - R_1) / [R_1 \cdot (T_2 - T_1)].$$

Зависимость длины проводника от температуры

$$l = l_0 \cdot [1 + \alpha_l \cdot (T - T_0)],$$

где l_0 - начальная длина проводника при температуре T_0 ;

l - длина при температуре T ;

α_l - температурный коэффициент линейного удлинения.

В металлах благодаря высокой концентрации свободных электронов преобладает электронная теплопроводность. Экспериментальный закон Видемана - Франца - Лоренца устанавливает связь между удельной теплопроводностью λ , Вт·м/К, и удельной электрической проводимостью γ , См/м:

$$\lambda/\gamma = L_0 T,$$

где L_0 - число Лоренца.

Количество теплоты Q , выделяющееся в единицу времени в единице объема проводника, по которому протекает ток плотностью J , при напряженности электрического поля E , выражается формулой

$$Q = J \cdot E = \gamma \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3.$$

Внутренняя контактная разность потенциалов при соприкосновении металлов А и В

$$eU_k = W_{FB} - W_{FA},$$

причем уровни Ферми отсчитываются от дна зоны проводимости.

Связь между концентрацией электронов и энергией Ферми

$$n = (8\pi/3) \cdot (2m_0/h^2)^{3/2} \cdot (W_F)^{3/2}$$

Разность потенциалов на концах последовательной разнородной цепи

$$E = (A_n - A_k) / (e \cdot l),$$

где A_n , A_k - работа выхода электронов из начального и конечного проводников; l - расстояние между ними.

Примечание: если работа выхода выражена в эВ, величина e в знаменателе отсутствует.

В однородном проводнике при наличии градиента температуры на его концах возникает разность потенциалов. Ее значение, отнесенное к единичной разности температур на концах проводника, называют абсолютной удельной термоЭДС. В термоэлектрической цепи, составленной из разнородных проводников (термопаре), относительная удельная термоЭДС представляет собой разность абсолютных удельных термоЭДС составляющих проводников

$$\alpha_T = \alpha_T^A - \alpha_T^B,$$

где α_T^A и α_T^B - абсолютные удельные термоЭДС контактирующих металлов А и В.

На высоких частотах наблюдается неравномерное распределение электрического тока по сечению проводника: плотность тока максимальна на поверхности и убывает по мере проникновения вглубь проводника. Распределение тока по сечению проводника описывается уравнением

$$J(z) = J_0 e^{-\frac{z}{\Delta}},$$

где J_0 - плотность тока на поверхности;

z - координата по нормали к поверхности в глубь проводника, м;

Δ - глубина проникновения поля в проводник, м.

Плотность тока изменяется по тому же закону, что и напряженность электрического поля E , так как $J = \gamma E$. Связь глубины проникновения поля с физическими характеристиками вещества определяется выражением

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \gamma}},$$

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

μ - относительная магнитная проницаемость вещества;

f - частота, Гц.

Так как центральная часть сечения проводника почти не используется, активное сопротивление провода $R_{\sim}$ при прохождении по нему переменного тока больше, чем его активное сопротивление R_0 при постоянном токе. Коэффициент увеличения сопротивления k_R рассчитывается по формуле

$$k_R = \frac{R_{\sim}}{R_0} = \frac{S_0}{S_e},$$

где S_0 - площадь поперечного сечения проводника, м²;

S_e - эквивалентная площадь сечения проводника, занятая током при воздействии высокочастотного поля (для круглого проводника $S_e = \pi d \Delta$, для плоского - $S_e = b \Delta$, где d - диаметр круглого проводника, м; b - ширина плоского проводника, м).

РАЗДЕЛ 2. Изоляционные материалы

Поляризованность P характеризует интенсивность поляризации диэлектрика, т.е. такого состояния вещества, при котором его элементарный объем приобретает электрический момент

$$P = n \cdot q \cdot l, \quad [\text{Кл/м}^{-2}],$$

где q - величина заряда одного диполя, Кл;

l - расстояние между центрами положительного и отрицательного заряда, м; n - число диполей в 1 м³.

Поляризованность совпадает по значению с поверхностной плотностью зарядов, возникающих на поверхности диэлектрика.

Индуктирование электрического момента в единице объема диэлектрического материала может происходить под действием электрического поля, механических напряжений или самопроизвольно (спонтанно).

Поляризация в электрическом поле – это процесс смещения связанных зарядов на ограниченное расстояние или поворот диполей под действием внешнего электрического поля.

Если диэлектрик находится между обкладками конденсатора, то вследствие поляризации заряд конденсатора увеличивается в ε раз при том же значении электрического напряжения U . Величина ε называется относительной диэлектрической проницаемостью и представляет собой отношение суммарного заряда Q конденсатора с диэлектриком к заряду Q_0 того же конденсатора, между электродами которого находится вакуум:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0},$$

где Q_d - заряд конденсатора, обусловленный поляризацией диэлектрика.

Емкость конденсатора с диэлектриком

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d},$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

S – площадь электродов;

d - расстояние между ними.

Удельный заряд конденсатора

$$\frac{Q}{S} = \frac{CU}{S} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon E = D;$$

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

где $E = U/d$ – напряженность электрического поля;

D – диэлектрическая индукция (смещение);

$\chi = \varepsilon - 1$ – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика;

$P = \varepsilon_0 \chi E$ – поляризованность диэлектрика.

Плоский конденсатор с неоднородным диэлектриком можно рассматривать как m параллельно или последовательно соединенных конденсаторов с однородными диэлектриками, соответственно относительная диэлектрическая проницаемость неоднородного диэлектрика

$$\varepsilon_H = \sum_{i=1}^{i=m} C_i \varepsilon_i; \quad \frac{1}{\varepsilon_H} = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{C_i}{\varepsilon_i},$$

где C_i - объемная концентрация i - го компонента, m - количество параллельно (последовательно) расположенных компонентов неоднородного диэлектрика.

