

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению практических работ
по дисциплине
«МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»
для студентов направления
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленность (Профиль)
Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь
2026

Тема 1. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Цель занятия, изучение закономерностей изменения электрофизических свойств проводниковых и резистивных материалов в разных условиях применения, приобретение практических навыков расчета их параметров.

Характерной особенностью проводников, является сильно выраженная электропроводность, обусловленная высокой концентрацией свободных носителей заряда.

Плотность тока в проводнике с одним типом носителей заряда

$$j = \sigma \cdot E, \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (2.1)$$

где σ – 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

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu, \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (2.2)$$

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

Удельное электрическое сопротивление – это величина, обратная удельной электрической проводимости

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (2.3)$$

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

$$\rho = \frac{2 \cdot m_e \cdot u_T}{e^2 \cdot n \cdot l_{cp}}, \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (2.4)$$

где $m_e = 0,91 \cdot 10^{-30}$ кг – масса электрона; l_{cp} – средняя длина свободного пробега электронов, м; u_T – средняя скорость теплового движения электронов, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$, которая определяется из соотношения

$$\frac{m_e u_T^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (2.5)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ – 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

$$n = N = \frac{d}{M} N_A, \text{ м}^{-3}, \quad (2.6)$$

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

В соответствии с квантовой теорией удельное электрическое сопротивление металлов

$$\rho = \left(\frac{3}{8 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{h}{e^2 \cdot n^{\frac{2}{3}} \cdot l_{cp}}, \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (2.7)$$

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

Влияние примесей и структурных дефектов на удельное сопротивление. Примеси и структурные дефекты увеличивают удельное сопротивление металлов. В соответствии с правилом Маттиссена

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост}, \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (2.8)$$

где ρ_T – удельное электрическое сопротивление, обусловленное рассеянием

электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки; $\text{Ом} \cdot \text{м}$,

$\rho_{ост} = \rho_{np} + \rho_{деф}$ – остаточное удельное сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{м}$, обусловленное

рассеянием электронов на статических дефектах структуры: примесных атомах (ρ_{np}) и собственных дефектах структуры ($\rho_{деф}$). 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: $\beta = \rho_{300} / \rho_{4,2}$.

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

Удельное сопротивление металлических сплавов, имеющих структуру неупорядоченного твердого раствора, $\rho_{ост}$ может существенно превышать ρ_T .

Для многих двухкомпонентных сплавов металлов, не принадлежащих к числу переходных или редкоземельных элементов, зависимость $\rho_{ост}$ описывается

законом Нордгейма

$\rho_{ост}$ от состава

$$\rho_{ост} = CX_A X_B = CX_B (1 - X_B), \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (2.9)$$

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

Размерный эффект в тонких пленках. Удельное сопротивление металла в тонкой пленке больше удельного сопротивления того же металла в виде объемного образца. В пленках очень малой толщины имеются островки металла. В пленках островковой структуры (дисперсированных) проводимость имеет полупроводниковый характер. В сплошных пленках, толщина которых соизмерима с длиной свободного пробега электронов, удельное сопротивление увеличивается вследствие соударения электронов с поверхностью пленки.

Зависимость удельного сопротивления от толщины пленки описывается эмпирической формулой Фукса, которая имеет вид

$$\frac{\rho_d}{\rho} = 1 + \frac{3}{8}(1-p)\frac{l_{cp}}{d}, \quad (2.10)$$

где ρ_d – удельное электрическое сопротивление металлической пленки толщиной d , м; p – параметр зеркальности, который зависит от качества поверхности.

Так как характер зарождения и роста пленок зависит от множества факторов, на практике трудно получить точное совпадение значений ρ_d для пленок одинаковой толщины. Поэтому для сравнительной оценки проводящих свойств тонких пленок, осажденных при идентичных условиях, используют параметр – удельное поверхностное сопротивление ρ_s . Удельное поверхностное сопротивление – это сопротивление квадрата пленки $R_{кв}$:

$$\rho_s = R_{кв} = \frac{\rho_d}{d}, \text{ Ом.} \quad (2.11)$$

Так как $R_{кв}$ не зависит от размера квадрата, сопротивление пленочного резистора можно рассчитать по формуле

$$R = \rho \frac{l_0}{s \cdot b} = \rho \cdot K_\phi, \text{ Ом,} \quad (2.12)$$

где l_0 – длина резистора в направлении прохождения тока, м; b – ширина резистора, м²; $K_\phi = l/b$ – коэффициент формы резистора.

Температурный коэффициент удельного сопротивления. В диапазоне температур, где зависимость ρ от T близка к линейной, справедливо выражение

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)], \text{ Ом} \cdot \text{м,} \quad (2.13)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление в начале температурного диапазона,

$\alpha_p = (\rho - \rho_0) / (\rho_0 (T - T_0))$ – средний температурный коэффициент удельного

сопротивления в данном диапазоне температур, K^{-1} ; ρ – удельное сопротивление при температуре T .

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

Для чистых непереходных металлов α_p приблизительно равно $4 \cdot 10^{-4} K^{-1}$, а у переходных и ферромагнитных материалов повышенное α_p ($\sim 10^{-2} K^{-1}$).

Теплопроводность металлов. В металлах благодаря высокой концентрации свободных электронов преобладает электронная теплопроводность. Экспериментальный закон Видемана – Франца устанавливает связь между удельной теплопроводностью λ , $Вт \cdot м K^{-1}$, и удельной электрической проводимостью γ , $См \cdot м^{-1}$

$$\frac{\lambda}{\gamma} = a \cdot T, \quad (2.14)$$

где a – константа Видемана – Франца, $В^2 \cdot K^2$. Для большинства металлов константа a равна числу Лоренца

$$L_0 = 3 \cdot k^2 \cdot e^{-2}, \quad Вт \cdot м^{-3}, \quad (2.15)$$

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

Количество теплоты Q , выделяющееся в единице времени в единице объема проводника, по которому протекает ток плотностью j , $А \cdot м^{-2}$, при напряженности электрического поля E , $В \cdot м^{-1}$, выражается формулой

$$Q = jE = \gamma E^2, \quad Вт \cdot м^{-3}, \quad (2.16)$$

Энергия, выделяемая в проводнике при протекании по нему тока определяется:

$$Q = U \cdot J \cdot t = \frac{U^2 \cdot t}{R} = J^2 \cdot R \cdot t, \quad Дж, \quad (2.17)$$

Сопротивление проводников на высоких частотах. 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

$$j(z) = j_0 \exp(-z / \Delta), \quad (2.18)$$

где j_0 – плотность тока на поверхности, $А \cdot м^{-2}$; 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

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu \gamma}}, \quad (2.19)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$ – 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

$$k_R = \frac{R_{\sim}}{R_0} = \frac{S_0}{S_e}, \quad (2.20)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения проводника, м^2 ; 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.

