Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра электронной техники и технологии

В.В. Баранов, Г.М. Шахлевич, Е.В. Телеш

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ПРАКТИКУМ

для студентов специальностей
«Проектирование и производство РЭС»,
«Электронно-оптическое аппаратостроение»,
«Медицинская электроника»
всех форм обучения

Минск 2004

УДК 620.22 (621.382)
ББК 32.85 я 73
Б 82

Баранов В.В.

Б82 Материаловедение: Практикум для студ. спец. “Проектирование и производство РЭС”, “Электронно-оптическое аппаратостроение”, “Медицинская электроника” всех форм обуч./ В.В.Баранов, Г.М.Шахлевич, Е.В.Телеш. – Мн.: БГУИР, 2004.- 34 с.: ил.
ISBN 985-444-632-8

Практикум охватывает пять тем (химическая связь и строение вещества, проводниковые, полупроводниковые, диэлектрические и магнитные материалы) в соответствии с основными разделами курса «Материаловедение».

Предназначен для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков расчета основных функциональных характеристик электрорадиотехнических материалов.

ISBN 985-444-632-8

Тема 1. *ХИМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ И СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА*

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

Существует 4 основных вида химической связи: ионная (гетерополярная), ковалентная (гомополярная), металлическая и молекулярная (ван-дер-ваальсова). Первые три называются первичными, так как они относительно прочные и возникают вследствие обмена или объединения валентных электронов. Число находящихся в связи соседних ионов называется *координационным числом.*

Полная энергия ионной связи $$E_i = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{a} + \frac{b}{a^n},$$

где Z_1 и Z_2 – заряды взаимодействующих ионов; a – расстояние между ними; b – константа сил отталкивания; $6 < n < 12$ (b и n определяются экспериментально).

Силы, возникающие между разноименно заряженными ионами,

$$F = \frac{dE}{da} = -\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{a^2} - n\frac{b}{a^{n+1}}.$$

В ионных бинарных соединениях устойчивы только кристаллические решетки, в которых меньший по размеру катион окружен более крупными катионами, т.е. координационное число зависит от соотношения их радиусов.

Ковалентная связь – направленная, т.к. образуется за счет спаривания электронов соседних атомов. Координационное число в таких кристаллах зависит также от валентности атомов.

Полное кристаллографическое описание кристалла дают форма и размеры элементарной ячейки, а также распределение в ней частиц вещества. Элементарная ячейка строится на векторах элементарных трансляций ***a, b*** и ***c*** и представляет собой наименьший объем кристалла, обладающий всеми его свойствами. В общем случае ее характеризуют, кроме векторов ***a, b*** и ***c,*** три угла между ними α, β, γ.

Уравнение плоскости, пересекающей оси x, y, z кристаллической решетки в точках u, v, w:

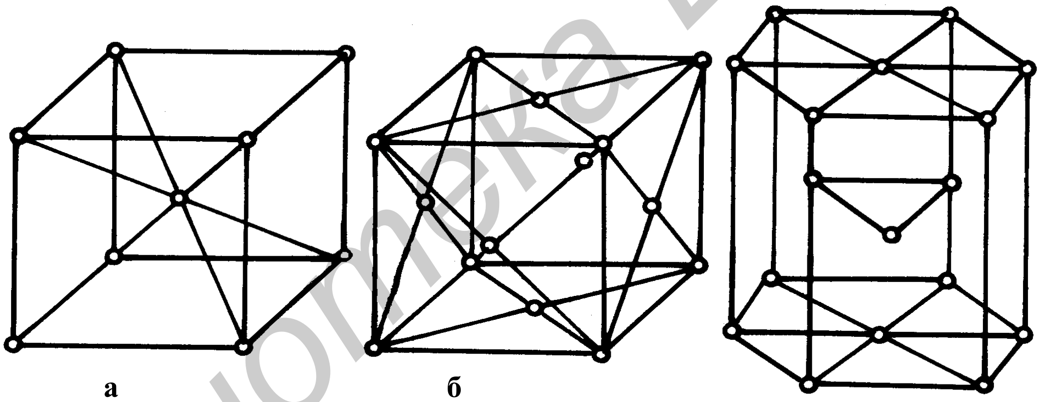
$$\frac{x}{u} = \frac{y}{v} = \frac{z}{w}, \text{ отсюда } h \cdot x + k \cdot y + l \cdot z = 1,$$

где h, k, l – числа, обратные величине отрезков, отсекаемых плоскостью на соответствующих осях, называемые *индексами Миллера.* Индексами *(hkl)* обозначают как отдельную плоскость, так и набор параллельных плоскостей.

Для задания направления в кристалле выбирается прямая, проходящая через начало координат и первый узел, лежащий на этой прямой. То есть направление *[hkl]* определяется как набор наименьших целых чисел, пропорциональных длинам векторов, направленных вдоль осей элементарной ячейки, которые в сумме составляют вектор этого направления. В кубических кристаллах направление перпендикулярно плоскости, имеющей те же индексы *(hkl)*.

Совокупность физически эквивалентных направлений (семейство направлений) обозначается как *<hkl>,* а плоскости, эквивалентные по характеру симметрии (например, шесть граней куба), составляют семейство плоскостей и обозначаются *{hkl}*.

Большинство металлов и сплавов кристаллизуется в высокосимметричных решетках с плотной упаковкой атомов: кубических объемноцентрированных (ОЦК), гранецентрированных (ГЦК) и гексагональных ГПУ (см. рисунок).



а **б** **в**

Типы кристаллических решеток металлов и сплавов:
а – ОЦК, б – ГЦК, в – ГПУ.

Закон дифракции Вульфа–Брэгга:

$$2d_{hkl}\cdot\sin\theta = n\lambda,$$

где d_{hkl} – расстояние между плоскостями *(hkl)*; θ – угол отражения; λ – длина волны излучения. Для кубических решеток

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}.$$

Число атомов, содержащихся в объеме вещества массой m: $n = \dfrac{m\cdot N_O}{A}$, где N_o – число Авогадро; A – атомная или молекулярная масса.

Концентрация точечных дефектов по Френкелю и Шоттки

$$n_Ф = \sqrt{N \cdot N'} \cdot \exp(-\frac{W_Ф}{2kT});$$

$$n_Ш = N \cdot \exp(-\frac{W_Ш}{kT}),$$

где N и N' - концентрации узлов и междоузлий в решетке; $W_Ф$ и $W_Ш$ – энергии образования соответствующего дефекта.

Примеры решения задач

Задача 1.1. Пара противоположно заряженных двухвалентных ионов находится в связи на равновесном расстоянии *а = 0,24 нм*. Показатель степени в выражении для энергии отталкивания *n = 9*. Найти энергию разделения ионов.

Решение

В состоянии равновесия при *а = 0,24 нм* силы притяжения и отталкивания уравновешены $F = \frac{dE}{da} = -\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{a^2} - n\frac{b}{a^{n+1}} = 0$.

Получаем $\frac{4e^2}{a^2} = \frac{9b}{a^{10}}$ и $b = \frac{4a^8 e^2}{9}$, тогда

$$E_\infty - E_o = 0 - \left[-\frac{4e^2}{a} - \frac{4a^8 e^2}{9a^9}\right] = \frac{32e^2}{9a} = \frac{32\left(1{,}6 \cdot 10^{19}\right)^2}{9 \cdot 0{,}24 \cdot 10^{-9}} = 38 \cdot 10^{-29} \text{ Дж.}$$

Задача 1.2. Каждая С-С-связь в кристалле алмаза имеет энергию $W_{св}$ = = *3,7 эВ*. Сколько энергии необходимо затратить для испарения *m = 0,1 г* алмаза?

Решение

Число атомов в объеме вещества массой *m* выражается через число Авогадро $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{26}$ $(кг \cdot моль)^{-1}$ и молярную массу *M* (для углерода М = 12)

$$n = \frac{m \cdot N_O}{M} = \frac{0{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 6{,}02 \cdot 10^{26}}{12} = 5 \cdot 10^{21}.$$

Каждый атом углерода в ковалентном алмазе участвует в четырех связях, но поскольку испарение происходит с поверхности вещества, необходимо разорвать в среднем две связи. Поэтому для испарения необходима энергия (одновременно переводим электрон-вольты в джоули)

$$W_{исп} = 2n \cdot W_{св}(эВ) \cdot e(Кл) = 2 \cdot 5 \cdot 10^{21} \cdot 3{,}7 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} = 5920 Дж.$$

Задача 1.3. Удельная поверхностная энергия стекла при температуре 650°С равна $e_S = 0{,}3$ *Дж·м*$^{-2}$. Какая энергия ΔE выделится при сфероидизации нити длиной $l = 0{,}1$ *м* и диаметром $d = 2\cdot10^{-5}$ *м?*

Решение

Объем нити $V_H = \pi r^2 \cdot l$, а шара $V_Ш = \frac{4}{3}\pi R^3$. Поскольку $V_H = V_Ш$:

$$\pi r^2 \cdot l = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad \text{и} \quad R = \sqrt[3]{\frac{3}{4} r^2 l} \approx 2\cdot10^{-4} \text{ м.}$$

Площадь поверхности нити $S_H \approx 2\pi r \cdot l$, а шара $S_Ш = 4\pi R^2$.