Диэлектрическую проницаемость сложных твердых диэлектриков, представляющих собой смесь химически не взаимодействующих друг с другом компонентов, при не очень большом различии значений их диэлектрических проницаемостей, можно определить на основании уравнения Лихтенек-

кера. В случае хаотического распределения обоих компонентов (например, в керамике) уравнение Лихтенеккера имеет вид

$$\ln \varepsilon_C = C_1 \ln \varepsilon_1 + C_2 \ln \varepsilon_2,$$

где ε_C , ε_1 , ε_2 - относительные диэлектрические проницаемости смеси и отдельных компонентов соответственно; C_1 и C_2 - объемные концентрации компонентов, $C_1 + C_2 = 1$.

В общем случае ток в диэлектрике

$$I = I_{\text{см}} + I_{\text{абс}} + I_{\text{скв}},$$

где $I_{\text{см}}$ - ток смещения, $I_{\text{абс}}$ - ток абсорбции, $I_{\text{скв}}$ - ток сквозной проводимости. Кратковременный ток смещения обусловлен быстрыми видами поляризации (электронной, ионной). Ток абсорбции обусловлен активными составляющими токов, связанных с замедленными (релаксационными) механизмами поляризации в полярных и неоднородных диэлектриках. Время протекания тока абсорбции зависит от типа диэлектрика и механизма поляризации. Во многих диэлектриках, используемых в качестве электрической изоляции, ток абсорбции устанавливается за время меньше 1 минуты. При постоянном напряжении после установления тока абсорбции через диэлектрик будет протекать сквозной ток.

Для твердых диэлектриков наиболее характерна ионная электропроводность. Для многих ионных кристаллов удельная электропроводность экспоненциально зависит от температуры

$$\gamma_t = \gamma_0 e^{\frac{\Delta W}{2kT}},$$

где γ_0 - удельная электрическая проводимость при начальной температуре;

ΔW - энергия активации перемещения ионов, Дж;

k - постоянная Больцмана;

T - температура, К.

В низкотемпературной области проводимость в основном определяется примесными ионами, в высокотемпературной области - собственными ионами.

Поверхностное сопротивление твердого диэлектрика зависит от природы диэлектрика, температуры, влажности, приложенного напряжения и характеризуется удельным поверхностным сопротивлением ρ_s , Ом.

Поверхностное сопротивление диэлектрика:

$$R_s = \rho_s \frac{a}{b},$$

где a - расстояние между электродами, м;

b - ширина электрода, м.

Полная электрическая проводимость твердого диэлектрика определяется суммированием объемной и поверхностной проводимостей.

Диэлектрические потери - часть энергии электрического поля, которая рассеивается в диэлектрике в виде тепла. Потери энергии в диэлектрике обусловлены протеканием сквозного (объемного и поверхностного) тока и про-

цессами установления поляризации при изменении напряженности электрического поля.

Потери мощности на нагрев диэлектрика в постоянном электрическом поле

$$P = \frac{U^2}{R},$$

где U - напряжение, В; R - сопротивление диэлектрика, Ом.

Потери мощности в единице объема диэлектрика называются удельными электрическими потерями и определяются по формуле

$$P_{уд} = \frac{E^2}{\rho},$$

где E - напряженность электрического поля, В/м; ρ - удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

В переменном электрическом поле, кроме потерь на электропроводность, в диэлектриках возникают релаксационные, ионизационные, резонансные потери.

Для количественной оценки потерь энергии используется тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$. В конденсаторе с идеальным диэлектриком, то есть диэлектриком без потерь, вектор тока I_c опережает вектор напряжения U на 90° . В реальных диэлектриках угол сдвига фаз φ между током и напряжением меньше 90° за счет потерь, обусловленных протеканием активного тока I_a .

Диэлектрические потери (мощность, рассеиваемая в диэлектрике):

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

где $\omega = 2\pi f$ - угловая частота, рад/с; f - частота, Гц.

Удельные диэлектрические потери определяются выражением

$$P_{уд} = \frac{P}{V} = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot E^2 = \frac{\varepsilon \cdot f \cdot \operatorname{tg}\delta}{1,8 \cdot 10^{10}} E^2 = \gamma_a E^2,$$

где $\gamma_a = (\varepsilon \cdot f \cdot \operatorname{tg}\delta) / (1,8 \cdot 10^{10})$ – активная составляющая удельной проводимости диэлектрика, 1/(Ом·м).

Частотная зависимость потерь мощности в диэлектрике определяется характером зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ и относительной диэлектрической проницаемости ε от частоты.

Коэффициент диэлектрических потерь $\varepsilon' = \varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta$.

Минимальное напряжение $U_{пр}$, приводящее к образованию в диэлектрике электропроводящего канала, называется пробивным напряжением. Электрическая прочность, то есть способность диэлектрика сохранять высокое удельное сопротивление, характеризуется напряженностью электрического поля при пробое изоляции в однородном электрическом поле

$$E_{np} = \frac{U_{пр}}{d}, \text{ [В/м]},$$

где $U_{пр}$ - пробивное напряжение, В; d - толщина диэлектрика, м.

РАЗДЕЛ 3. Полупроводниковые материалы

Удельная электрическая проводимость полупроводника

$$\gamma = e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p,$$

где n, p – концентрация электронов и дырок соответственно;

μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок.

В примесных полупроводниках одним из слагаемых, в зависимости от типа проводимости, можно пренебречь.

Собственная концентрация носителей заряда (электронов и дырок)

$$n_i = p_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot e^{-\frac{\Delta W_0}{2kT}},$$

где ΔW_0 – ширина запрещенной зоны, Дж;

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

T – абсолютная температура, К;

N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, м^{-3} ;

N_V – эффективная плотность состояний в валентной зоне, м^{-3} .

$$N_C = 2 \cdot \frac{(2\pi \cdot m_n \cdot k \cdot T)^{3/2}}{h^3}; \quad N_V = 2 \cdot \frac{(2\pi \cdot m_p \cdot k \cdot T)^{3/2}}{h^3},$$

где m_n, m_p – эффективные массы электрона и дырки соответственно, кг;

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона.

Концентрации электронов и дырок в примесных полупроводниках

$$n = n_i \cdot e^{\frac{(W_C - W_F)}{kT}}; \quad p = n_i \cdot e^{\frac{(W_F - W_V)}{kT}};$$

где W_C – энергия дна зоны проводимости, Дж;

W_V – энергия потолка валентной зоны, Дж;

W_F – энергия уровня Ферми, Дж.