Влияние механических воздействий. Влияние упругого растяжения или сжатия на удельное сопротивление металла учитывается формулой

$$\rho_b = \rho (1 \pm \varphi \sigma), \text{ Ом} \cdot \text{м}, \quad (1.21)$$

где $\varphi = (1/\rho)(\partial \rho / \partial \sigma)$ – коэффициент механического напряжения, Па^{-1} ; σ – механическое напряжение в сечении образца, Па. Знак "плюс" в выражении соответствует деформации при растяжении, а знак "минус" – при сжатии. Пластическая деформация, как правило, повышает удельное сопротивление металлов вследствие искажения кристаллической решетки.

Термоэлектродвижущая сила (термоЭДС). В однородном проводнике при наличии градиента температуры на концах его возникает разность потенциалов. Ее значение, отнесенное к единичной разности температур на концах проводника, называют абсолютной удельной термоЭДС. В термопарном контуре относительная удельная термоЭДС представляет собой разность абсолютных удельных термоЭДС составляющих проводников

$$\alpha_T = \alpha_T^A - \alpha_T^B, \quad (2.22)$$

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

В замкнутой цепи из двух различных типов металлических проводников, когда области контакта находятся при различных температурах, возникает ЭДС и протекает ток. ТермоЭДС выражается в виде функции $U_{12}(T_1, T_2)$ от

температуры T_1 и T_2 для металлов 1 и 2. В случае, когда потенциал $V(T)$ относится к одному металлу, функция $U_{12}(T_1, T_2)$ запишется в следующем виде:

$$U_{12}(T_1, T_2) = [V_1(T_2) - V_2(T_2)] - [V_1(T_1) - V_2(T_1)] = [U_{12}(T_2)] - [U_{12}(T_1)],$$

или

$$U_{12}(T_1, T_2) = [V_1(T_2) - V_1(T_1)] - [V_2(T_2) - V_2(T_1)] = [V_1(T_2, T_1)] - [V_2(T_2, T_1)].$$

Примеры решения задач

Задача 2.1 Вычислить длину свободного пробега электронов в меди при $T = 300$ К, если ее удельное сопротивление при этой температуре равно $0,017$ мкОм·м.

Решение.

Согласно представлениям квантовой теории, удельное сопротивление металлов связано с длиной свободного пробега электронов l_{cp} соотношением

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

Концентрация свободных электронов в меди

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

Длина свободного пробега

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

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

Решение

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

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

Поэтому $\frac{dR}{dT} = \frac{l}{a^2} \frac{d\rho}{dT} + \rho \frac{dl}{dT} - 2 \frac{\rho l}{a^3} \frac{da}{dT}$.

Разделим обе части на $R = \rho \frac{l}{a^2}$.

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{l}{a^2} \cdot \frac{d\rho}{dT} + \frac{\rho \cdot a^2}{\rho \cdot l \cdot a^2} \cdot \frac{dl}{dT} - 2 \frac{\rho \cdot l \cdot a^2}{\rho \cdot l \cdot a^2} \cdot \frac{da}{dT}$$

$$R dT = a^2 \rho \cdot l dT + \frac{da}{a^2} \cdot \rho \cdot l dT + \rho \cdot l \cdot a^3 dT$$

После сокращений $\alpha_R = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} + \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} + 2 \frac{1}{a} \frac{da}{dT}$.

Для изотропного материала $\alpha_l = \alpha_a$, т.е.

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

Задача 2.3 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

$$\rho_{Cu} - \rho_{As} = b \left(\Delta Z_{Cu} \right)^2 x_{Cu} - b \left(\Delta Z_{As} \right)^2 x_{As} = b \left(16 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-2} \right) = 0,06b.$$

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

Задача 2.4 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} K^{-1} .

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

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

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

Задача 2.5 Доказать, что средняя энергия свободных электронов в металле вблизи $T = 0$ К составляет $3/5$ энергии Ферми.

Решение

При низкой температуре уровень Ферми W_F характеризует максимальную энергию электронов проводимости в металле. Распределение электронов по энергиям

$$dn(W) = N(W) f(W) dW,$$

где $dn(W)$ – число электронов, приходящихся на энергетический интервал от

W до $W + dW$ – плотность состояний в зоне проводимости, т. е. число состояний, приходящихся на единичный интервал энергий; $f(W)$ – вероятность заполнения квантовых состояний электронами.

В соответствии с распределением Ферми – Дирака для всех состояний с энергией $W < W_F$ функция $f(W) = 1$, а для состояний с энергией функция $f(W) = 0$. Для определения средней энергии электронов необходимо суммарную энергию всех электронов, находящихся в единице объема, разделить на их концентрацию n :

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \int_0^{W_F} W dn(W) = \int_0^{W_F} W N(W) dW.$$

Учитывая, что

$$N(W) = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{3/2} W^{1/2},$$

$$n = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{3/2} W_F^{3/2},$$

где m_n – эффективная масса электрона, получаем

$$\bar{W} = \frac{3}{2W_F^{3/2}} \int_0^{W_F} W W^{1/2} dW = \frac{3}{5} W_F.$$

Задача 2.6 Рассчитать положение уровня Ферми и суммарную кинетическую энергию свободных электронов в 1 см^3 серебра при температуре вблизи абсолютного нуля, полагая, что число свободных электронов равно количеству атомов серебра.

Решение

Концентрация свободных электронов равна концентрации атомов, поэтому $n = N_0 d / A$, где d – плотность материала. Отсюда энергия Ферми

$$W_F = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3N_0 d}{\pi A} \right)^{2/3} = \frac{\left(\frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 3,14 \cdot 107,87 \cdot 10^{-3}} \right)^2}{8 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} = 8,80 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 5,5 \text{ эВ}.$$

Суммарная кинетическая энергия свободных электронов

$$W = \int_0^{W_F} W dn = \frac{8\pi V}{3} \left(\frac{2m_0}{h^2} \right)^{3/2} W_F^{5/2} = \frac{8 \cdot 3,14 \cdot 10^{-6}}{5 \left(6,62 \cdot 10^{-34} \right)^3} \left(2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \right)^{3/2} \left(8,8 \cdot 10^{-19} \right)^{5/2} = 3,08 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

Задача 2.7 Определить минимальную длину волны де Бройля для свободных электронов при $T \approx 0$ К в металле с простой кубической кристаллической решеткой, если на каждый атом кристалла приходится один свободный электрон. Период решетки равен a .

Решение

В кристалле с простой кубической решеткой на объем каждой элементарной ячейки приходится один атом и соответственно один свободный электрон. Поэтому концентрация свободных электронов определяется по формуле $n = a^{-3}$. С учетом этого минимальная длина волны де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{mu_F} = \frac{h}{\sqrt{2mW_F}} = \frac{h}{\sqrt{2m \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3}{\pi a^3} \right)^{2/3}}} = \frac{2a}{\left(\frac{3}{\pi} \right)^{1/3}} \approx 2a.$$

Задача 2.8 Оценить среднее энергетическое расстояние δW между разрешенными энергетическими уровнями зоны проводимости в кристалле серебра объемом $V = 1 \text{ см}^3$, если энергия Ферми $W_F = 5,5 \text{ эВ}$.