При сфероидизации выделится энергия, равная разности их поверхностных энергий:

$$\Delta E = E_H - E_Ш = e_S \cdot S_H - e_S \cdot S_Ш = e_S(2\pi \cdot r \cdot l - 4\pi \cdot R^2) = 2\pi \cdot e_S(r \cdot l - 2R^2) =$$
$$= 2\cdot 3{,}14 \cdot 0{,}3(10^{-6} - 2\cdot 4\cdot 10^{-8}) = 1{,}7\cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

Задача 1.4. Вычислите изменение объема железа при его полиморфном превращении, если радиусы атомов Fe в плотной объемно центрированной упаковке $r_{ОЦК} = 0{,}1241$ *нм,* а в гранецентрированной - $r_{ГЦК} = 0{,}127$ *нм.*

Решение

Определим размеры элементарных ячеек железа:

- в элементарной ГЦК-ячейке (см. рисунок, б) содержится $\frac{1}{8}\cdot 8 + \frac{1}{6}\cdot 6 = 4$ атома, а в ОЦК-ячейке (см. рисунок, а) $\frac{1}{8}\cdot 8 + 1 = 2$ атома;

- на диагонали грани ГЦК-ячейки, равной $a\sqrt{2}$, размещается 2 атома, т.е.

$$a\sqrt{2} = 4R \quad \text{и} \quad a_{ГЦК} = \frac{4R_{ГЦК}}{\sqrt{2}};$$

- на пространственной диагонали длиной $a\sqrt{3}$ ОЦК-ячейки также должно расположиться два атома, следовательно, $a_{ОЦК} = \frac{4R_{ОЦК}}{\sqrt{3}}$.

Тогда $V_{ГЦК} = a^3_{ГЦК} = (\frac{4R_{ГЦК}}{\sqrt{2}})^3 = (4\cdot\frac{0{,}127}{\sqrt{2}})^3 = 0{,}0462$ *нм*^{3};

$$V_{ОЦК} = a^3_{ОЦК} = (\frac{4R_{ОЦК}}{\sqrt{3}})^3 = (4\cdot\frac{0{,}1242}{\sqrt{3}})^3 = 0{,}04694 \text{ нм}^3.$$

Относительное изменение объема железа при полиморфном превращении $\Delta V / V_{ОЦК} = \dfrac{0{,}04694 - 0{,}0462}{0{,}0462} = 1{,}6$ об.%.

Задача 1.5. Вычислите концентрацию свободных электронов в алюминии, имеющем ГЦК-решетку с периодом *a = 0,4041 нм,* если на каждый атом приходится три электрона?

Решение

В ГЦК-решетке на одну элементарную ячейку (см. задачу 1.4) приходится 4 атома, поэтому количество атомов в единице объема

$$n = \frac{4}{a^3} = \frac{4}{(0{,}4041 \cdot 10^{-9})^3} = 6{,}06 \cdot 10^{28}\ \text{м}^{-3},$$

а концентрация электронов $n_e = 3n = 18{,}18 \cdot 10^{28}\ \text{м}^{-3}$.

Задача 1.6. Вычислите период кристаллической решетки меди, если ее плотность $d = 8920$ *кг/м*^{3}, элементарная ячейка – ГЦК. Какой объем приходится на один атом?

Решение

Рентгеновская плотность следующим образом связана с периодом кубической решетки: $d = \dfrac{k \cdot m}{a^3}$,

где m - масса атома; k - число атомов в элементарной ячейке.

В ГЦК-ячейке $k = 4$. Учитывая, что $m = \dfrac{A}{N_A}$, атомный вес Cu $A = 63{,}54$,

$$a = \sqrt[3]{\frac{k \cdot A}{d \cdot N_A}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 63{,}54}{8920 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{26}}} = 3{,}72 \cdot 10^{-10}\ \text{м} = 0{,}372\ \text{нм}.$$

Задача 1.7. Рефлекс от плоскости (111) на рентгенограмме меди, снятой при длине волны рентгеновского излучения $\lambda = 0{,}5405$ *нм*, наблюдается под углом $2\Theta = 43^o$.

Найти период ГЦК-решетки a и атомный радиус r_a меди.

Решение

Из уравнения Вульфа–Брэгга $\lambda = 2 \cdot d_{111} \cdot \sin\theta$, тогда

$$d_{111} = \frac{\lambda}{2\sin\theta} = \frac{0{,}15405}{2\sin 21{,}5^O} = 0{,}21\ \text{нм}.$$

Для кубической решетки $d_{hkl} = \dfrac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$, отсюда

$$a = d_{hkl}\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} = d_{111}\sqrt{3} = 0{,}36 \text{ нм}$$

(экспериментальное значение – a = 0,3556 нм).

На диагонали грани ГЦК-решетки находится (см. рисунок, б) два атома, тогда $r = \dfrac{a\sqrt{2}}{4} = 0{,}128$ нм.

Задачи для самостоятельного решения

1. Сколько атомов располагается на 1 мм^2 плоскостей (100) и (111) ГЦК-свинца, если минимальное межатомное расстояние в его решетке равно 0,35 нм?

Ответ: $8{,}2\cdot10^{12}$ и $9{,}5\cdot10^{12}$.

2. В молекуле воды угол связи $H – O – H$ равен 104,5^{О}, а расстояние между ионами O^{2-} и H^{+} - 0,107 нм. Вычислить электрический дипольный момент молекулы, предполагая связь O и H ионной.

Ответ: $6{,}2\cdot10^{-29}$ Кл·м.

3. Расстояние между ближайшими атомами в ОЦК-решетке вольфрама равно 0,2737 нм. Найдите плотность материала (считать, что структура плотноупакованная).

Ответ: 19 350 кг/м^3.

4. Ион фтора имеет радиус 0,133 нм. Каков радиус наименьшего одновалентного, положительного иона, который может соседствовать с 6-ю ионами фтора? Рассматривать предельный случай «касания» анионов.

Ответ: 0,059 нм.

5. При температуре, на 10 К меньшей температуры плавления алюминия ($T_{пл}$ = 933 К), на долю вакансий приходится 0,08 % мест в кристаллической решетке, а при 484 К – 0,01 % мест. Чему равна энергия образования вакансии? Сколько вакансий присутствует в 1 см^3 при 527 К? Считать, что вакансии образуются за счет ухода атомов к поверхности.

Ответ: $1{,}2\cdot10^{-19}$ Дж; $1{,}1\cdot10^{19}$.

6. Кристалл цинка имеет плотноупакованную гексагональную решетку (ГПУ) с постоянными a = 0,266 нм и c = 0,495 нм. Найти плотность цинка и объем элементарной ячейки. Молярная масса цинка $M = 6{,}537\cdot10^{-2}$ кг/моль.

Ответ: $3{,}03\cdot10^{-29}$ м$^{-3}$; $7{,}16\cdot10^{3}$ кг/м^3 .

7. Для пучка рентгеновских лучей с длиной волны λ = 0,1537 нм, падающего на кристалл ГЦК алюминия, наблюдается отражение первого порядка от плоскостей (111) под углом $\theta = 19^{O}20'$. Определить число Авогадро, если известно, что плотность алюминия $d = 2{,}7\cdot10^{3}$ кг/м^3, молярная масса $M = 2{,}698\cdot10^{-2}$ кг/моль.

Ответ: $6{,}1\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$.

8. Определите индексы Миллера плоскости, отсекающей на осях кубической решетки отрезки *A = a, B = 0,5 a, C = 1,5 a* и направлений, проходящих через начало координат вдоль диагоналей решетки.

Ответ: (362), [110], [101], [011], [111].

Тема 2. *ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ*

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

Характерная особенность проводников – сильно выраженная электропроводность – обусловлена высокой концентрацией свободных носителей заряда. Их основные параметры: удельные электропроводность σ *(См/м)* и сопротивление ρ *(Ом·м)*, температурный коэффициент сопротивления α_ρ (K^{-1}), скорость дрейфа $V_д$ *(м/с)*, подвижность μ *(м^2/(В·с)*, длина свободного пробега λ *(м)* носителей заряда и др. Они связаны следующими соотношениями:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}; \qquad \alpha_\rho = \frac{1}{\rho}\frac{\Delta\rho}{\Delta T}; \qquad \sigma = en\frac{V_д}{E},$$

где e – заряд; n – концентрация носителей тока; E – напряженность электрического поля.

Закон Ома в дифференциальной форме для плотности тока в проводнике $j = en\mu E = \sigma E$.