Концентрации носителей заряда связаны с собственной концентрацией носителей соотношением «действующих масс» $n \cdot p = n_i^2 = p_i^2$.

Уровень Ферми в собственном полупроводнике:

$$W_F = \frac{W_C + W_V}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_p}{m_n} = W_i + \frac{3kT}{4} \ln \frac{m_p}{m_n},$$

где W_i – уровень, соответствующий середине запрещенной зоны.

Вероятность заполнения энергетического уровня W электроном и дыркой при температуре T :

для собственного полупроводника (статистика Максвелла-Больцмана)

$$f_n(W, T) = e^{\frac{W_F - W}{kT}}; \quad f_p(W, T) = e^{\frac{W - W_F}{kT}};$$

для примесного полупроводника (статистика Ферми-Дирака)

$$f_n(W, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_F}{kT}}}; \quad f_p(W, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W_F - W}{kT}}}.$$

Уровень Ферми в примесных полупроводниках:

$$W_F^n = \frac{W_C - W_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_D}{N_C}; \quad W_F^p = \frac{W_A - W_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_A}.$$

Концентрации основных носителей n и p в электронном и дырочном полупроводниках соответственно при температурах частичной ионизации примесных атомов

$$n = \sqrt{\frac{N_C N_D}{2}} \cdot e^{-\frac{W_D}{2kT}}; \quad p = \sqrt{\frac{N_V N_A}{2}} \cdot e^{-\frac{W_A}{2kT}},$$

где N_D, N_A - концентрации донорных и акцепторных примесей, м^{-3} ;

W_D, W_A - энергии активации донорных и акцепторных примесей соответственно, Дж.

Концентрации основных носителей в примесных полупроводниках при температурах полной ионизации атомов примеси и пренебрежимо низкой концентрации собственных носителей

$$n \approx N_D, \quad p \approx N_A.$$

Условие электронейтральности

$$n + N_A^* = p + N_D^*,$$

где N_D, N_A - концентрации ионизированных донорных и акцепторных примесей.

Подвижность носителей:

$$\mu = \frac{v}{E},$$

где v - дрейфовая скорость носителей, м/с ;

E - напряженность электрического поля, В/м .

В слабых электрических полях дрейфовая скорость намного меньше тепловой, и подвижность определяется формулой

$$\mu = \frac{e \cdot l_{\text{ср}}}{m^* \cdot v_{\text{тепл}}},$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона;

m^* - эффективная масса частицы, кг;

$l_{\text{ср}}$ - средняя длина свободного пробега частицы, м;

$v_{\text{тепл}} = (3kT/m^*)^{1/2}$ - средняя тепловая скорость частицы, м/с .

Подвижность определяется рассеянием на фононах, нейтральных и ионизированных примесях, дефектах структуры и сложным образом зависит от температуры.

С подвижностью связаны коэффициенты диффузии носителей

$$D_n = \left(\frac{kT}{e}\right) \cdot \mu_n; \quad D_p = \left(\frac{kT}{e}\right) \cdot \mu_p \quad [\text{м}^2/\text{с}].$$

ЭДС Холла в полупроводниках с носителями заряда одного знака

$$U_H = \frac{R_H I B}{\delta},$$

где I - протекающий ток, А;

B - магнитная индукция, Тл;
 δ – толщина пластины, м;
 R_H , м³/Кл – коэффициент Холла.

Он положителен для полупроводников p -типа и отрицателен для полупроводников n -типа. Он связан с концентрацией носителей заряда соотношением:

$$n = \frac{1}{R_H \cdot e}.$$

При освещении полупроводника он приобретает добавочную проводимость γ_Φ :

$$\gamma_\Phi = \gamma - \gamma_0 = e \cdot (\Delta n \cdot \mu_n + \Delta p_0 \cdot \mu_p),$$

где γ_0 и γ – электрическая проводимость до и после освещения;

Δn , Δp - концентрации фотовозбужденных электронов и дырок.

Дифференциальная термо-э.д.с. (отнесенная к единичной разности температур):

$$\alpha_t = \frac{k}{\gamma} \cdot \left\{ n \cdot \mu_n \cdot \left(2 + \ln \frac{N_C}{n_i} \right) - p \cdot \mu_p \cdot \left(2 + \ln \frac{N_V}{p_i} \right) \right\};$$

первое слагаемое характеризует вклад, вносимый электронами, а второе – дырками.

Для примесных полупроводников одним из слагаемых, в зависимости от типа проводимости, можно пренебречь; например, для полупроводника n -типа дифференциальная термо-э.д.с.:

$$\alpha_t^n = \frac{k}{\gamma} \cdot \left\{ n \cdot \mu_n \cdot \left(2 + \ln \frac{N_C}{n_i} \right) \right\} = \frac{k}{e} \cdot \left(2 + \ln \frac{N_C}{n_i} \right).$$

Высота потенциального барьера p - n перехода, или контактная разность потенциалов в равновесном состоянии

$$U_K = \chi_p - \chi_n = W_{Fn} - W_{Fp};$$

$$U_K = kT \ln \frac{n_{no}}{n_{po}} = kT \ln \frac{p_{po}}{p_{no}} = kT \ln \frac{n_{no} \cdot p_{po}}{n_i^2} = kT \ln \frac{\rho_i^2 (b+1)^2}{\rho_p \rho_n b},$$

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

T - температура, К;

p_{p0} , p_{n0} - концентрации дырок в p и n слоях, м⁻³;

n_{n0} , n_{p0} - концентрации электронов в n и p слоях, м⁻³;

ρ_i , ρ_n , ρ_p - удельные сопротивления соответственно собственного полупроводника, n и p слоев;

$b = \mu_n/\mu_p$ - отношение подвижностей электронов и дырок.