Решение

Среднее энергетическое расстояние между разрешенными уровнями $\delta W = W_F / N$, где N – число уровней, заполненных электронами.

Концентрация электронов связана с энергией Ферми выражением

$$n = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{2m_0}{h^2} \right)^{3/2} W_F^{3/2}.$$

Все уровни, лежащие ниже уровня Ферми W_F , практически полностью заполнены электронами, причем согласно принципу Паули на каждом уровне находится два электрона. Отсюда следует, что

$$\delta W = \frac{W_F}{nV/2} = \frac{4\pi}{3} \frac{2m_0}{h^2} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{1/3} W_F = \frac{4 \cdot 3,14}{3} \frac{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^2} \frac{5,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{10^{-6}} = 3 \cdot 10^{-41} \text{ Дж} = 1,89 \cdot 10^{-22} \text{ эВ.}$$

Задача 2.9 Определить время, в течение которого электрон пройдет расстояние 1 км по медному проводу, если удельное сопротивление меди $0,017$

мкОм·м, а разность потенциалов на концах проводника $U = 220$ В. За какое время электрон пролетит это же расстояние, двигаясь без соударения, при той же разности потенциалов? Каково время передачи сигнала?

Решение

Из закона Ома следует, что удельная проводимость $\gamma = env |E|$.

Концентрация свободных электронов в меди $n = 8,45 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Тогда средняя скорость дрейфа электронов

$$v = E / (\rho en) = U / (\rho enl) = \frac{220}{0,017 \cdot 10^{-6} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,45 \cdot 10^{28} \cdot 10^3} = 9,6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

Время дрейфа электрона по проводнику $t = l / v = 10^6$ с.

При отсутствии столкновений с узлами решетки электрон движется равноускоренно и время пролета

$$t_{\text{пр}} = \sqrt{2l / a} = \sqrt{2l^2 m (eU)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 220}} = 2,26 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Передача энергии вдоль проводов линии осуществляется электромагнитным полем, распространяющимся вдоль проводов со скоростью света c . Полагая, что средой, окружающей провод, является воздух, время передачи сигнала

$$t_c = l / c = 10^3 / (3 \cdot 10^8) = 3,33 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Задача 2.10 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 проволоки в холодном состоянии $l = 50$ м. Температурный коэффициент удельного сопротивления нихрома принять равным $15 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

Решение

Температурный коэффициент сопротивления проволоки:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 (T_2 - T_1)} = \frac{56,6 - 50}{50(1000 - 20)} = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}.$$

Тогда

$$\alpha_l = \alpha_\rho - \alpha_R = (15 - 13,5) \cdot 10^{-5} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}.$$

Отсюда

$$\Delta l = l \alpha_l \Delta T = 50 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 980 = 0,735 \text{ м}.$$

Задача 2.11 Определить, во сколько раз изменится удельная теплопроводность λ_T меди при изменении температуры ΔT от 20 до 200 °С.

Решение

Согласно закону Видемана – Франца, $\lambda_T / \gamma = L_0 T$, где γ – удельная проводимость; $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2 \cdot \text{К}^{-2}$ – число Лоренца. Отсюда следует, что

$$\frac{\rho_{T_1}}{\rho_{T_2}} = \frac{\rho_{T_1}}{\rho_{T_2}} = \frac{(1 + \alpha \rho_T \Delta T) T_1}{T_2} = \frac{(1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 280) 293}{773} = 1,36.$$

Задача 2.12 Удельное сопротивление меди, содержащей 0,3 ат. % олова при температуре 300 К, составляет 0,0258 мкОм·м. Определить отношение β удельных сопротивлений меди при температурах 300 и 4,2 К: $\beta = \rho_{300} / \rho_{4,2}$.

Решение

Согласно правилу Маттисена, $\rho = \rho_T + \rho_{\text{ост}}$, где ρ_T – сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки; $\rho_{\text{ост}}$ – остаточное сопротивление, связанное с рассеянием электронов на неоднородностях структуры. Для чистой меди $\rho \approx \rho_T$. При $T = 300$ К $\rho_T = 0,0168$ мкОм·м. Вблизи температуры абсолютного нуля полное сопротивление реального металлического проводника равно остаточному сопротивлению. Отсюда следует, что

$$\beta = \frac{\rho_{300}}{\rho_{4,2}} = \frac{\rho_{300}}{\rho_{\text{ост}}} = \frac{\rho_{300}}{\rho_{300} - \rho_T} = \frac{0,0258}{0,0258 - 0,0168} = 2,87.$$

Задача 2.13 Температура перехода в сверхпроводящее состояние $T_{\text{св}}$ для олова в отсутствие магнитного поля равна 3,7 К, а критическая напряженность магнитного поля $H_{\text{св}}$, при температуре абсолютного нуля ($T = 0$ К) составляет $2,4 \cdot 10^4$ А / м. Рассчитать максимально допустимое значение тока при температуре $T = 2$ К для провода диаметром $d = 1$ мм, изготовленного из сверхпроводящего олова. Определить для этой температуры диаметр провода, по которому может протекать ток 100 А без разрушения сверхпроводящего состояния.

Решение

Для сверхпроводников первого рода справедливо соотношение $H_{\text{св}}(T) = H_{\text{св}} \left(1 - \left(\frac{T}{T_{\text{св}}} \right)^2 \right)$, для олова $H_{\text{св}}(2\text{ К}) = 2,4 \cdot 10^4 \left(1 - \left(\frac{2,0}{3,7} \right)^2 \right) = 1,7 \cdot 10^4$ А / м. Предельный ток

ограничивается критической напряженностью магнитного поля на поверхности образца. Для цилиндрического провода

$$I_{\text{св}} = \pi d H_{\text{св}}(T) = 3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 1,7 \cdot 10^4 = 53,4 \text{ А}.$$

Диаметр провода, по которому может протекать ток 100 А,

$$d_{100} = 100 \left(\frac{100}{3,14 \cdot 1,7 \cdot 10^4} \right) = 1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Таким образом, плотность предельного тока в сверхпроводниках первого рода уменьшается с увеличением диаметра провода; при этом предельный ток пропорционален диаметру провода, а не площади его поперечного сечения.

Задача 2.14 Непрерывные экспериментальные наблюдения за током, наведенным в замкнутом контуре из сверхпроводящего материала, показали, что в течение одного года ток уменьшается в результате релаксации системы к равновесному состоянию всего на 0,01 %. Принимая концентрацию электронов проводимости $n = 4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, оцените удельное сопротивление материала в сверхпроводящем состоянии и сравните его с удельным сопротивлением меди в нормальных условиях.

Решение

В соответствии с кинетическим уравнением Больцмана затухание тока определяется выражением $i(t) = i_0 \exp(-t/\tau)$, где τ – время релаксации. Отсюда следует, что

$$\frac{i_0 - i}{i_0} = 1 - \exp(-t/\tau) = 10^{-4}.$$

Для $t = 3,15 \cdot 10^7 \text{ с}$ (1 год) $\tau = 3,15 \cdot 10^{11} \text{ с}$.