Энергия, выделяемая в проводнике при протекании по нему тока,

$$Q = U\cdot J\cdot t = \frac{U^2\cdot t}{R} = J^2\cdot R\cdot t.$$

Из классической теории проводимости электронного газа

$$\rho = \frac{2m_e\cdot\vartheta_T}{e^2\cdot n\cdot\lambda_{cp}},$$

где V_T – тепловая скорость; λ_{cp} – средняя длина свободного пробега; m_e – масса носителей тока.

Квантово-механическая теория электропроводности металлов дает

$$\rho = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{h}{e^2 \cdot n^{\frac{2}{3}} \cdot \ell_{cp}}.$$

Сопротивление протеканию электрического тока связано с рассеиванием носителей заряда на тепловых колебаниях атомов, дефектах структуры, примесях и др. При температурах, близких к 0 К, тепловые колебания практически отсутствуют, поэтому рассеивание электронов происходит только на структурных дефектах и примесях и удельное сопротивление металла можно представить в соответствии с правилом Маттисона в виде

$$\rho = \rho_{тепл}(T) + \rho_{деф} + \rho_{прим},$$

где $\rho_{тепл}(T)$ – зависящее от температуры ρ бездефектного металла; $\rho_{деф}$ и $\rho_{прим}$ – вклад в ρ, обусловленный дефектами и примесями $(\rho_{ост})$.

Ряд металлов и сплавов при температуре ниже критической переходят в сверхпроводящее состояние. При этом их сопротивление скачком уменьшается на 12-18 порядков.

Для чистых непереходных металлов α_ρ приблизительно равно $4 \cdot 10^{-4}$ K^{-1}. Переходные и ферромагнитные материалы имеют повышенное α_ρ (~10^{-2} K^{-1}).

Согласно правилу Линде, изменение на 1 ат.% концентрации примеси увеличивает $\rho_{ост}$ на $\Delta\rho_{ост} = b \cdot (\Delta Z)^2$, где ΔZ – разность валентностей основного металла и примеси, b – постоянный для данной пары коэффициент.

Глубина проникновения переменного электрического поля в проводник

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

где ω и f – угловая скорость и частота, μ – относительная магнитная проницаемость материала; μ_0 – магнитная постоянная ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн·м).

Примеры решения задач

Задача 2.1. Определить время, в течение которого электрон пройдет $\ell = 1$ км по медному проводу, если его $\rho = 0{,}017$ мкОм ·м , U = 220 В. За какое время он прошел бы это расстояние, двигаясь без соударений?

Решение

Из закона Ома $\sigma = \dfrac{1}{\rho} = en\dfrac{V_д}{E}$.

Концентрация электронов (1 электрон на атом) в меди: $n = d\dfrac{N_A}{A}$.

$$V_д = \frac{E}{\rho \cdot e \cdot n} = \frac{U \cdot A}{\rho \cdot e \cdot d \cdot N_A \cdot \ell} = 9.6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Сравним эту величину с тепловой скоростью носителей.

Так как $\rho = \dfrac{2m_e \cdot V_T}{e^2 \cdot n \cdot \ell_{cp}}$; $\ell_{cp} \approx 3.9 \cdot 10^{-8}$ м ; то $\vartheta_T = \dfrac{\rho \cdot e^2 \cdot n \cdot \ell_{cp}}{2m} \approx 7.8 \cdot 10^5$ м/с,

Время дрейфа по $\ell = 10^3$ м : $\tau = \dfrac{l}{V_д} = 10^6$ с.

При отсутствии столкновений электрон двигался бы равноускоренно под действием силы $F = eE$, тогда $E = \dfrac{U}{l}$ и

$$\tau_{пр} = \sqrt{\frac{2l}{a}} = \sqrt{\frac{2\ell^2 m}{eU}} = 2.26 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Задача 2.2. Докажите, что между ТКС α_R и ТКЛР α_ℓ проводника существует следующая взаимосвязь: $\alpha_\rho = \alpha_R + \alpha_\ell$.

Решение

По определению: $\alpha_R = \dfrac{1}{R}\dfrac{dR}{dT}$. Предположим, что резистор имеет форму прямоугольного параллелепипеда длиной ℓ и квадратное основание со стороной a. Тогда $R = \rho\dfrac{\ell}{a^2}$.

В этом выражении от температуры зависят R, ρ, ℓ и а.

Поэтому $\dfrac{dR}{dT} = \dfrac{\ell}{a^2}\dfrac{d\rho}{dT} + \dfrac{\rho}{a^2}\dfrac{d\ell}{dT} - 2\dfrac{\rho\ell}{a^3}\dfrac{da}{dT}$.

Разделим обе части на $R = \rho\dfrac{\ell}{a^2}$.

$$\frac{1}{R}\frac{dR}{dT} = \frac{\ell}{a^2} \cdot \frac{a^2}{\rho \cdot \ell}\frac{d\rho}{dT} + \frac{\rho \cdot a^2}{a^2 \cdot \rho \cdot \ell} \cdot \frac{d\ell}{dT} - 2\frac{\rho \cdot \ell \cdot a^2}{\rho \cdot \ell \cdot a^3}\frac{da}{dT}.$$

После сокращений $\alpha_R = \dfrac{1}{\rho}\dfrac{d\rho}{dT} + \dfrac{1}{\ell}\dfrac{d\ell}{dT} + 2\dfrac{1}{a}\dfrac{da}{dT}$.

Для изотропного материала $\alpha_\ell = \alpha_a$, т.е.

$\alpha_R = \alpha_\rho + \alpha_\ell$ или $\alpha_\rho = \alpha_R + \alpha_\ell$, что и требовалось доказать.

Задача 2.3. Требуется изготовить проволоку, которая выдерживает растяжение F = 50 Н без пластической деформации, причем её сопротивление должно быть ≤ 0,02 Ом. Определить и сравнить наименьший допустимый диаметр проволоки. Какая экономически более выгодна, если цена алюминия в 1,5 раза ниже цены меди? (Для отожженных Cu и Al $\sigma_T\left(Cu\right)=70$ МПа; $\sigma_T\left(Al\right)=35$ МПа).

Решение

Наименьший $D^F_{\min}$, при котором отсутствует пластическая деформация,

$$\sigma_T=\frac{4F}{\pi D^2};\quad D^F_{min}=\sqrt{\frac{4F}{\pi\sigma_T}}.$$

Наименьший D^R_{min}, при котором обеспечивается требуемое R при заданной ℓ,

$$R=\rho\frac{\ell}{S}=\rho\frac{4\ell}{\pi\left(D^R\right)^2};\quad D^R_{\min}=\sqrt{\frac{4\rho\cdot\ell}{\pi R}}.$$

Для меди $$D^F=\sqrt{\frac{4\cdot50}{3{,}14\cdot10^6\cdot70}}=0{,}95\cdot10^{-3}\ \text{м};$$

$$D^R=\sqrt{\frac{4\cdot0{,}017\cdot10^{-6}}{3{,}14\cdot0{,}02}}=1.04\cdot10^{-3}\ \text{м}.$$

Выбираем 1,04 мм.

Для алюминия $$D^F=\sqrt{\frac{4\cdot50}{3{,}14\cdot35\cdot10^6}}=1{,}35\cdot10^{-3}\ \text{м};$$

$$D^R=\sqrt{\frac{4\cdot0{,}028\cdot10^{-6}}{3{,}14\cdot0{,}02}}=1{,}335\cdot10^{3}\ \text{м}.$$

Выбираем 1,35 мм.

Выражение для расчета стоимости одного метра проволоки

$$C=C_0\cdot\pi\cdot D^2_{\min}\cdot\ell\cdot d/4,$$

где d – плотность металлов.

Тогда $$\frac{C_{Cu}}{C_{Al}}=\frac{C_{0Cu}}{C_{0Al}}\cdot\frac{d_{Cu}}{d_{Al}}\cdot\frac{D^2_{Cu}}{D^2_{Al}}=\frac{1{,}5\cdot8900\cdot(1{,}04)^2}{2700\cdot(1{,}35)^2}=2{,}93.$$

Задача 2.4. Вычислить длину свободного пробега электронов в меди при Т = 300 К, если ее удельное сопротивление при этой температуре равно 0,017 мкОм/м. Плотность меди d = 8920 кг/м^3, атомная масса М = 63,54.

Решение

Согласно представлениям квантовой теории, удельное сопротивление ρ металлов связано с длиной свободного пробега электронов λ соотношением

$$\rho = \left(\frac{3}{8\pi}\right)^{1/3} \cdot \frac{h}{e^2 n^{2/3} \lambda}.$$

Концентрация электронов проводимости в меди с учетом того, что на каждый атом приходится один свободный электрон

$$n = d\,\frac{N_0}{A} = \frac{8920 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}}{63{,}54 \cdot 10^{-3}} = 8{,}45 \cdot 10^{28}\ м^{-3}.$$

Отсюда следует, что длина свободного пробега

$$\lambda = \left(\frac{3}{8 \cdot 3{,}14}\right)^{1/3} \frac{6{,}62 \cdot 10^{-34}}{(1{,}6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot (8{,}45 \cdot 10^{28})^{2/3} \cdot 0{,}017 \cdot 10^{-6}} = 3{,}89 \cdot 10^{-8}\ м.$$

Задача 2.5. Имеется два проводника, прошедших одинаковую технологическую обработку. Химическим анализом установлено, что состав первого проводника – (Cu+0,5 ат.% Zn), а второго – (Cu+0,5 ат.% As). Определить, какой материал имеет более высокую удельную проводимость.