Вольтамперная характеристика идеального p - n -перехода имеет вид:

$$I = I_S \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right),$$

где I_S – обратный ток (ток насыщения);

U – высота потенциального барьера.

$$I_S = \left(\frac{e \cdot D_p \cdot p_{n0}}{L_p} + \frac{e \cdot D_n \cdot n_{p0}}{L_n} \right) \cdot S,$$

где D_p, D_n - коэффициенты диффузии дырок и электронов, м²/с;
 p_{n0}, n_{p0} - равновесные концентрации дырок и электронов в n и p слоях;

S - площадь перехода, м²;

L_p, L_n - диффузионные длины дырок и электронов, м,

$$L_{p(n)} = \sqrt{D_{p(n)} \cdot \tau_{p(n)}},$$

где τ_p, τ_n - время жизни дырок и электронов соответственно, с.

Барьерная емкость p - n перехода:

$$C_B = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{l_0} \sqrt{\frac{U_K}{U_K - U}},$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - диэлектрическая проницаемость вакуума;

ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала;

U - приложенное обратное напряжение, В;

l_0 - равновесная ширина перехода:

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 \cdot U_K}{e} \cdot \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)},$$

где N_D, N_A - концентрации донорных и акцепторных примесей в n и p слоях, м⁻³.

Магнитные материалы

РАЗДЕЛ 4

По магнитным свойствам материалы подразделяются на слабомагнитные (диамагнетики и парамагнетики) и сильномагнитные (ферромагнетики и ферримагнетики).

Диамагнетиками являются вещества с магнитной проницаемостью $\mu < 1$, значение которой не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся водород, инертные газы, большинство органических соединений, каменная соль и некоторые металлы (медь, цинк, серебро, золото, ртуть), а также висмут, галлий, сурьма.

К парамагнетикам относятся вещества с магнитной проницаемостью $\mu > 1$, также независимой от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся кислород, оксид азота, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов, щелочные металлы, алюминий, платина.

Диамагнетики и парамагнетики имеют магнитную проницаемость, близкую к единице, и по магнитным свойствам нашли себе ограниченное применение в технике.

У сильномагнитных материалов $\mu > 1$ и зависит от напряженности магнитного поля. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы, сплавы хрома и марганца, гадолиний, ферриты различного состава.

Относительная магнитная проницаемость определяется по основной кривой намагничивания как отношение индукции B к напряженности магнитного поля H в данной точке кривой намагничивания с учетом магнитной постоянной $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м:

$$\mu_r = B/\mu_0 H.$$

Магнитную проницаемость μ_{rH} при $H \approx 0$ называют начальной проницаемостью, определяя ее при очень слабых полях, около 0,1 А/м. Наибольшее значение магнитной проницаемости носит наименование максимальной проницаемости и обозначается $\mu_{r\text{макс}}$.

При сильных полях в области насыщения магнитная проницаемость стремится к единице.

С увеличением частоты переменного поля динамическая магнитная проницаемость уменьшается из-за инерционности магнитных процессов.

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от температуры, переходя через максимум при температурах, близких к температуре (точке) Кюри. Для чистого железа точка Кюри составляет 768 °С, для никеля 358 °С, для кобальта 1131 °С. При температурах выше точки Кюри области спонтанного намагничивания нарушаются тепловым движением и материал перестает быть магнитным.

При намагничивании ферромагнитных монокристаллов наблюдается изменение их линейных размеров; это явление носит название магнитострикции. Магнитострикция монокристалла железа различна для разных направлений в кристалле. Монокристалл железа сжимается в направлении намагничивания. Магнитострикция наблюдается и у поликристаллических материалов. Из трех основных ферромагнитных элементов (Fe, Ni, Co) наибольшей магнитострикцией обладает никель. Знак магнитострикционной деформации у различных материалов может быть как положительным (растяжение в направлении поля), так и отрицательным; изменение знака может наблюдаться также у одного и того же материала (например, железа) при изменении напряженности магнитного поля.

Протекание процессов намагничивания ферромагнитного материала практически характеризуют кривыми намагничивания $B(H)$, имеющими сходный характер для всех ферромагнетиков.

Если медленно производить намагничивание ферромагнетика во внешнем магнитном поле, а затем, начиная с какой-либо точки основной кривой намагничивания, начать уменьшать напряженность поля, то индукция будет также уменьшаться, но не по основной кривой, а с отставанием, вследствие явления гистерезиса. При увеличении поля противоположного направления образец может быть размагничен, перемагничен и при новой перемене направления магнитного поля индукция снова может вернуться в исходную точку, характеризовавшую намагничивание образца, т. е. будет описана кри-

вая, представляющая собой петлю гистерезисного цикла перемагничивания. В зависимости от различных значений напряженности внешнего магнитного поля можно построить семейство петель гистерезиса.

Материалы с малым значением H_c и большой магнитной проницаемостью называются магнитомягкими материалами. Материалы с большой коэрцитивной силой и сравнительно малой проницаемостью называются магнитотвердыми материалами.

При перемагничивании ферромагнетиков в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые потери энергии. Они обусловлены потерями на гистерезис и динамическими потерями. Динамические потери вызываются вихревыми токами, индуцированными в массе магнитного материала. Потери на вихревые токи зависят от электрического сопротивления ферромагнетика. Чем выше удельное сопротивление ферромагнетика, тем меньше потери на вихревые токи.

Потери на гистерезис для каждого материала могут быть определены по площади статической петли гистерезиса с учетом масштабов по осям и частоты тока. Для вычисления потерь на гистерезис за один цикл в единице объема вещества была предложена эмпирическая формула

$$W_{H1} = \eta B_{\text{макс}}^n,$$

где η – коэффициент, зависящий от материала; $B_{\text{макс}}$ – максимальная индукция, достигаемая в течение цикла; n – показатель степени, равный 1,6 – 2.

Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть представлена в виде

$$P_H = \eta B_{\text{макс}}^n fV,$$

где f – частота тока; V – объем ферромагнетика.

Мощность, расходуемую на вихревые токи, можно вычислить по формуле

$$P_f = \xi B_{\text{макс}}^2 f^2 V$$

где ξ – коэффициент, зависящий от типа ферромагнетика (в частности, от его удельного сопротивления) и его формы; остальные величины те же.

Поскольку P_f зависит от второй степени частоты, а P_H – от первой степени, при высоких частотах приходится учитывать в первую очередь величину P_f , т. е. потери на вихревые токи.

Магнитная индукция и магнитный поток.

Единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл). Иногда применяется другая единица измерения магнитной индукции – гаусс (Гс). Эти единицы связаны следующим соотношением: 1 Тл = 1000 Гс.

Произведение магнитной индукции B на площадь S , перпендикулярную вектору магнитной индукции, называется магнитным потоком Φ . Таким образом магнитный поток

$$\Phi = BS.$$

Единицей измерения магнитного потока в системе МКСА является вебер (Вб). Другой единицей измерения магнитного поля является максвелл, причем $1 \text{ Вб} = 10^8 \text{ Макс}$.

Одинаковая по величине напряженность магнитного поля H вызывает в разных материалах различную по величине магнитную индукцию B . Отношение B/H называется магнитной проницаемостью материала μ .

Магнитная проницаемость материала μ равна произведению магнитной проницаемости вакуума μ_0 и относительной магнитной проницаемости материала μ_r

$$\mu = \mu_0 \mu_r.$$

Магнитная проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ (генри на метр). Величина μ_r показывает, во сколько раз μ материала больше, чем μ_0 вакуума.

Напряженность магнитного поля H вызовет в материале, магнитная проницаемость которого равна μ_r , магнитную индукцию

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H,$$

а в вакууме (приблизительно, как в воздухе)

$$B = \mu_0 H = 4\pi \cdot 10^{-7} H,$$

где B выражается в тесла, а H в А/м.

Ввиду того что магнитную индукцию часто измеряют в гауссах, а напряженность магнитного поля в А/см, выражение для магнитного поля в воздухе может иметь следующий вид:

$$B = 0,4\pi H \approx 1,25 \cdot H,$$

где B выражается в гауссах, а H в А/см.

Для ферромагнитных материалов относительная магнитная проницаемость во много раз больше единицы, причем она изменяется с изменением индукции B . Следовательно, зависимость между B и H для ферромагнитных материалов нельзя выразить с помощью уравнений. Она изображается графически с помощью кривой намагничивания.

В практических задачах (магнитные цепи электрических машин и аппаратов) для расчета силы тяги, э.д.с., силы притяжения и т. п. требуется знать величину магнитного потока Φ или индукцию B . Эти величины определяют по кривой намагничивания, если известна напряженность магнитного поля H , которая в свою очередь задается магнитным напряжением (ампер-витками) $I \cdot w = H \cdot l$.

В электрических машинах и аппаратах магнитный поток Φ сосредоточивается в магнитопроводе (ферромагнитном сердечнике) и воздушных зазорах этого магнитопровода. Этот путь магнитного потока называется магнитной цепью.

Магнитная цепь подобна электрической цепи. Магнитный поток Φ напоминает электрический ток I , индукция B напоминает плотность тока, намагничивающая сила (н.с.) F_m ($Hl = Iw$) соответствует э. д. с.

В простейшем случае магнитная цепь имеет везде одинаковое сечение и выполнена из однородного магнитного материала. Для определения н. с.

Iw , необходимой для обеспечения требуемой индукции B , по кривой намагничивания определяют соответствующую напряженность H и умножают ее на среднюю длину магнитной силовой линии l :

$$Hl = Iw = F_m.$$

Отсюда определяют требуемый ток I или число витков w катушки.

Сложная магнитная цепь обычно имеет участки с разными сечениями и магнитными материалами. Эти участки обычно соединены последовательно, поэтому по каждому из них проходит одинаковый магнитный поток Φ . Индукция B на каждом участке зависит от сечения участка и рассчитывается для каждого участка в отдельности по формуле $B = \Phi : S$.

Для разных значений индукции по кривой намагничивания определяют напряженность H и умножают ее на среднюю длину силовой линии соответствующего участка цепи. Суммируя отдельные произведения, получают полную н. с. магнитной цепи:

$$F_m = Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \dots,$$

по которой определяют намагничивающий ток или число витков катушки.

Сила тяги электромагнитов.

Сила, с которой электромагнит притягивает ферромагнитные материалы, зависит от магнитного потока Φ или, что то же самое, от индукции B и площади сечения электромагнита S .

Сила тяги электромагнита определяется по формуле

$$F = 40550 B^2 S$$

где F - сила тяги электромагнита, кгс;

B - индукция, Тл;

S - площадь сечения электромагнита, м².

Сила измеряется также в ньютонах, 1 кгс = 9,81 Н, или 1 Н = 0,102 кгс.

Наведенная э.д.с и самоиндукция.

При движении провода в магнитном поле, когда он пересекает магнитные линии, в нем возникает (наводится) э.д.с. Последняя возникает и в случае, если провод неподвижен, но изменяется магнитный поток, проходящий через контур, образуемый проводом и соединительными проводами. Это явление называется электромагнитной индукцией.

Наведенная э.д.с. E , возникающая при пересечении проводом магнитных линий в плоскости, перпендикулярной им, равна произведению индукции B магнитного поля, активной длины провода l и скорости перемещения провода v :

$$E = Blv.$$

Если представить процесс электромагнитной индукции как изменение магнитного потока, пронизывающего контур, то величина наведенной э.д.с. будет зависеть от скорости изменения магнитного потока; т. е.

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} w,$$

где $\Delta\Phi$ - изменение магнитного потока (Вб) за время Δt , сек;
 w - число витков контура, пронизываемого магнитным потоком.

Направление индуцированной э.д.с., возникшей в результате движения провода в магнитном поле, определяют по правилу правой руки. Если расположить правую руку так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, а отогнутый большой палец показывал направление движения провода, то вытянутые четыре пальца покажут направление наведенной э.д.с.

При изменении тока катушки (провода) магнитный поток также изменяется. Всякое изменение магнитного потока, проходящего через контур или катушку, вызывает появление в этой катушке э. д. с.

Явление возникновения э. д. с. в контуре вследствие изменения тока в этом контуре называется самоиндукцией, а наведенная э.д.с. - э.д.с. самоиндукции. При неизменном токе поток не меняется и э.д.с. самоиндукции не возникает. Э.д.с. самоиндукции направлена всегда так, чтобы препятствовать изменению тока магнитного потока.