Удельная проводимость материала связана с временем релаксации соотношением

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{e^2 n \tau}{m} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19}) \cdot 4 \cdot 10^{28} \cdot 3,15 \cdot 10^{11}}{9,1 \cdot 10^{-31}} = 3,54 \cdot 10^{32} \text{ См/м}.$$

Сравнивая удельные сопротивления сверхпроводника и меди ($\rho_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$), получаем

$$\rho = \rho_{Cu} = \left(3,54 \cdot 10^{32} \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \right)^{-1} = 1,66 \cdot 10^{-25}.$$

Задача 2.15. Определить напряженность электрического поля, возникающего в зазоре между пластинами плоского конденсатора, одна из которых изготовлена из алюминия, а другая из платины. Пластины соединены между собой медным проводом, а длина зазора $l = 5 \text{ мм}$. Работа выхода электронов из алюминия, меди и платины составляет соответственно 4,25; 4,4 и 5,32 эВ. Как изменится напряженность поля, если алюминиевую и медную пластины замкнуть проводом из платины при той же длине зазора?

Решение

Разность потенциалов на концах последовательной разнородной цепи определяется различием в работах выхода электронов из крайних проводников и не зависит от числа и состава промежуточных звеньев. Поэтому в первом случае имеем

$$E_1 = \frac{A_{Al} - A_{Pt}}{el} = \frac{4,25 - 5,32}{5 \cdot 10^{-3}} = -214 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

во втором

$$E_1 = \frac{A_{Al} - A_{Cu}}{el}$$

$$= \frac{4,25 - 4,4}{5 \cdot 10^{-3}} = -30 \frac{\text{B}}{\text{M}}.$$

Задача 2.16 При измерении температуры в печи с помощью термопары Pt - (90 % Pt + 10% Rh) вольтметр показал 7,82 мВ. Температура холодного спаея термопары была стабилизирована на уровне 100 °С. Пользуясь градуировочной таблицей для данной термопары (табл. 2), определить температуру в печи.

Таблица 2

$T, ^\circ\text{C}$	0	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Термо-ЭДС, мВ	0,0	0,11	0,65	1,44	2,33	3,25	4,23	5,24	6,27	7,34	8,47	9,61

Решение

Как видно из табл. 2, для данной термопары зависимость термоЭДС от разности температур горячего и холодного спаев нелинейна, поэтому

$$U(T, 100) + U(100, 0) = U(T, 0),$$

в скобках указаны температуры спаев.

Из табл. 2 находим $U(100, 0) = 0,65$ мВ, тогда $U(T, 0) = 7,82 + 0,65 = 8,47$ мВ. Найденной термоЭДС соответствует температура в печи $T = 900$ °С.

Задача 2.17 Сопротивление вольфрамовой нити электрической лампочки при 20 °С 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 °С можно принять равным $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Решение

С учетом линейной зависимости сопротивления металлического проводника от температуры имеет: $R_2 = R_1 [1 + \alpha_R (T_2 - T_1)]$, где R_1, R_2 – сопротивления при комнатной температуре T_1 и при температуре T_2 соответственно. Для вольфрама можно считать, что $\alpha_R \approx \alpha_\rho$. Сопротивление нити лампочки в рабочем режиме $R_2 = U / I = 220 / 0,6 = 366,7$ Ом. Тогда

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (R_2 - R_1) / (R_1 \alpha_R) = (366,7 - 35) / (35 \cdot 5 \cdot 10^{-3}) = 1895 \text{ K}.$$

Окончательно имеем $T_2 = 1895 + 293 = 2188 \text{ K}$.

Задача 2.18 Требуется изготовить проволоку, которая выдерживает растяжение силой $F = 50$ Н, не претерпевая пластической деформации; при этом сопротивление 1 м проволоки не должно превышать 0,02 Ом. Определить и сравнить наименьшие допустимые диаметры проволоки, изготовленной из отожженной меди и отожженного алюминия. Какая проволока экономически более выгодна, если цена 1 кг алюминия в 1,5 раза ниже цены 1 кг меди.

Предел текучести σ_T отожженной меди и отожженного алюминия принять равным соответственно 70 и 35 МПа.

Решение

Наименьший диаметр проволоки D_σ , при котором отсутствует пластическая деформация, определяется из выражения: $\sigma_T = 4F / (\pi D_\sigma^2)$.

Отсюда $D_\sigma = \sqrt{4F / (\pi \sigma_T)}$.

Наименьший диаметр, необходимый для обеспечения заданного сопротивления R проволоки длиной l , определяется по формуле

$$D_\rho = \sqrt{4\rho l / (\pi R)} = \sqrt{4\rho / (\pi R_1)},$$

где ρ – удельное сопротивление материала проволоки; $R_1 = R / l$ – сопротивление 1 м проволоки.

Для меди

$$D_\sigma = \sqrt{4 \cdot 50 / (3,14 \cdot 70 \cdot 10^6)} = 0,95 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$D_\rho = \sqrt{4 \cdot 0,017 \cdot 10^{-6} / (3,14 \cdot 0,02)} = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Выбираем $D_{Cu \text{ min}} = 1,04 \text{ мм}$.

Для алюминия

$$D_\sigma = \sqrt{4 \cdot 50 / (3,14 \cdot 35 \cdot 10^6)} = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$D_\rho = \sqrt{4 \cdot 0,028 \cdot 10^{-6} / (3,14 \cdot 0,02)} = 1,335 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Требованиям задания удовлетворяет $D_{Al \text{ min}} = 1,35 \text{ мм}$.

Стоимость 1 м проволоки $\chi = \chi_0 d \pi D_{\text{min}}^2 / 4$, где χ_0 – стоимость 1 кг проволоки; d – плотность материала. Тогда

$$\frac{\chi_{Cu}}{\chi_{Al}} = \frac{\chi_0 d_{Cu}}{\chi_0 d_{Al}} \frac{D_{Cu \text{ min}}^2}{D_{Al \text{ min}}^2} = \frac{1,5 \cdot 8900 (1,04 \cdot 10^{-3})^2}{2700 (1,35 \cdot 10^{-3})^2} = 2,93.$$

Таким образом, алюминиевая проволока почти в 3 раза дешевле медной.

Задача 2.19 Углеродистый резистор и проволочный резистор, изготовленный из нихрома, имеют одинаковое номинальное сопротивление $R_{\text{ном}} = 100 \text{ Ом}$. Резисторы соединены параллельно и включены под напряжение $U = 50 \text{ В}$. Одинаковая ли мощность будет выделяться на этих резисторах?

Решение

В первый момент после подачи напряжения на резисторах выделяется

одинаковая мощность $P_{\text{нач}} = U^2 / R_{\text{ном}} = 25$ Вт. Затем происходит разогрев резисторов до максимальной температуры, определяемой выделяющейся электрической мощностью и условиями теплоотвода. Поскольку нихром имеет положительный температурный коэффициент удельного сопротивления, а проводящие модификации углерода – отрицательный, то при нагревании сопротивление резистора из нихрома становится больше

номинального, а сопротивление углеродистого резистора, наоборот, уменьшается. Соответственно в углеродистом резисторе выделяется большая мощность.