Решение

Согласно правилу Линде, измерение остаточного сопротивления на 1 ат. % примеси $\Delta\rho_{ост}=b(\Delta Z)^2$, где ΔZ – разность валентностей металла-растворителя (меди) и примесного атома. Константа b одинакова для атомов примесей одного периода периодической системы элементов, например для цинка и мышьяка. Так как медь одновалентна, то при введении цинка $\Delta Z = 1$, а при введении мышьяка $\Delta Z=4$. Следует принять во внимание, что остаточное сопротивление линейно зависит от концентрации x примесных атомов. Тогда

$$\rho = \rho_m + \rho_{ост} = \rho_m + b(\Delta Z)^2 x,$$

откуда

$$\rho_2 - \rho_1 = b(\Delta Z_2)^2 x_{As} - b(\Delta Z_1)^2 x_{Zn} = b \cdot (16 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-2}) = 0{,}06\,b.$$

Таким образом, первый материал обладает меньшим удельным сопротивлением, т. е. более высокой удельной проводимостью.

Задача 2.6. Стержень из графита соединен последовательно с медным стержнем того же сечения. Определить, при каком соотношении их длин сопротивление этой композиции не зависит от температуры. Удельные сопротивления меди и графита равны соответственно 0,017 и 8,0 мкОм·м, а значения α_ρ составляют $4{,}3 \cdot 10^{-3}$ и -10^{-3} К$^{-3}$.

Решение

Сопротивление композиции не будет изменяться с температурой, если

$$\Delta R(T)_{Cu} = \Delta R(T)_C.$$

При линейном изменении сопротивления с изменением температуры, если пренебречь изменением размеров проводников, можно записать

$$R_{Cu} \cdot \alpha_{Cu} \cdot \Delta T = R_C \cdot \alpha_C \cdot \Delta T\ .$$

После сокращений и подстановок

$$\frac{1}{S_{Cu}}\cdot\rho_{Cu}\cdot\alpha_{Cu}\cdot l_{Cu}=\frac{1}{S_C}\cdot\rho_C\cdot\alpha_C\cdot l_C,\text{ по условию } S_{Cu}=S_C \text{ и}$$

$$\frac{l_{Cu}}{l_{C\ \ Cu}}=\frac{\alpha_C\cdot\rho_C}{\alpha_{Cu}\cdot\rho_{Cu}}=\frac{8{,}0\cdot 10^{-3}}{4{,}3\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}017}=109{,}4\,.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Удельное сопротивление серебра при комнатной температуре равно 0,015 мкОм·м, а температурный коэффициент удельного сопротивления составляет $4{,}1\cdot 10^{-3}$ К$^{-3}$. Определить, как и во сколько раз изменяется длина свободного пробега электронов при нагревании проводника от 300 до 1000 К.

Ответ: уменьшится в 3,7 раза.

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

Ответ: $V_\partial = 7{,}4\cdot 10^{-5}$ м/с; $V_\partial/V_m = 6{,}1\cdot 10^{-11}$.

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.

Ответ: $5\cdot 10^{-6}$ Ом·м.

4. Удельное сопротивление медного проводника, содержащего 0,5 ат.% индия, равно 0,0234 мкОм·м. Определить концентрацию атомов индия в сплаве с удельным сопротивлением 0,0298 мкОм·м, полагая, что все остаточное сопротивление обусловлено рассеянием на примесных атомах.

Ответ: 0,98 ат.% или $8{,}28\cdot 10^{26}$ м$^{-3}$.

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

Ответ: $1{,}35\cdot 10^{-4}$ К$^{-1}$; 0,735 м.

6. Ток в замкнутом контуре из сверхпроводящего материала в течение года уменьшился в результате релаксации системы на 0,01 %. Принимая концентрацию электронов проводимости равной $4\cdot 10^{28}$ м$^{-3}$, оцените удельное сопротивление материала в сверхпроводящем состоянии и сравните его с ρ меди в нормальных условиях.

Ответ: $3{,}54\cdot 10^{32}$ См/м; $1{,}66\cdot 10^{-25}$.

7. Определите отношение глубин проникновения электромагнитного поля в алюминиевый и стальной проводники при частоте 50 Гц и 1 МГц. Полагать, что $\mu_o = 4\pi \cdot 10\text{-}7$ Гн/м, $\mu_{Cu} = 1$, $\mu_{Fe} = 1000$, $\rho_{Fe} = 0{,}1$ мкОм·м.

Ответ: на обеих частотах $\Delta_{Al}/\Delta_{Fe} = 16{,}33$.

8. Для отопления используют камин, включенный в сеть напряжением 220 В. Помещение теряет в сутки 10^5 кДж теплоты. Требуется поддерживать температуру в нем неизменной. Найти: сопротивление нагревательного элемента; длину нихромовой проволоки диаметром 0,7 мм, использованной для его намотки; мощность нагревателя. Считать для нихрома $\rho = 1$ мкОм·м.

Ответ: 41,8 Ом; 16,1 м; 1,16 кВт.

Тема 3. *ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ*

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

Основными электрофизическими параметрами полупроводниковых материалов являются ширина запрещенной зоны ΔE_g, положение уровня Ферми E_F, удельное объемное сопротивление ρ_V или электропроводность σ, концентрация собственных носителей заряда n_i, концентрация донорной примеси N_n, концентрация акцепторной примеси N_p, подвижность носителей μ_n и μ_p, время жизни неравновесных или неосновных носителей τ_n и τ_p.

Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике определяется выражением

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2}\ln\frac{N_V}{N_c} = E_i + \frac{kT}{2}\ln\frac{N_V}{N_c},$$

где E_i - уровень, соответствующий середине запрещенной зоны; N_v, N_c – эффективная плотность состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно:

$$N_V = \frac{2(2\pi m_p^* kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3};\; N_c = \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3},$$

где m_p, m_n – эффективные массы электронов и дырок.

Электропроводность собственного полупроводника определяется как

$$\sigma = en_i(\mu_n + \mu_p),$$

где e – заряд электрона. В то же время концентрация собственных носителей

$$n_i = \sqrt{N_c N_v}\, \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right).$$

Для собственного полупроводника применимо соотношение "*действующих масс*":

$$n_i^2 = n \cdot p.$$

Концентрации носителей в донорных *(n>>p)* и акцепторных *(p>>n)* полупроводниках

$$n = \sqrt{N_c N_d} \cdot \exp\left(-\frac{E_d}{2kT}\right), \quad p = \sqrt{N_v N_a} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right).$$

Электропроводность примесного полупроводника

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p,$$

где n - концентрация электронов, а p - концентрация дырок.

Скорость дрейфа носителей в электрическом поле с напряженностью E определяется выражением

$$V = \mu E.$$

Плотность тока носителей через полупроводник при приложенной напряженности внешнего поля Е будет

$$J = \sigma E.$$

Концентрации носителей заряда в полупроводниках связаны с одновременно протекающими процессами их генерации и рекомбинации. Скорость рекомбинации определяется в основном концентрацией и временем жизни неосновных или неравновесных носителей заряда, которое определяется по формуле

$$\tau = \frac{L^2}{D},$$

где L – диффузионная длина неосновных носителей заряда, а D - коэффициент диффузии неосновных носителей, который можно найти из *соотношения Эйнштейна* :

$$D = \frac{\mu \cdot kT}{e}.$$

Убывание концентрации неравновесных носителей заряда в зависимости от времени и расстояния до места возбуждения

$$\Delta n(t) = \Delta n_o \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad n - n_o = \Delta n_o \cdot \exp\left(-\frac{x}{\sqrt{D_n \cdot \tau_n}}\right).$$

Примеры решения задач

Задача 3.1. Найти положение уровня Ферми в собственном германии при 300 К, если известно, что ширина его запрещенной зоны ΔW = 0,665 эВ, а эффективные массы плотности состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны: $m_v = 0{,}33m_0$; $m_c = 0{,}55\ m_0$, где m_0 - масса свободного электрона.