При увеличении тока в цепи э.д.с. самоиндукции E_{L1} имеет направление, противоположное направлению тока или напряжения источника на зажимах U .

При уменьшении тока (увеличении сопротивления) направление э.д.с. самоиндукции E_{L2} совпадает с направлением уменьшающегося тока. Явление самоиндукции аналогично явлению инерции, так как стремится сохранить неизменным электрическое состояние (направление и величину тока) в цепи.

Электродвижущая сила самоиндукции определяется, как и всякая э.д.с., по формуле

$$E_L = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} w,$$

где E_L - э. д. с. самоиндукции, В;

$\Delta\Phi$ - изменение магнитного потока (вб) за время Δt , сек.

Так как изменение потока $\Delta\Phi$ вызвано изменением тока катушки ΔI , то выражение э. д. с. самоиндукции можно записать в другом виде:

$$E_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Величина L называется индуктивностью катушки. Индуктивность катушки определяется по формуле

$$L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta I} w$$

а для воздушных катушек, у которых поток пропорционален току,

$$L = \frac{\Phi}{I} w.$$

Единицей измерения индуктивности L является генри (Гн). Индуктивностью 1 Гн обладает такая катушка, в которой наводится э.д.с. самоиндукции 1 В при скорости изменения тока 1 А/сек.

Методические указания для подготовки к практическим занятиям

В процессе подготовки и проведения практических занятий студенты закрепляют полученные ранее теоретические знания, приобретают навыки их практического применения, опыт рациональной организации учебной работы, готовятся к сдаче зачёта, зачета с оценкой.

В начале семестра студенты получают сводную информацию о формах проведения занятий и формах контроля знаний. Тогда же студентам предоставляется список тем лекционных и практических заданий, а также тематика рефератов. Каждое практическое занятие по соответствующей тематике теоретического курса состоит из вопросов для подготовки, на основе которых проводится устный опрос каждого студента. Также после изучения каждого раздела студенты для закрепления пройденного материала:

решают тесты, контрольные задачи;
защищают реферативные работы по дополнительным материалам курса.

Поскольку активность студента на практических занятиях является предметом внутрисеместрового контроля его продвижения в освоении курса, подготовка к таким занятиям требует от студента ответственного отношения.

При подготовке к занятию студенты в первую очередь должны использовать материал лекций и соответствующих литературных источников. Самоконтроль качества подготовки к каждому занятию студенты осуществляют, проверяя свои знания и отвечая на вопросы для самопроверки по соответствующей теме.

Входной контроль осуществляется преподавателем в виде проверки и актуализации знаний студентов по соответствующей теме. Входной контроль осуществляется преподавателем проверкой качества и полноты выполнения задания.

Типовой план практических знаний:

Изложение преподавателем темы занятия, его целей и задач.

Выдача преподавателем задания студентам, необходимые пояснения.

Выполнения задания студентами под наблюдением преподавателя. Обсуждение результатов. Резюме преподавателя.

Общее подведение итогов занятия преподавателем и выдача домашнего задания.

Студент при подготовке к практическому занятию может консультироваться с преподавателем и получать от него наводящие разъяснения.

Задачи для практических занятий

1. Вычислить длину свободного пробега электронов в меди при $T=300$ К, если ее удельное сопротивление при этой температуре равно $0,017$ мкОм·м.

2. В медном проводнике под действием электрического поля проходит электрический ток плотностью 1 А/мм². Определить скорость дрейфа и ее отношение к средней суммарной скорости движения электронов при температуре 300 К.

3. При включении в электрическую цепь проводника диаметром $0,5$ мм и длиной 43 мм разность потенциалов на концах проводника составила $2,4$ В при токе 2 А. Определить удельное сопротивление материала проводника.

4. К медной проволоке длиной 6 м и диаметром $0,56$ мм приложено напряжение $0,1$ В. Сколько электронов пройдет через поперечное сечение проводника за 10 с, если удельное сопротивление меди равно $0,017$ мкОм·м?

5. Стержень из графита соединен последовательно с медным стержнем такого же сечения. Определить, при каком отношении длин стержней сопротивление этой композиции не зависит от температуры. Удельные сопротивления меди и графита равны соответственно $0,017$ и $8,0$ мкОм·м, а значения α_p для этих материалов составляют $4,3 \cdot 10^{-3}$ и -10^{-3} К⁻¹.

6. Определить температурный коэффициент линейного расширения α_l и удлинение нихромовой проволоки, если известно, что при повышении температуры от 20 до 1000 °С электрическое сопротивление проволоки изменяется от 50 до $56,6$ Ом. Длина в холодном состоянии $l = 50$ м. Температурный коэффициент удельного сопротивления нихрома $\alpha_p = 15 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹.

7. При нагревании провода из манганина длиной $1,5$ м и диаметром $0,1$ мм от 20 до 100 °С его сопротивление уменьшается на $0,07$ Ом, а длина возрастает на $0,16\%$. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления. При комнатной температуре удельное сопротивление манганина $\rho = 0,47$ мкОм·м.

8. К графитовому стержню длиной $0,2$ м приложено напряжение 6 В. Определить плотность тока в стержне в первый момент после подачи напряжения, если удельное сопротивление графита равно $4 \cdot 10^{-4}$ Ом·м. Как и почему меняется плотность тока в стержне со временем?

9. Определить внутреннюю контактную разность потенциалов, возникающую при соприкосновении двух металлов с концентрацией свободных электронов $n_1 = 5 \cdot 10^{28}$ м⁻³ и $n_2 = 1 \cdot 10^{29}$ м⁻³.

10. Ток в цепи, состоящей из термопары сопротивлением 5 Ом и гальванометра сопротивлением 8 Ом, равен $0,5$ мА в случае, когда спай термопары помещен в сосуд с кипящей водой. Чему равна удельная термо-э.д.с. термопары, если температура окружающей среды 20 °С?

11. Из никелевой ленты шириной 1 см и толщиной 1 мм необходимо изготовить шунт сопротивлением $0,4$ Ом. Какой длины должна быть никелевая лента, если удельное сопротивление никеля $0,068$ мкОм·м?