Задача 2.20 Вычислить, во сколько раз сопротивление $R_{\sim}$ медного провода круглого сечения диаметром $d = 1$ мм на частоте $f = 10$ МГц больше сопротивления R_0 этого провода постоянному электрическому току.

Решение

Глубина проникновения электромагнитного поля в проводник

$$\Delta = \sqrt{\rho / (\pi f \mu_0 \mu)},$$

где ρ – удельное сопротивление проводника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость материала. Поскольку медь диамагнитна, $\mu = 1$. Тогда для меди на частоте 10 МГц

$$\Delta = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{0,017 \cdot 10^{-6}}{10^7 \cdot 10^{-7}}} = 2,07 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Как видно, $\Delta \ll d$, а в случае сильно выраженного поверхностного эффекта коэффициент увеличения сопротивления провода круглого сечения

$$K_R = R / R_0 = d / (4\Delta) = 10^{-3} / (4 \cdot 2,07 \cdot 10^{-5}) = 12.$$

Задача 2.21 Миниатюрный резистор сопротивлением $R = 120 \text{ Ом} \pm 10\%$, имеющий номинальную мощность рассеяния $P_{\text{ном}} = 0,05$ Вт, используется на частоте 50 Гц. Температурный коэффициент сопротивления резистора $\alpha_R = -2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. Известно, что из-за малых габаритов резистора при постоянном предельном напряжении $U_{\text{пр}} = 100$ В происходит поверхностный пробой между выводами. Определить, какое максимальное напряжение может быть приложено к этому резистору при температурах: а) 20°C ; б) 100°C .

Решение

Максимальное напряжение, которое может быть подано на резистор, не должно превышать значения, рассчитанного исходя из номинальной мощности рассеяния и сопротивления (с учетом допуска $\Delta R = \pm 0,1R$ и температурных изменений) по формуле $U_{\text{max}} = \sqrt{P_{\text{ном}} (R_T - \Delta R)}$. В то же время

это напряжение не должно быть больше предельного напряжения $U_{\text{пр}}$, вызывающего поверхностный пробой.

а) При $T = 20^\circ \text{C}$

$$U_{\text{max}} = \sqrt{0,05(120 - 120 \cdot 0,1)} = 2,32 \text{ В} < U_{\text{пр}};$$

б) сопротивление резистора при $T = 100^\circ \text{C}$:

$$R_T = R[1 + \alpha_R (T - 20)] = 120[1 - 2 \cdot 10^{-3}(100 - 20)] = 100,8 \text{ Ом.}$$

Тогда $U_{\text{max}} = \sqrt{0,05(100,8 - 100,8 \cdot 0,1)} = 2,13 \text{ В} < U_{\text{пр}}$.

Задача 2.22 Определить площадь поперечного сечения плавкого свинцового предохранителя, рассчитанного на предельный ток в цепи $I = 6$ А, если удельное сопротивление свинца $\rho = 0,19$ мкОм·м, плотность его $d = 11,34$ Мг / м³, а температура плавления $T_{пл} = 327$ °С. Теплоотводом во внешнюю среду ввиду кратковременности аварийного режима пренебречь (с учетом требования быстрогодействия защиты при наступлении аварийного режима в цепи). Начальную температуру предохранителя принять равной 20°С.

Решение

Теплота, выделяющаяся в предохранителе при прохождении тока, идет на повышение его температуры: $\rho I^2 |S = c l S d \Delta T$. Входящая в уравнение

теплового баланса удельная теплоемкость свинца вблизи температуры плавления определяется теплоемкостью кристаллической решетки: $c \approx c_{кр} = 3R$ А| = 121 Дж / (кг·К), откуда следует, что

$$S = \sqrt{\frac{\rho I^2 A}{3 R d \Delta T}} = \sqrt{\frac{0,19 \cdot 10^{-6} \cdot 36}{121 \cdot 11340 (327 - 20)}} = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 0,12 \text{ мм}^2.$$

Задачи для самостоятельного решения

2.1 Катушка из медной (алюминиевой) проволоки имеет сопротивление 10,8 Ом. Масса медной (алюминиевой) проволоки 0,3 кг. Определить длину и диаметр намотанной на катушку проволоки.

2.2 Медный и алюминиевый провода равной длины имеют одинаковые сопротивления. Определить отношение диаметров этих проводов. Вычислить, во сколько раз масса алюминиевого провода меньше массы медного провода.

2.3 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?

2.4 Определить время, в течение которого электрон пройдет расстояние 1 км по медному проводу, если удельное сопротивление меди 0,017 мкОм·м, а разность потенциалов на концах проводника $U = 220$ В. За какое время электрон пролетит это же расстояние, двигаясь без соударений, при той же разности потенциалов? Каково время передачи сигнала?

2.5 Требуется изготовить проволоку, которая выдерживает растяжение силой $F = 50$ Н, не претерпевая пластической деформации; при этом сопротивление 1 м проволоки не должно превышать 0,02 Ом. Определить и сравнить наименьшие допустимые диаметры проволоки, изготовленной из отожженной меди и отожженного алюминия. Какая проволока экономически более выгодна, если цена 1 кг алюминия в 1,5 раза ниже цены 1 кг меди. Предел

текущей σ_T отожженной меди и отожженного алюминия принять равным соответственно 70 и 35 МПа.

2.6 Вычислить падение напряжения на полностью включенном реостате, изготовленном из константановой проволоки длиной 10 м при плотности тока $5 \text{ А} \cdot \text{мм}^{-2}$. Удельное сопротивление константана принять равным $0,5 \text{ мОм} \cdot \text{м}$.

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

2.8 Один полюс источника тока присоединен к электрической схеме медным проводом, а другой – алюминиевым проводом такого же диаметра. Сравнить скорости дрейфа электронов в подводящих проводах, считая, что на каждый атом меди приходится один электрон проводимости, а на каждый атом алюминия – три электрона проводимости.

2.9 Удельное сопротивление меди, содержащей 0,3 % атомов олова, при температуре 300 К составляет $0,0258 \text{ мОм} \cdot \text{м}$. Определить отношение удельных сопротивлений меди при температуре 300 и 4,2 К: $\beta = \rho_{300} / \rho_{4,2}$. Во сколько раз изменится отношение $\beta = \rho_{300} / \rho_{4,2}$, если содержание олова в медном проводнике снизить до 0,03 % атомов?

2.10 Удельное сопротивление медного проводника, содержащего 0,5 % атомов индия, равно $0,0234 \text{ мОм} \cdot \text{м}$. Определить концентрацию атомов индия в медном сплаве с удельным сопротивлением $0,0298 \text{ мОм} \cdot \text{м}$, полагая, что все остаточное сопротивление обусловлено рассеянием на примесных атомах индия.