Решение

Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике определяется по формуле

$$\mathrm{W}_F = \frac{W_c + W_v}{2} + \frac{kT}{2}\ln\frac{N_V}{N_c} = W_i + \frac{kT}{2}\ln\frac{N_V}{N_c},$$

где W_i - уровень, соответствующий середине запрещенной зоны;

$$N_V = \frac{2(2\pi m_v kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3};\ N_c = \frac{2(2\pi m_c kT)^{\frac{3}{2}}}{h^3}$$

- эффективная плотность состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно, в данном случае:

$$N_V = \frac{2(2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}388\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}\cdot 1{,}38\cdot 10^{-23}\cdot 300)^{\frac{3}{2}}}{(6{,}62\cdot 10^{-34})^3} = 6{,}04\cdot 10^{24}\ \text{м}^{-3};$$

$$N_c = \frac{2(2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}55\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}\cdot 1{,}38\cdot 10^{-23}\cdot 300)^{\frac{3}{2}}}{(6{,}62\cdot 10^{-34})^3} = 1{,}02\cdot 10^{25}\ \text{м}^{-3}.$$

Таким образом,

$$W_f - W_i = \frac{8{,}625\cdot 10^{-5}\cdot 300}{2} ln\frac{6{,}04\cdot 10^{24}}{1{,}02\cdot 10^{25}} = -0{,}78\cdot 10^{-3}\ \text{эВ}.$$

Или

$$W_f - W_v = W_i - W_v + \frac{kT}{2}\ln\frac{N_V}{N_c} = \Delta W/2 + kT\ln\frac{N_V}{N_c} =$$

$$= 0{,}665/2 - 6{,}78\cdot 10^{-3} = 0{,}326\ \text{эВ},$$

т.е. уровень Ферми в собственном германии при комнатной температуре расположен на 6,78 мэВ ниже середины запрещенной зоны, но на 326 мэВ выше потолка валентной зоны. Результаты расчета показывают, что с ростом температуры уровень Ферми приближается к той зоне, которая имеет меньшую плотность состояний и поэтому заполняется быстрее.

Задача 3.2. Рассчитать концентрацию электронов и дырок в германии p-типа с удельным сопротивлением 0,05 Ом·м при температуре 300 К. Данные: собственная концентрация носителей заряда при комнатной температуре n_i=2,1·10^{19} м$^{-3}$, подвижность электронов μ_n=0,39 м^2/(В·с), подвижность *дырок* μ_p=0,19 м^2/(В·с)

Решение

Удельное сопротивление связано с концентрацией электронов и дырок уравнением

$$1/\rho = en\mu_n + ep\mu_p = en_i^2\mu_n/p + ep\mu_p\,.$$

Для концентрации дырок получаем квадратное уравнение вида

$$p^2 - \frac{p}{e\mu_p\rho} + \frac{n_i^2\mu_n}{\mu_p} = 0\,.$$

Подставляя исходные данные, имеем

$$p^2 - 6{,}58\cdot 10^{20} + 9{,}03\cdot 10^{38} = 0,$$

откуда $p = 6{,}565\cdot 10^{20}$ *м*$^{-3}$.

Второе решение квадратного уравнения отбрасываем, так как оно соответствует полупроводнику n-типа. Концентрация неосновных носителей заряда

$$n = n_i^2/p = (2{,}1\cdot 10^{19})^2/(6{,}565\cdot 10^{20}) = 6{,}72\cdot 10^{17}\,\text{м}^{-3}.$$

Задача 3.3. Определить, при какой концентрации примесей удельная проводимость германия при температуре 300 К имеет наименьшее значение. Найти отношение собственной удельной проводимости к минимальной при той же температуре. Для решения использовать данные задачи 3.2.

Решение

Минимум удельной проводимости находим из условия $d\gamma/d_n=0$. Учитывая, что

$$\gamma = en\mu_n + e\rho\mu_\rho = en\mu_n + \frac{en_i^2}{n}\mu_\rho\,,$$

после дифференцирования получим

$$e\mu_n - en_i^2\mu_\rho/n^2 = 0\,.$$

Решая это уравнение, находим

$$n = n_i\sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}}\,;\quad \rho = n_i\sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_{p\ \rho}}}\,.$$

Для германия при 300 К получаем

$$n = 2{,}1 \cdot 10^{19} \sqrt{0{,}19 / 0{,}39} = 1{,}47 \cdot 10^{19}\ м^{-3};$$

$$\rho = 2{,}1 \cdot 10^{19} \sqrt{0{,}39 / 0{,}19} = 3{,}01 \cdot 10^{19}\ м^{-3}.$$

Таким образом, минимальную удельную проводимость имеет слабо–легированный полупроводник *p*-типа.

Учитывая, что собственная удельная проводимость определяется уравнением $\gamma_i = en_i(\mu_n + \mu_\rho)$, находим искомое отношение

$$\frac{\gamma_i}{\gamma_{\min}} = \frac{\mu_n + \mu_\rho}{2\sqrt{\mu_n \cdot \mu_\rho}} = \frac{0{,}39 + 0{,}19}{2\sqrt{0{,}39 \cdot 0{,}19}} = 1{,}065.$$

Задача 3.4. Через пластину кремния с удельным объемным сопротивлением 0,01 Ом·м проходит электрический ток плотностью 10 мА/мм^2. Найти средние скорости дрейфа электронов и дырок, если их подвижности равны 0,14 и 0,05 м^2/(В·с) соответственно.

Решение

Скорость дрейфа электронов $V_n = \mu_n E$, а дырок $V_p = \mu_p E$. Плотность тока через пластину кремния будет $J = \sigma E = E/\rho_v$, откуда $E = J\rho_v$. Следовательно, имеем

$$V_n = \mu_n J\rho_v = 0{,}14 \cdot 10^3 \cdot 10^{-1} = 14\ м/с \text{ и } V_p = \mu_p J\rho_v = 0{,}05 \cdot 10^2 = 5\ м/с.$$

Задача 3.5. В образце кремния n-типа при температуре Т = 300 К время жизни неосновных носителей заряда τ_p = 5 мкс, их подвижность μ_p = 0,04 м^2/(В·с). Определить диффузионную длину неосновных носителей заряда.

Решение

Из соотношения Эйнштейна находим коэффициент диффузии дырок:

$$D = \frac{\mu \cdot kT}{e} = \frac{0{,}04 \cdot 8{,}625 \cdot 10^{-5}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 1{,}03 \cdot 10^{-3}\ м^2/с.$$

Диффузионная длина неосновных носителей заряда

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{1{,}03 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 7{,}19 \cdot 10^{-5}\ м \approx 72\ мкм.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить положение уровня Ферми при Т = 300 К в кристалле германия, легированного мышьяком до концентрации 10^{23} м$^{-3}$.

Ответ: 0,12 эВ.

2. Эпитаксиальный слой арсенида галлия, легированный серой, имеет при комнатной температуре удельное сопротивление $5\cdot10^{-3}$ Ом·м. Определить концентрацию доноров в слое, если подвижность электронов 0,8 м^2/(В·с).

Ответ: $1{,}56\cdot10^{21}$ м$^{-3}$.

3. При напряженности электрического поля 100 В/м плотность тока через полупроводник $6\cdot10^4$ А/м^2. Определить концентрацию электронов проводимости в полупроводнике, если их подвижность 0,375 м^2/(В·с). Дырочной составляющей тока можно пренебречь.

Ответ: 10^{22} м$^{-3}$.

4. К стержню из арсенида галлия длиной 50 мм приложено напряжение 50 В. За какое время электрон пройдет через весь образец, если подвижность электронов 0,9 м^2/(В·с)?

Ответ: 56 мкс.

5. Через кристалл кремния n-типа с удельным объемным сопротивлением 0,1 Ом·м пропускают электрический ток плотностью 200 мА/см^2. За какое время электроны проходят расстояние 10 мкм, если их подвижность 0,14 м^2/(В·с)?

Ответ: 0,357 мкс.

6. Оценить тепловую и дрейфовую скорости электронов при 300 К в германии n-типа с концентрацией доноров $N_д = 10^{22}$ м$^{-3}$, если плотность тока через образец 10^4 А/м^2 , а эффективная масса электронов проводимости $m_n = 0{,}12 m_o$.

Ответ: $V_t = 3{,}37\cdot10^5$ м/с; $V_д = 6{,}25$ м/с.

7. Определить время жизни и подвижность электронов в невырожденном германии при температуре 300 К, если диффузионная длина электронов 1,5 мм, коэффициент диффузии $9{,}8\cdot10^{-3}$.

Ответ: 230 мкс, 0,38 м^2/(В·с).

Тема 4. *ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ*

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

Наиболее важными электрофизическими параметрами диэлектрических материалов являются относительная диэлектрическая проницаемость ε, тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$, электрическая прочность $E_{пр}$, удельные объемное ρ_v и поверхностное ρ_s сопротивления.

Поляризованность пропорциональна напряженности электрического поля:

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E.$$

Если диэлектрик изотропный, то векторы напряженности электрического поля и поляризованности совпадают по направлению, а электрическое смещение равно

$$D = \varepsilon_0 E + P.$$

Кроме пассивного сопротивления, связанного с наличием свободных носителей заряда, диэлектрики обладают, в отличие от проводников, активным или емкостным сопротивлением, которое зависит от частоты внешнего электрического поля:

$$x_c = \frac{h}{2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S},$$

где h – толщина диэлектрика; f – частота внешнего электрического поля; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S – площадь электродов.

Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{4\pi \cdot \varepsilon\varepsilon_o \cdot S}{h},$$

где Q – заряд на пластинах; U – разность потенциалов; S – площадь пластин; h – толщина диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость зависит от температуры, поскольку изменяется прочность межатомных связей. В связи с этим вводится температурный коэффициент ε:

$$\alpha_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dT}.$$

В инженерной практике чаще используют понятие температурного коэффициента емкости (ТКЕ) конденсатора на основе данного диэлектрика, поскольку она изменяется пропорционально ε.

Значение диэлектрической проницаемости многокомпонентных диэлектриков определяют по формуле Лихтенеккера, которая, например, для двух составляющих имеет вид

$$\lg \varepsilon_o = c_1 \cdot \lg \varepsilon_1 + c_2 \cdot \lg \varepsilon_2 ,$$

где $\varepsilon_{1...i}$ и $C_{1...i}$ – относительные диэлектрические проницаемости и объемные концентрации компонентов $(c_1 + c_2 = 1)$.

Для температурного коэффициента диэлектрической проницаемости

$$\alpha_{\varepsilon o} = c_1 \cdot \alpha_{\varepsilon 1} + c_2 \cdot \alpha_{\varepsilon 2} .$$

В переменных электрических полях имеет место рассеяние мощности в диэлектрике из-за необратимых явлений, в том числе вследствие протекания токов смещения. На практике используют величину tgδ, которая входит в выражение для величины потерь в образце диэлектрика

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

где ω – угловая скорость электрического поля $(\omega = 2\pi \cdot f)$.

При достаточно больших напряженностях поля (больше 10^6 В/м) в диэлектриках возможен пробой, т.е. утрата изоляционных свойств. Электрическая прочность рассчитывается как

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d},$$

где $U_{пр}$ – напряжение пробоя диэлектрика толщиной d.

Примеры решения задач

Задача 4.1. Нормально вектору напряженности однородного электрического поля E_0 = 100 В/м расположена пластина изотропного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε = 2. Определить:

а) напряженность поля Е и электрическое смещение (электрическую индукцию) D внутри пластины;

б) поляризованность диэлектрика Р и поверхность связанных зарядов σ.

Решение

а) Среднее макроскопическое электрическое поле Е в диэлектрике в ε раз меньше внешнего: Е = 100/2 = 50 В/м. Для большинства диэлектриков поляризованность пропорциональна напряженности поля:

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot (2-1) \cdot 50 = 4{,}42 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2.$$

Электрическое смещение

$$D = \varepsilon_0 E + P = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 50 + 4{,}42 \cdot 10^{-10} = 8{,}85 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2;$$

б) Поляризованность однородного плоского диэлектрика в однородном электрическом поле равна поверхностной плотности связанных зарядов**:**

$$\sigma = P = 4{,}42 \cdot 10^{-10}\ Кл/м^2.$$

Задача 4.2. Вычислить поляризованность монокристалла каменной соли, считая, что смещение ионов под действием электрического поля от положения равновесия составляет 1% расстояния между ближайшими соседними ионами. Элементарная ячейка кристалла имеет форму куба, расстояние между соседними ионами a = 0,28 нм.

Решение

Поляризованность диэлектрика P численно равна отношению электрического момента dp элемента диэлектрика к объёму dV этого диэлектрика: $P = dp/(dV)$. Если выбрать $dV = a^3$, то $dp = q\Delta x$, где q – заряд иона, равный заряду электрона; Δx – смещение ионов под действием поля.

Тогда

$$P = \frac{q\Delta \mathrm{x}}{a^3} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 2{,}8 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-2}}{(0{,}28 \cdot 10^{-9})^3} \approx 0{,}02\ \text{Кл/м}^2.$$

Задача 4.3. При тех же условиях, что и в предыдущей задаче, определить напряженность электрического поля, воздействующего на монокристалл каменной соли, если её диэлектрическая проницаемость ε = = 5,65. Вычислить коэффициент упругой связи ионов $\kappa_{упр}$ в кристалле, полагая, что напряженность внутреннего поля равна напряженности внешнего поля.

Решение

Поляризованность диэлектрика пропорциональна напряженности электрического поля. Отсюда

$$E = \frac{P}{\varepsilon_0(\varepsilon - 1)} = \frac{0{,}02}{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot (5{,}65 - 1)} = 4{,}85 \cdot 10^8\ \text{В/м}.$$

Так как смещению ионов под действием поля препятствуют силы упругой связи, то в состоянии равновесия, $q{\cdot}E = \kappa_{упр}\Delta x$. Отсюда

$$\kappa_{\text{упр}} = \frac{qE}{\Delta x} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 4{,}85 \cdot 10^8}{0{,}28 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-2}} = 27{,}7\ \text{Дж/м}^2.$$

Задача 4.4. Между пластинами плоского конденсатора без воздушных промежутков зажат лист гетинакса толщиной h = 1 мм. На конденсатор подано напряжение U = 200 В. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора σ_1 и на диэлектрике $\sigma_Д$. Диэлектрическую проницаемость материала принять равной шести.

Решение

Вследствие поляризации диэлектрика при подключенном источнике постоянного напряжения на пластинах конденсатора удерживается дополнительный заряд $\sigma_Д$, так что $\sigma_1 = \sigma_Д + \sigma_0$, где σ_0 – поверхностная плотность заряда на пластинах конденсатора в отсутствие диэлектрика. Тогда

$$\sigma_1 = \varepsilon_0\varepsilon \cdot E = \frac{\varepsilon_0\varepsilon \cdot U}{h} = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 200}{10^{-3} \cdot 10^{-5}} \text{ Кл/м}^2;$$

$$\sigma_\delta = P = \varepsilon_0\varepsilon \cdot E - \varepsilon_0 E \approx \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 200}{10^{-3}} \approx 8{,}85 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2.$$

Задача 4.5. Две противоположные грани куба с ребром a = 10 мм из диэлектрика с удельным объемным сопротивлением ρ_v = 10^{10} Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением ρ_S = 10^{10} Ом·м покрыты металлическими электродами. Определить ток , протекающий через эти грани куба при постоянном напряжении U_0 = 2 кВ.

Решение

Электрический ток протекает как через объем куба, так и по поверхности четырех боковых граней. Поэтому сопротивление между электродами определяется параллельным соединением объемного сопротивления и поверхностных сопротивлений четырех граней. Тогда

$$R_y = \frac{\rho_v a}{a^2} = \rho_v a = \frac{10^{10}}{10 - 10^3} = 10^{12} \text{ Ом};$$

$$R_{S1} = R_{S2} = R_{S3} = R_{S4} = \frac{\rho_S a}{a} = \rho_S = 10^{11} \text{ Ом};$$

$$R_{ИЗ} = \frac{R_v \cdot R_{Sl}}{R_{Sl} + 4R_v} = \frac{10^{12} \cdot 10^{11}}{10^{11} + 4 \cdot 10^{12}} = 2{,}44 \cdot 10^{10} \text{ Ом};$$

$$I = \frac{U_0}{R_{ИЗ}} = \frac{2 \cdot 10^3}{2{,}44 \cdot 10^{10}} = 8{,}2 \cdot 10^{-8} \text{ А}.$$

Задача 4.6. Между плоскими электродами площадью $S = 2 \cdot 10^{-4}$ м^2 размещены соединенные последовательно две пластины из различных диэлектрических материалов. Один из них имеет диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_1 = 2$; удельную проводимость $\gamma_1 = 10^{-6}$ См/м; толщину h_1 = 1 см. Для другой: $\varepsilon_2 = 3$; $\gamma_2 = 10^{-10}$ См/м; h_2 = 2 см. В момент времени $t = 0$ к электродам подключено постоянное напряжение U = 5 кВ. Определить напряженность электрического поля в диэлектриках в моменты времени $t = 0$

и $t \to \infty$. Найти напряженность электрического поля в диэлектриках при $t \to \infty$, если к электродам приложено переменное напряжение U = 20 В частотой f = = 50 МГц.

Решение

При постоянном напряжении в момент времени t = 0 напряженность поля в обоих диэлектриках равна 0, так как поляризации еще не произошло.