12. В цепь включены последовательно медный и нихромовый провода равной длины и диаметра. Найти отношение количеств теплоты, выделяющейся в этих проводах, и отношение падений напряжений на них. Удельное сопротивление меди и нихрома равно соответственно 0,017 и 1 мкОм·м.

13. Сопротивление вольфрамовой нити электрической лампочки при 20°C равно 35 Ом. Определить температуру нити лампочки, если известно, что при ее включении в сеть напряжением 220 В в установившемся режиме по нити проходит ток 0,6 А. Температурный коэффициент удельного сопротивления вольфрама при 20°C равен $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, температурным коэффициентом линейного удлинения можно пренебречь.

14. Вычислить падение напряжения на полностью включенном реостате, изготовленном из константовой проволоки длиной 10 м при плотности тока 5 А/мм². Удельное сопротивление константана 0,5 мкОм·м.

15. Лампа с вольфрамовой нитью рассчитана на мощность 65 Вт и напряжение 220 В. Какие сопротивление и ток имеет лампа в холодном состоянии и при рабочей температуре 2500°C?

16. Электрический паяльник мощностью 120 Вт должен нагреваться с 20 до 200°C. Сколько времени будет длиться нагрев, если рабочий элемент выполнен из материала с удельной теплоемкостью $c = 0,093 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ и весит 200 г?

17. В индукционной печи надо расплавить 10 кг меди. Сколько электроэнергии для этого необходимо? Какую мощность должна иметь печь, чтобы медь расплавилась за 1 ч? Удельная теплоемкость меди $c = 0,093 \text{ ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$, температура плавления 1083°C, удельная теплота плавления 41 ккал/кг. К.п.д. печи 85%.

18. Нужно отхромировать 20 фар, из которых на каждую требуется 3 г хрома. Какой ток необходим, чтобы эта работа была выполнена за 10 ч (электрохимический эквивалент хрома $A = 0,18 \text{ мг/А} \cdot \text{сек}$)?

19. Нормально вектору напряженности однородного электрического поля E_0 расположена пластина изотропного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ . Напряженность поля внутри пластины $E = 75 \text{ В/м}$, поверхностная плотность связанных зарядов $\sigma = 3,32 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2$. Определите значение диэлектрической проницаемости ϵ и напряженность внешнего электрического поля.

20. Между обкладками плоского конденсатора без воздушных промежутков зажат лист гетинакса толщиной $h = 1 \text{ мм}$. На конденсатор подано напряжение $U = 200 \text{ В}$. Диэлектрическая проницаемость гетинакса $\epsilon = 6$. Определите поверхностную плотность заряда на обкладках конденсатора σ и на диэлектрике σ_d .

21. Определить емкость конденсатора, состоящего из двух пластин, каждая из которых имеет площадь $S = 400 \text{ см}^2$. Пластины разделены слоем воздуха толщиной $d = 0,1 \text{ см}$.

22. Зазор между пластинами конденсатора заполнен слоями электрокартона и слоем слюды одинаковой толщины. Напряжение между пластина-

ми конденсатора 1 кВ. Электрокартон имеет диэлектрическую проницаемость 2, а слюда 8. Как распределится напряжение U между слоями изоляции и какую напряженность будет иметь электрическое поле в отдельных слоях?

23. Цилиндрический стержень диаметром 10 мм и длиной 20 мм из диэлектрика с удельным объемным сопротивлением 10^{13} Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением 10^{14} Ом покрыт с торцов металлическими электродами. Чему равно сопротивление между электродами?

24. Пленочный конденсатор из поликарбоната с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$ теряет за время 30 мин половину сообщенного ему заряда. Полагая, что утечка заряда происходит только через пленку диэлектрика, определить его удельное сопротивление.

25. Диэлектрик в форме прямоугольного параллелепипеда длиной $l = 5$ см и площадью поперечного сечения $b \times h = 2 \times 0,5$ см² с торцов покрыт металлическими электродами. При напряжении $U_0 = 1500$ В через диэлектрик проходит ток $I_0 = 10^{-9}$ А. Найти удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, если его удельное объемное сопротивление $\rho_v = 10^{10}$ Ом·м.

26. Диэлектрик в форме прямоугольного параллелепипеда длиной $l = 5$ см и площадью поперечного сечения $b \times h = 2 \times 0,5$ см² с торцов покрыт металлическими электродами. При напряжении $U_0 = 1500$ В через диэлектрик проходит ток $I_0 = 10^{-9}$ А. Найти удельное объемное сопротивление диэлектрика, если его удельное поверхностное сопротивление $\rho_s = 2,14 \cdot 10^{12}$ Ом·м.

27. Пленка поливинилхлорида при электрическом пробое разрушается при напряжении 1,5 кВ. Определить толщину пленки, если ее электрическая прочность равна 50 МВ/м.

28. При каком максимальном напряжении может работать слюдяной конденсатор емкостью $C = 1000$ пФ с площадью обкладок $S = 6 \cdot 10^{-4}$ м², если он должен иметь четырехкратный запас по электрической прочности. Диэлектрическая проницаемость слюды $\epsilon = 7$, ее электрическая прочность $E_{пр} = 100$ МВ/м. Какова толщина h слюдяной пластинки?

29. Известно, что при тепловом пробое диэлектрик толщиной 4 мм пробивается при напряжении 15 кВ на частоте 100 Гц. При каком напряжении промышленной частоты пробьется такой же диэлектрик толщиной 2 мм?

30. Известно, что при тепловом пробое диэлектрик толщиной 4 мм пробивается при напряжении 15 кВ на частоте 100 Гц. Какую толщину должен иметь этот диэлектрик, чтобы пробиваться при этом же напряжении на промышленной частоте?

31. Для примесного полупроводника определить вероятность заполнения электронами энергетического уровня, расположенного на 10 кТ выше уровня Ферми. Как изменится вероятность заполнения этого уровня электронами, если температуру увеличить в два раза?

32. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при $T = 300$ К, если ширина его запрещенной зоны $\Delta W = 1,12$ эВ, а эффективные массы плотности состояний $m_c = 1,05m_0$, $m_v = 0,56m_0$.