2.11 На диэлектрическую подложку нанесена металлическая пленка толщиной 0,1 мкм, имеющая форму прямоугольника размерами $1 \times 5 \text{ мм}$. Сопротивление пленки при напряжении, приложенном в продольном направлении, составляет 100 Ом. Определить сопротивление квадрата пленки, а также сопротивление пленки в поперечном направлении (параллельно меньшей стороне прямоугольника).

2.12 Пленочный резистор состоит из трех участков, имеющих различные сопротивления квадрата пленки $R_{\text{кв1}} = 10 \text{ Ом}$; $R_{\text{кв2}} = 20 \text{ Ом}$; $R_{\text{кв3}} = 30 \text{ Ом}$. Определить сопротивление резистора.

2.13 Стержень из графита соединен последовательно с медным стержнем того 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 $-1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

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

2.15 Определить длину нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм, используемой для изготовления нагревательного устройства, сопротивлением 20 Ом при температуре 1000 °С, полагая, что при 20 °С параметры нихрома: $\rho = 1,0 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$; $\alpha_p = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

2.16 Сопротивление провода из константана при 20 °С равно 500 Ом. Определить сопротивление этого провода при 450 °С, если при 20 °С температурный коэффициент удельного сопротивления константана $\alpha_p = -1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а температурный коэффициент линейного расширения составляет 10^{-5} K^{-1} .

2.17 Сопротивление вольфрамовой нити электрической лампочки при 20 °С равно 35 Ом. Определить температуру нити лампочки, если известно, что при ее включении в сеть напряжением 220 В в установившемся режиме понити проходит ток 0,6 А. Температурный коэффициент удельного сопротивления вольфрама при 20 °С принять равным $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

2.18 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 проволоки в холодном состоянии $l = 50 \text{ м}$. Температурный коэффициент удельного сопротивления нихрома принять равным $15 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

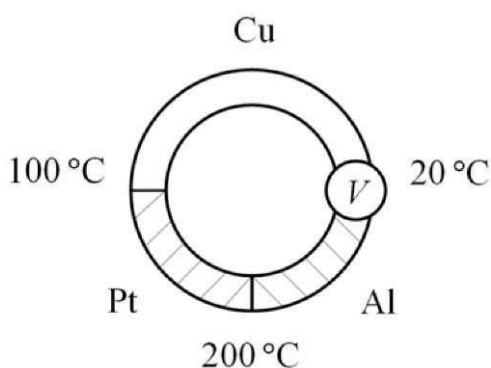
2.19 Пользуясь законами Видемана – Франца, определить отношение удельных теплопроводностей серебра и олова при температуре: а) 20 °С и б) 200 °С. Принять, что при температуре 20 °С удельное сопротивление серебра и олова равны соответственно 0,015 и 0,113 мкОм·м, а температурные коэффициенты удельного сопротивления составляют соответственно $4,1 \cdot 10^{-3}$ и $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

2.20 В цепь включены последовательно медная и нихромовая проволоки равной длины и диаметра. Найти отношение количеств теплоты, выделяющейся в этих проводниках, и отношение падений напряжений на проводах. Удельное сопротивление меди и нихрома равно соответственно 0,017 и 1 мкОм·м.

2.21 Найти количество теплоты, которое выделяется каждую секунду в единицу объема медного (алюминиевого) провода при плотности тока $10 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$.

2.22 Углеродистый резистор и проволочный резистор, изготовленный из нихрома, имеют одинаковое номинальное сопротивление $R_{\text{ном}} = 100 \text{ Ом}$. Резисторы соединены параллельно и включены под напряжение $U = 50 \text{ В}$. Одинаковая ли мощность будет выделяться на этих резисторах?

2.23 Для отопления помещения используют электрокамин, включаемый в сеть напряжением 220 В . Помещение теряет в сутки 10^5 кДж теплоты. Требуется поддерживать температуру в нем неизменной. Найти: а)



Цепь из трех проводников

б) сопротивление нагревательного элемента; в) длину нихромовой проволоки диаметром $0,7 \text{ мм}$, используемой для намотки спирали нагревательного элемента; г) мощность нагревателя. Удельное сопротивление нихрома принять равным $1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

2.24 В замкнутую цепь, состоящую из медного, алюминиевого и платинового проводников, включен милливольтметр (рисунок). Какую термоЭДС покажет прибор при температуре спаев, указанной на рисунке, если для меди абсолютная удельная термоЭДС $\alpha_{\text{Cu}} = 1,8 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$, для алюминия $\alpha_{\text{Al}} = -1,3 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$, для платины $\alpha_{\text{Pt}} = -5,1 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$. Определить удельную термоЭДС алюминия относительно меди и относительно платины.

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

2.26 Ток в цепи, состоящей из термопары сопротивлением 5 Ом и гальванометра сопротивлением 8 Ом , равен $0,5 \text{ мА}$ в случае, когда спай термопары помещен в сосуд с кипящей водой. Чему равна удельная термоЭДС термопары при температуре окружающей среды 20 °C ?

2.27 Один спай термопары помещен в печь с температурой 200 °C , другой находится при температуре 20 °C . Вольтметр показывает при этом термоЭДС $1,8 \text{ мВ}$. Чему равна термоЭДС, если второй спай термопары поместить в сосуд: а) с тающим льдом; б) с кипящей водой? Относительную удельную термоЭДС во всем температурном диапазоне $0 - 200 \text{ °C}$ считать постоянной.

2.28 Вычислить, во сколько раз сопротивление R медного (алюминиевого) провода круглого сечения диаметром $d = 1$ мм на частоте $f = 10$ МГц больше сопротивления R_0 этого провода постоянному электрическому току.

2.29 Вычислить глубину проникновения электромагнитного поля в медный (алюминиевый) проводник на частотах 50 Гц и 1 МГц.

2.30 Определить отношение глубин проникновения электромагнитного поля в алюминиевый и медный проводники на частоте 50 Гц и 1 МГц.

2.31 Найти сопротивление квадрата поверхности плоского проводника из меди на частоте 10 МГц. Удельное сопротивление меди постоянному току принять равным $0,017$ мкОм·м.

2.32 Как изменится активное сопротивление катушки индуктивности, изготовленной из медного провода диаметром 5 мм, на частоте 5 МГц, если медный провод покрыть слоем серебра толщиной 30 мкм.

2.33 Определить отношение глубин проникновения электромагнитного поля в алюминиевый и стальной проводники на частоте 50 Гц и 1 МГц. При расчете полагать, что для малоуглеродистой стали $\mu = 1000$; $\rho = 0,1$ мкОм·м.

2.34 Найти сопротивление квадрата поверхности плоского проводника из латуни на частоте 10 МГц. Удельное сопротивление латуни постоянному току принять равным $0,08$ мкОм·м.

Тема 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРУКТУРЫ

Цель занятия: закрепление физической сущности контактных, магнитоэлектрических, термоэлектрических и фотоэлектрических явлений в полупроводниковых материалах, приобретение практических навыков расчета их параметров, определяющих применение в электронных средствах.