При $t \to \infty$ распределение постоянного напряжения между пластинами диэлектриков определяется их активными сопротивлениями R_1 и R_2:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2},$$

где

$$R_1 = \frac{h_1}{\gamma_1 S} = \frac{10^{-2}}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}; \quad R_2 = \frac{h_2}{\gamma_2 S} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 10^{12} \text{ Ом}.$$

Отсюда следует, что $U_1 << U_2$. Так как $U = U_1 + U_2$, то напряжённость электрического поля в диэлектриках:

$$E_1 = \frac{U_1}{h_1} = 100 \text{ В/м};$$

$$E_2 = \frac{U_2}{h_2} = 9{,}9995 \cdot 10^5 \text{ В/м}.$$

На переменном напряжении при $t \to \infty$ распределение напряжения между диэлектриками определяется модулями полных сопротивлений слоев. Емкостные сопротивления слоев:

$$x_{c1} = \frac{h_1}{2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_1 \cdot S} = \frac{10^{-2}}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} \approx 9 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$x_{c2} = \frac{h_2}{2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_2 \cdot S} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} \approx 1.2 \cdot 10^4 \text{ Ом}.$$

Так как $x_{c1} << R_1$ и $x_{c2} << R_2$, то $U_1 / U_2 = x_{c1} / x_{c2}$.

Отсюда E_1 = 857 В/м; E_2 = 571 В/м.

Задачи для самостоятельного решения

1. Сопротивление изоляции двухжильного кабеля длиной 2 м равно 300 МОм. Чему равно сопротивление изоляции такого же кабеля длиной 6 м?

Ответ: 100 МОм.

2. 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?

Ответ: $6{,}3\cdot10^{13}$ Ом.

3. Диэлектрик в форме прямоугольного параллелепипеда длиной $l = 5$ см и площадью поперечного сечения $bxh=2x0{,}5$ $см^2$ 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 удельное объемное сопротивление $\rho_v = 10^{10}$ Ом·м.

Ответ: $2{,}14\cdot10^{12}$ Ом.

4. На поверхности диэлектрика параллельно друг другу расположены два ножевых электрода. Расстояние между электродами $b = 2$ мм, их ширина $h = 10$ мм. Чему равно удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, если сопротивление между электродами 5 МОм?

Ответ: 25 МОм.

5. Определить плотность вспененного полистирола (пенополистирола), имеющего диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{вс} = 1{,}5$. Какую долю объема материала $Q_в$ занимает воздух. Вспениванию подвергся полистирол с параметрами $\varepsilon = 2{,}6$, плотность $d = 1050$ кг/м^3.

Ответ: 569,1 кг/м^3; 0,458.

6. Рассчитать величину потерь плоского конденсатора с диэлектриком их керамики, работающего на частоте 100 МГц при напряжении между обкладками 150 В, если площадь обкладок 1 мм^2, расстояние между ними 1 мм, ε = 25, а значение tgδ для керамики составляет $2\cdot10^{-3}$.

Ответ: ≈ 4,25 Вт.

7. Композиционный диэлектрик состоит из полимера-связки с ε = 2,8, наполнителя с ε = 8,2 и стабилизатора с ε = 4,1 в объемном соотношении 10:4:1. Определить удельную емкость платы толщиной 1,5 мм, выполненной из этого материала, и максимальное напряжение, которое можно приложить к металлическим электродам, расположенным на противоположных сторонах платы, если диэлектрическая прочность диэлектрика 300 кВ/см.

Ответ: ≈ 20 мкФ/м^2; 45 кВ.

Тема 5. *МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ*

Необходимые теоретические сведения и расчетные формулы

К *статическим магнитным характеристикам* материалов относятся:

напряженность магнитного поля H (А/м) для линейного и кольцевого проводника с током соответственно

$$H = \frac{I}{2\pi r}\ ,\ H = \frac{\omega I}{\pi d_{ср}}\ ,$$

где I – постоянный ток в проводнике, А; r – расстояние от проводника до точки, в которой определяется напряженность магнитного поля, м; ω – число витков обмотки; $d_{ср}$ – средний диаметр кольцевого проводника;

намагниченность $I_м$ (А/м)

$$I_ь = \frac{M}{V}\ ,$$

где M – магнитный момент тела; V – объем тела, м^3.

Зависимость намагниченности насыщения от температуры

$$\frac{\mathrm{Im}_{s}}{\mathrm{Im}_{o}} = \alpha\sqrt{1 - \frac{T}{T_к}}\ ,$$

где α – коэффициент, постоянный для данного материала; $T_к$ – температура Кюри, К;

магнитная восприимчивость $\chi_м$, которая характеризует способность вещества изменять свой магнитный момент под действием внешнего магнитного поля:

$$\chi_м = \frac{M}{H}\ .$$

Зависимость магнитной восприимчивости от температуры

$$\chi_м = C(T - T_C)\ ,$$

где C – постоянная Кюри–Вейса; T_C – температура Кюри;

магнитная индукция B (Тл):

$$B = \mu_0(H + M)\ ,$$

где μ_0 - магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

магнитная проницаемость – характеристика среды, в которой возникает магнитное поле. Различают абсолютную μ_a и относительную μ магнитные проницаемости:

$$\mu_a = \frac{B}{H}, \text{ Гн/м} \quad \text{и} \quad \mu = \frac{\mu_a}{\mu_o} = \frac{B}{\mu_o H}.$$

Связь магнитной проницаемости с магнитной восприимчивостью

$$M = 1 + \chi_м, \quad \text{а} \quad I_м = \chi_м \mu_0 H.$$

Динамические магнитные характеристики характеризуют поведение ферромагнетиков в переменных магнитных полях:

потери на гистерезис для каждого материала могут быть определены по площади статической петли гистерезиса. Потери на гистерезис за один цикл в единице объема вещества вычисляют по следующей эмпирической формуле:

$$Э_г = \eta B_{\max}^n,$$

где η – коэффициент, зависящий от материала; B_{max} – максимальная индукция, достигаемая в течение цикла; n – показатель степени 1,6..2,0.

Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть представлена в виде

$$P_г = \eta f B_{\max}^n V,$$

где f – частота тока, Гц; V – объем ферромагнетика;

потери на вихревые токи

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

где ξ - коэффициент, зависящий от удельного объемного сопротивления ρ_v и формы магнитного элемента;

потери на магнитное последействие значительны только при работе ферромагнетиков в импульсном режиме.

Для расчета характеристик магнитных цепей используется закон о полной магнитодвижущей силе $F_{мд}$, вытекающий из условия непрерывности магнитного потока:

$$F = I \cdot n = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + \cdots = \sum_i H_i \cdot l_i,$$

где H_i – напряженность магнитного поля на участке силовой линии l_i.

Энергия магнитного поля, создаваемая проводником с током и тороидальной или цилиндрической катушкой соответственно,

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2}, \quad W = \frac{\mu\mu_o \cdot H^2 \cdot V}{2} = \frac{B \cdot H \cdot V}{2},$$

где L – индуктивность проводника; V – объем однородного магнитного поля.

Примеры решения задач

Задача 5.1. В сердечнике трансформатора суммарные удельные магнитные потери на гистерезис и на вихревые токи при частотах 1 и 2 кГц составляют соответственно 2 и 6 Вт/кг (при неизменной максимальной индукции в сердечнике). Рассчитать магнитные потери на вихревые токи в сердечнике на частоте 2 кГц.

Решение

Суммарные потери за 1 цикл перемагничивания линейно зависят от частоты:

$$W = \frac{P_a}{f} = \frac{P_r}{f} + \frac{P_f}{f} = \eta B_m^n + \xi B_m^2 f \ .$$

Подставляя исходные данные, запишем для двух частот:

$$\eta B_m^n + \xi B_m^2 \cdot 10^3 = \frac{2}{10^3}; \quad \eta B_m^n + \xi B_m^2 \cdot 2 \cdot 10^3 = \frac{6}{10^3}.$$

Вычитая из одного уравнения другое, получаем: $\xi B_m^2 = 10^{-6}$. Тогда

$$P_f = \xi \cdot B_m^2 \cdot f^2 = 10^{-6} \cdot (2 \cdot 10^3)^2 = 4 \text{ Вт/кг.}$$

Задача 5.2. В сердечнике трансформатора на частоте 50 Гц потери на гистерезис при индикации магнитного поля 0,1 и 0,5 Тл составляют соответственно 0,15 и 1,97 Вт/кг. Определить потери на гистерезис при частоте 200 Гц и при индикации магнитного поля 0,6 Тл.

Решение

Потери на гистерезис в единице объема ферромагнетика определяются выражением $\mathrm{Pr} = \eta B_m^n f$. Отсюда следует, что

$$\frac{\mathrm{Pr}_2}{\mathrm{Pr}_1} = \frac{\eta B_{m2}^n f}{\eta B_{m1}^n f} = (\frac{B_{m2}}{B_{m1}})^n;$$

$$n = \frac{\lg(\mathrm{Pr}_2 / \mathrm{Pr}_1)}{\lg(B_{m2} / B_{m11})} = \frac{\lg(1,97 / 0,15)}{\lg(0,5 / 0,1)} = 1,6;$$

$$\eta = \frac{\mathrm{Pr}}{B_m^n f} = \frac{1,97}{(0,5)^{1,6} 50} = 0,12 \text{ Дж/(кг·Тл}^{1,6});$$

$$P_{r3} = 0,12\ (0,6)^{1.6} \cdot 200 = 10,6 \text{ Вт/кг.}$$

Задача 5.3. Диамагнитная восприимчивость меди $\chi_{Cu} = -9,5 \cdot 10^{-6}$. Определить намагниченность и магнитную индукцию в медном проводе при воздействии на него однородного магнитного поля напряженностью

H = 100 А/м. Укажите, как ориентированы векторы намагниченности и магнитной индукции друг относительно друга.