33. Определить удельное сопротивление полупроводника n-типа, если

концентрация электронов проводимости в нем равна 10^{22} м^{-3} , а их подвижность $\mu_n = 0,5 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

34. Оценить среднее время и длину свободного пробега электронов при температуре $T = 300 \text{ К}$, если их подвижность $\mu = 0,1 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а эффективная масса $m^* = 0,26m_0$.

35. При напряженности электрического поля 100 В/м плотность тока через полупроводник составляет $6 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$. Определить концентрацию электронов проводимости в полупроводнике, если их подвижность $\mu_n = 0,375 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Дырочной составляющей тока пренебречь.

36. Определить собственную удельную проводимость германия при комнатной температуре, используя значения концентрации и подвижностей носителей заряда из условия предыдущей задачи.

37. Прямоугольный образец полупроводника n-типа с размерами $a = 50 \text{ мм}$, $b = 5 \text{ мм}$ и $\delta = 1 \text{ мм}$ помещен в магнитное поле с индукцией $B = 0,5 \text{ Тл}$. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости образца. Под действием напряжения $U_a = 0,42 \text{ В}$, приложенного вдоль образца, по нему протекает ток $I_a = 20 \text{ мА}$. Измерения показывают ЭДС Холла $U_H = 6,25 \text{ мВ}$. Найти удельную проводимость, подвижность и концентрацию носителей заряда для этого полупроводника, полагая, что электропроводность обусловлена носителями только одного знака.

38. Образец арсенида галлия с удельным сопротивлением $5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ характеризуется коэффициентом Холла $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$. Определить напряженность поля Холла, возникающего при пропускании через образец тока плотностью 10 мА/мм^2 и воздействии магнитного поля с индукцией 2 Тл .

39. При перепаде температур $\Delta E = 3 \text{ К}$ по толщине кремниевой пластины n-типа между плоскостями образца возникает термо-э.д.с. $\Delta U_t = 2,5 \text{ мВ}$. Определить концентрацию доноров в материале, если средняя температура образца $T = 500 \text{ К}$.

40. Напряженность магнитного поля в катушке $H = 500 \text{ А/м}$. Какова будет магнитная индукция, если в катушку введем сердечник из трансформаторной стали, относительная магнитная проницаемость которой $\mu_r = 2400$?

41. Каков будет магнитный поток Φ в предшествующем примере, если сечение сердечника $S = 4 \text{ см}^2$?

42. По прямому проводу протекает ток $I = 100 \text{ А}$. Каковы будут напряженность магнитного поля и индукция в воздухе на расстоянии 10 см от провода?

43. Какой ток проходит через катушку без сердечника, имеющую индуктивность $L = 60 \text{ мГн}$, если она подключена к сети с переменным напряжением 220 В с частотой $f = 50 \text{ Гц}$? Какой будет ток, если в катушку вложен сердечник с относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 1000$?

Некоторые физические константы

Наименование константы	Обозначение	Размерность	Численное значение
Электрическая постоянная	ϵ_0	Ф/м	$8,854 \cdot 10^{-12}$
Масса покоя электрона	m_0	кг	$9,109 \cdot 10^{-31}$
Заряд электрона	e	Кл	$1,602 \cdot 10^{-19}$
Число Авогадро	N_0	моль ⁻¹	$6,022 \cdot 10^{23}$
Постоянная Планка	h	Дж·с	$6,62 \cdot 10^{-34}$
		эВ·с	$4,14 \cdot 10^{-15}$
Постоянная Больцмана	k	Дж/К	$1,38 \cdot 10^{-23}$
		эВ/К	$8,62 \cdot 10^{-5}$
Постоянная Фарадея	F	Кл/моль	$9,648 \cdot 10^4$
Число Лоренца	L_0	В ² /К ²	$2,45 \cdot 10^8$
Универсальная газовая постоянная	R	Дж/(моль·К)	8,314

Примечание: $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Список литературы

1.	Легостаев, Н.С. Материалы электронной техники. [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Легостаев Н.С.- Электрон. текстовые данные.- Томск: Эль Контент, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2024. - 184 с.- Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/13943 . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
2.	Материаловедение [Электронный ресурс]: учебное пособие/ И.М. Жарский [и др.]. - Электрон. текстовые данные. - Минск: Вышэйшая школа, 2021. - 558 с. - Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/48008 . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
3.	Материаловедение. Технология конструкционных материалов [Текст]: учеб. пособие/А.В. Шишкин, В.С. Чередниченко, А.Н. Черепанов и др.; под ред. В.С. Чередниченко. – 4-е изд. стер. – М.: Омега-Л, 2020. – 752 с.
4.	Орликов, Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники. В 2 ч. Часть 1. [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Орликов Л.Н. - Электрон. текстовые данные.- Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. - 98 с. - Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/13990 . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
5.	Орликов, Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники. В 2 ч. Часть 2. [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Орликов Л.Н.- Электрон. текстовые данные.- Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012.- 100 с.- Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/13991 . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
6.	Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Серебряков А.С. - Электрон. текстовые данные. - М.: Маршрут, 2005. - 280 с. - Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/16281 . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
7.	Электротехническое и конструкционное материаловедение [Электронный ресурс]: учебное пособие по курсу «Электротехническое и конструкционное материаловедение» для студентов дневной формы обучения направления подготовки 140400.62- Электроэнергетика и электротехника/ - Электрон. текстовые данные. - Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2011. - 123 с. - Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/28422 . - ЭБС «IPRbooks», по паролю
8.	Туляков, Г.А. Конструкционные материалы для энергомашиностроения [Текст]/ Г.А. Туляков, В.Н. Скоробогатых, В.В. Гриневский.- М.: Машиностроение, 1991.- 240 с.
9.	Электротехнические и конструкционные материалы [Текст]: учеб. пособие для студ. учреж. сред. проф. образ./ В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, под ред. В.А. Филикова.- М.: Мастерство, 2000.- 280 с.

ДУДОВ Мурат Хусеевич

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум для обучающихся направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения

Корректор Чагова О.Х.
Редактор Чагова О.Х.

Сдано в набор 13.08.2025 г.
Формат 60х84/16
Бумага офсетная.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,62
Заказ № 5171
Тираж 100 экз.

Оригинал-макет подготовлен
в Библиотечно-издательском центре СКГА
369000, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36