Удельная электрическая проводимость полупроводника

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = e n \mu_n + e p \mu_p, \text{ См}, \quad (3.1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; n, p – концентрация электронов и дырок соответственно, м⁻³; μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок, м²/(В·с).

В примесных полупроводниках n -типа ($n \gg p$) и p -типа ($p \gg n$) удельные электропроводности соответственно равны

$$\sigma_n \cong e n \mu_n, \sigma_p \cong e p \mu_p.$$

Концентрации носителей заряда в полупроводниках

Собственная концентрация носителей заряда (электронов и дырок)

$$n = p = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right), \text{ м}^{-3}, \quad (3.2)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны, Дж; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ – 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.

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2} \approx 0,5 \cdot 10^{16} \left(\frac{m_n}{m} \right)^{3/2} T^{3/2}, \text{ м}^{-3}; \quad (3.3)$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2} \approx 0,5 \cdot 10^{16} \left(\frac{m_p}{m} \right)^{3/2} T^{3/2}, \text{ м}^{-3}; \quad (3.4)$$

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

$$n = n_i \exp\left(\frac{-(E_c - E_F)}{kT}\right), \text{ м}^{-3}; \quad (3.5)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{-(E_F - E_v)}{kT}\right), \text{ м}^{-3}; \quad (3.6)$$

где E_c – энергия дна зоны проводимости, Дж; E_v – энергия потолка валентной зоны, Дж; E_F – энергия уровня Ферми, Дж.

Концентрации носителей заряда связаны с собственной концентрацией носителей соотношением

$$np = n_i^2 = p_i^2. \quad (3.7)$$

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

$$n = \sqrt{\frac{N_c N_d}{2}} e^{-\frac{E_d}{2kT}}; \quad (3.8)$$

$$p = \sqrt{\frac{N_v N_a}{2}} e^{-\frac{E_a}{2kT}}, \quad (3.9)$$

где N_d, N_a – концентрации донорных и акцепторных примесей, м^{-3} ; E_d, E_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

$$n \approx N_d, \quad p \approx N_a.$$

Концентрации основных и неосновных носителей в электронном полупроводнике в области высоких температур

$$n = \sqrt{\left(\frac{N_d}{2}\right)^2 + n_i^2} + \frac{N_d}{2}; \quad (3.10)$$

$$p = \sqrt{\left(\frac{N_a}{2}\right)^2 + n_i^2} + \frac{N_a}{2}. \quad (3.11)$$

Концентрации основных и неосновных носителей в дырочном полупроводнике в области высоких температур

$$p = \sqrt{\left(\frac{N_a}{2}\right)^2 + n_i^2} + \frac{N_a}{2}; \quad (3.12)$$

$$n = \sqrt{\left(\frac{N_d}{2}\right)^2 + n_i^2} + \frac{N_d}{2}. \quad (3.13)$$

Условие электронейтральности

$$n + N_a^* = p + N_d^*, \quad (3.14)$$

где N_d^*, N_a^* – концентрации ионизированных донорных и акцепторных примесей.

Подвижность носителей

$$\mu = \frac{v}{E}, \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}, \quad (3.15)$$

где v – дрейфовая скорость носителей, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; E – напряженность электрического поля, $\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$.

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

$$\mu = \frac{e \cdot l_{\text{ср}}}{m^* v_T}, \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}, \quad (3.16)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; m^* – эффективная масса частицы, кг; $l_{\text{ср}}$ – средняя длина свободного пробега частицы, м; $v_T = (3kT/m^*)^{1/2}$ – средняя тепловая скорость частицы, м·с⁻¹.

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

С подвижностью связаны *коэффициенты диффузии* носителей

$$D_n = \left(\frac{kT}{e} \right) \mu_n, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}; \quad (3.17)$$

$$D_p = \left(\frac{kT}{e} \right) \mu_p, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}; \quad (3.18)$$

Эффект Холла состоит в возникновении разности потенциалов на противоположных гранях полупроводника, помещенного в скрещенные электрическое и магнитное поля (рис. 4.1).

$$U_H = \frac{R_H IB}{R} = \frac{A \rho \mu_d IB}{h},$$

где I – протекающий ток, А; B – магнитная индукция, Тл; μ_d – дрейфовая

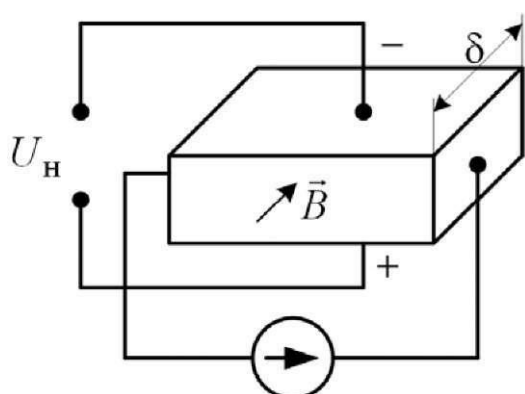


Рис. 4.1. Эффект Холла

подвижность носителей, м²·(В·с)⁻¹; ρ – удельное сопротивление, Ом·м; h – толщина пластины, м; $R_H = r/en$ – коэффициент Холла, м³·Кл⁻¹, знак которого совпадает со знаком носителей заряда; n – концентрация носителей заряда (электронов или дырок), м⁻³; A – холл-фактор, учитывающий статистическое распределение скоростей свободных носителей, теоретически $A = 1,93$ при рассеянии носителей заряда на ионах примеси и $A = 1,18$ при рассеянии на тепловых колебаниях решетки. В

сильном магнитном поле коэффициент Холла не зависит от механизма рассеяния и равен 1.

Магнитнорезистивный эффект. Изменение сопротивления полупроводника в магнитном поле обусловлено закручивающим действием магнитного поля на движущиеся носители заряда. Магнитнорезистивный

эффект характеризуется коэффициентом H , Тл^{-2}

$$H = \frac{1}{B^2} \frac{\rho_B - \rho}{\rho} = \frac{1}{B^2} \frac{\sigma - \sigma_B}{\sigma}, \quad (3.19)$$

B

где ρ_B, σ_B – удельное электрическое сопротивление и удельная электрическая проводимость полупроводникового образца вдоль электрического поля при наложении поперечного магнитного поля индукцией B .

В ограниченном полупроводнике в области слабых полей H постоянна, в области сильных полей $H \sim B^2$, что приводит к насыщению сопротивления.

Фотопроводимость. При освещении полупроводника плотность добавочного фототока в стационарном состоянии

$$j_\phi = eE(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p), \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (3.20)$$

где E – напряженность продольного электрического поля, $\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$; $\Delta n = G\tau_n$, $\Delta p = G\tau_p$ – концентрации фотовозбужденных электронов и дырок, м^{-3} ; G – скорость генерации носителей, $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$; τ_n, τ_p – время жизни электронов и дырок, с.