Решение

Намагниченность связана с напряженностью магнитного поля соотношением

$$J = \chi_{Cu} \cdot H = -9{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = -9{,}5 \cdot 10^{-4}\ А/м.$$

Магнитная индукция в веществе определяется суммой индукций собственного и внешних полей:

$$B = B_0 + Bi = \mu_o \cdot H + \mu_o \cdot J = \mu_o(H + J) = 4\pi \cdot 10^{-7}(100 - 9{,}5 \cdot 10^{-4}) = 1{,}26 \cdot 10^{-4}\ \text{Тл} .$$

Поскольку медь диамагнетик, векторы B и J антипараллельны.

Задача 5.4. Магнитная восприимчивость никеля при температурах 400 и 800^{0}С равна соответственно $1{,}25 \cdot 10^{-3}$ и $1{,}14 \cdot 10^{-4}$. Определить температуру Кюри и магнитную восприимчивость никеля при температуре Т = 600^{0}С.

Решение

Поскольку, как следует из условия задачи, магнитная восприимчивость падает с увеличением температуры, точка Кюри лежит ниже 400^{0}С. Известно, что при $T > T_C$, $\chi_м$ подчиняется закону Кюри–Вейсса

$$\chi = \frac{C}{T - T_C},$$

где C – постоянная, зависящая от природы материала.

Для нахождения С решим систему уравнений

$$\chi_{T1} = \frac{C}{T_1 - T_C}, \quad \chi_{T1}(T_1 - T_C) = C\,,$$

$$\chi_{T2} = \frac{C}{T_2 - T_C}, \quad \chi_{T2}(T_2 - T_C) = C\,,$$

$$\chi_{T1} \cdot T_1 - \chi_{T2} \cdot T_2 = T_C(\chi_{T1} - \chi_{T2}) \quad \text{и}$$

$$T_K = \frac{\chi_{T1} \cdot T_1 - \chi_{T2} \cdot T_2}{\chi_{T1} - \chi_{T2}} = \frac{1{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot 400 - 1{,}14 \cdot 10^{-4} \cdot 800}{1{,}25 \cdot 10^{-3} - 1{,}14 \cdot 10^{-4}} = 360\ {}^0\text{C}.$$

Постоянная Кюри–Вейса

$$C = \chi_{T1}(T_1 - T_K) = 1{,}25 \cdot 10^{-3}(400 - 360) = 0{,}05\ {}^0\text{C}.$$

Тогда при $T = 600^0$С

$$\chi_{600} = \frac{C}{T_{600} - T_K} = \frac{0{,}05}{600 - 360} = 2{,}08 \cdot 10^{-4}.$$

Задача 5.5. Определить магнитные потери в сердечнике К40х20х7,5 из феррита марки 2000НМ на частоте 0,1 МГц при пропускании через намагничивающую обмотку тока 40 мА. Обмотка содержит 100 витков, добротность сердечника в данных условиях равна 10. Магнитную проницаемость феррита на рабочей напряженности поля принять равной $\mu_н$.

Решение

Определим индуктивность катушки с сердечником

$$L = \frac{\mu_o \mu \cdot n^2 \cdot S}{l_{ср}},$$

где μ_o и μ – магнитная постоянная и магнитная проницаемость феррита; n – число витков; S – площадь поперечного сечения сердечника; $l_{ср}$ – средняя линия сердечника.

$$L = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 10^4 \cdot 10 \cdot 7{,}5 \cdot 10^{-6}}{\pi(40+20)/2} = 0{,}02 \text{ Гн}.$$

Тогда магнитные потери

$$Pa = I^2 \cdot \omega \cdot L \cdot tg\delta_m = I^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot L \cdot \frac{1}{Q} = \frac{40^2 \cdot 10 - 6 \cdot 2\pi \cdot 0{,}1 \cdot 10^6 \cdot 0{,}02}{10} = 2{,}0 \text{ Вт}.$$

Задача 5.6. Кольцевой ферритовый сердечник со средним диаметром $d_{ср}$ = 25 мм имеет воздушный зазор длиной 1 мм. При пропускании тока величиной 0,17 А через обмотку сердечника, состоящую из 500 витков, в зазоре создается магнитная индукция B_o = 0,1 Тл. Определить магнитную проницаемость феррита.

Решение

В соответствие с законом о полной магнитодвижущей силе

$$I \cdot n = H_ф \cdot l_ф + H_з \cdot l_з,$$

где $H_ф$ и $H_З$ – напряженность магнитного поля в феррите и воздушном зазоре соответственно; $l_ф$ – средняя длина контура-линии магнитной индукции в сердечнике; $l_З$ – длина зазора.

Поскольку линии магнитной индукции непрерывны, то магнитная индукция в сердечнике и зазоре $B_ф = B_З$. Учитывая, что

$$B_ф = \mu_o \mu \cdot H_ф \cdot l_{фз}, \quad \text{а} \quad B_з = \mu_o H_з,$$

получаем
$$I \cdot n = \frac{B_з \cdot l}{\mu_o \mu} + \frac{B_з \cdot l_з}{\mu_o \quad _з}.$$

Отсюда магнитная проницаемость феррита

$$\mu = \frac{B_з \cdot l_ф}{\mu_o n \cdot I - B_з \cdot l_з} = \frac{0{,}1 \cdot (\pi \cdot 25 \cdot 10^{-3} - 10^{-3})}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot 0{,}17 - 0{,}1 \cdot 10^{-3}} = 1140 .$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Из экспериментальных данных следует, что при температуре 700°С намагниченность насыщения чистого железа $I_{ms} = 0{,}55 \cdot I_{mo}$ при температуре T = 0 К и $I_{ms} = 0{,}296 \cdot I_{mo}$ при температуре 750°С. Найти температуру Кюри для железа.

Ответ: $T_к$ = 1042 К = 769°С.

2. В сердечнике трансформатора суммарные удельные магнитные потери на гистерезис и вихревые токи при частоте 2 кГц равны и составляют 2 Вт/кг. Определить суммарные удельные потери в сердечнике при частоте 400 Гц, если максимальная магнитная индукция в нем та же, что и при частоте 2 кГц.

Ответ: $P_а$ = 0,48 Вт/кг.

3. Кольцевой сердечник размерами *R x r x h = 16 x 8 x 8*, изготовленный из феррита марки *20 000НМ*, на частоте *0,01* МГц имеет $tg\delta_m = 0{,}5$. На сердечнике намотана обмотка из 20 витков. Найти эквивалентное сопротивление потерь в слабых магнитных полях.

Ответ: 899 Ом.

4. При напряженности магнитного поля H = 400 кА/м магнитно-твердый сплав ЮНДК35Т5 имеет магнитную индукцию B=1 Тл. Определить намагниченность сплава.

Ответ: $3{,}96 \cdot 10^5$ А/м.

5. Докажите, что потери на перемагничивание, отнесенные к единице объема материала сердечника (удельные потери), могут быть вычислены по формуле $p_a = \frac{P_a}{V} = \mu\mu_o \cdot \omega \cdot H^2 \cdot tg\delta_m$. Использовать эквивалентную схему и векторную диаграмму катушки индуктивности с сердечником. Активным сопротивлением обмотки пренебречь.

6. Тороидальный сердечник составлен из двух полуколец одинакового сечения, изготовленных из различных магнитомягких ферритов. Средняя длина L тороида, включая два зазора размером l = 2 мм каждый, равна 50 мм. По обмотке сердечника, имеющей 100 витков, протекает ток I = 0,1 А. Определить индукцию магнитного поля в зазоре, если магнитная проницаемость полуколец равна соответственно 200 и 400.

Ответ: 3 мТл.

7. Найти индуктивность соленоида, в котором обмотка из 200 витков намотана на диэлектрическое основание длиной 50 мм. Площадь поперечного сечения основания 50мм^2. Как изменится индуктивность катушки, если в нее ввести цилиндрический ферритовый сердечник, имеющий магнитную проницаемость $\mu = 400$?

Ответ: 50,2 мкГн; 20 мГн.

Св. план 2004, поз. 9

Учебное издание

Баранов Валентин Владимирович,
Шахлевич Григорий Михайлович,
Телеш Евгений Владимирович

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ПРАКТИКУМ

для студентов специальностей

«Проектирование и производство РЭС»,
«Электронно-оптическое аппаратостроение»,
«Медицинская электроника»
всех форм обучения

Редактор Т.Н. Крюкова
Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать 04.05.2004.		Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная.	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 2,21.
Уч.–изд. л. 1,8.	Тираж 100 экз.	Заказ 1.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.03.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6