Эффект Зеебека состоит в возникновении электрического поля $E^\alpha, \text{В} \cdot \text{м}^{-1}$, в веществе, в котором создан градиент температуры $\nabla T, \text{К} \cdot \text{м}^{-1}$:

$$E^\alpha = \alpha \nabla T, \quad (3.21)$$

где α – абсолютная дифференциальная термоЭДС, $\text{В} \cdot \text{К}^{-1}$.

Абсолютная дифференциальная термоЭДС в примесном невырожденном полупроводнике

$$\alpha = \frac{k}{e} \left(\frac{5}{2} + S + \ln \frac{N_c}{n} \right), \quad (3.22)$$

где S – показатель степени зависимости времени релаксации от энергии носителей заряда; $S = -1/2$ для рассеяния на тепловых колебаниях решетки (фононах), $S = 3/2$ для рассеяния на ионах примеси. Знак α совпадает со знаком носителя заряда.

В полупроводнике, имеющем смешанную проводимость $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$:

$$\alpha = \frac{\alpha_n \sigma_n + \alpha_p \sigma_p}{\sigma_n + \sigma_p}. \quad (3.23)$$

ТермоЭДС E_{12} замкнутой электрической цепи, состоящей, по крайней мере, из двух различных веществ, контакты которых имеют разные температуры,

$$E_{12}^\alpha = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{12} dT, \quad (3.24)$$

где $\alpha_{12} = \alpha_2 - \alpha_1$ – относительная дифференциальная термоЭДС; α_1 и α_2 – абсолютные дифференциальные термоЭДС контактируемых веществ.

Эффект Пельтье заключается в выделении или поглощении тепла в контакте двух веществ при прохождении через него внешнего тока. Если внешний ток идет по направлению контактного поля, то есть по направлению термотока, который возникает при нагревании данного контакта, то этот контакт охлаждается. Если внешний ток направлен против контактного поля, то контакт нагревается. Количество выделяемого (поглощаемого) тепла dQ_{12} при прохождении тока от первого вещества ко второму веществу зависит от вида контактирующих веществ, силы тока I и времени прохождения тока dt

$$dQ_{12} = \Pi_{12} I dt, \quad (3.25)$$

где Π_{12} – относительный коэффициент Пельтье, В; $\Pi_{12} > 0$, если при прохождении тока из 1-го образца во 2-й образец теплота выделяется.

Относительный коэффициент Пельтье и относительная дифференциальная термоЭДС связаны

$$\Pi_{12} = \alpha_{12} T. \quad (3.26)$$

Эффект Томсона состоит в выделении или поглощении тепла в проводнике, обусловленном градиентом температуры, при прохождении тока. Если направление внешнего поля E совпадает с направлением внутреннего, обусловленного градиентом температуры, термоэлектрического поля E^a , то проводник охлаждается. Направление внешнего поля против внутреннего поля приводит к выделению в проводнике тепла, дополнительного к лент-джоулевым потерям.

Выделение тепла dQ^T за время dt в объеме dV , обусловленное градиентом, определяется соотношением

$$dQ^T = -\tau \cdot \nabla T \cdot j \cdot dV \cdot dt, \quad (3.27)$$

где j – плотность внешнего тока, $A \cdot m^{-2}$, τ – коэффициент Томсона, $B \cdot K^{-1}$.

Абсолютная дифференциальная термоЭДС α и коэффициент Томсона связаны

$$\tau = T \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial T}. \quad (3.28)$$

Выбор материала для термопар, термоэлектрических генераторов и холодильников осуществляется по величине параметра эффективности Z , K^{-1} , который для однородного материала задается соотношением

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda}, \quad (3.29)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, $B \cdot (m \cdot K)^{-1}$.

Параметр эффективности контактного термоэлектрического преобразователя

$$Z = \frac{\left[\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\left(\frac{\lambda}{\sigma_1} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\lambda}{\sigma_2} \right)^{\frac{1}{2}}} \right]^2}{\left(\frac{\lambda}{\sigma_1} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\lambda}{\sigma_2} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (3.30)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности контактируемых материалов.

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

$$V_{k0} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{p_{p0}}{p_{n0}} \right) = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_{p0}}{n_{n0}} \right) = kT \ln \left(\frac{\rho_p}{\rho_n} \right), \quad \text{В}, \quad (3.31)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ – 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, Ом·м; $b = \mu_n / \mu_p$ – отношение подвижностей электронов и дырок.

Высота потенциального барьера при прямом смещении p - n перехода уменьшается

$$V_k = V_{k0} - U, \quad \text{В}, \quad (3.32)$$

при обратном смещении увеличивается

$$V_k = V_{k0} + U, \quad \text{В}, \quad (3.33)$$

где U – приложенное напряжение между p и n слоями, В.

Вольтамперная характеристика идеального p - n -перехода имеет вид

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{eV_k}{kT} \right) - 1 \right), \quad \text{А}, \quad (3.34)$$

где I_0 – тепловой ток (ток насыщения), А,

$$I_0 = \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} S, \quad (3.35)$$

где D_p, D_n – коэффициенты диффузии дырок и электронов, м²·с⁻¹; p_{n0}, n_{p0} – равновесные концентрации дырок и электронов в n и p слоях, м⁻³; S – площадь перехода, м²; L_p, L_n – диффузионные длины дырок и электронов, м,

$$L_{p(n)} = \sqrt{D_{p(n)} \tau_{p(n)}}, \quad (3.36)$$

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

Барьерная емкость р-п перехода

$$C_{\text{Б}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l_0} \sqrt{\frac{V_{\text{к0}}}{V_{\text{к0}} - U}}, \Phi, \quad (3.37)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала; U – приложенное обратное напряжение, В; l_0 – равновесная ширина перехода

$$l_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V_{к0}}{e} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)}, \text{ м} \quad (3.38)$$

где N_d, N_a – концентрации донорных и акцепторных примесей в n и p слоях, м^{-3} .

При прямом смещении емкость перехода обусловлена в основном **диффузионной емкостью**, которая на низких частотах равна

$$C^Д = \frac{e}{kT} \left(\frac{eL_p p_{n0}}{2} + \frac{eL_n n_{p0}}{2} \right) S \exp\left(\frac{eU}{kT}\right), \text{ Ф}, \quad (3.39)$$

где p_{n0}, n_{p0} – равновесные концентрации дырок и электронов в n и p слоях, м^{-3} ;

U – падение напряжения на переходе, В.

При прямом смещении **контакта металл – полупроводник** (контакта Шоттки) плотность тока

$$j = \left[\frac{(eU)}{kT} \right] j_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (3.40)$$

где j_0 – плотность обратного тока насыщения, $\text{А} \cdot \text{м}^{-2}$; U – приложенное напряжение, В.

Примеры решения задач

Задача 1. 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. Принять собственную концентрацию носителей заряда при комнатной температуре $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$, подвижность дырок $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$.

Решение

Минимум удельной проводимости находим из условия $d\sigma/dn = 0$.
Учитывая, что $\sigma = en\mu_n + ep\mu_p = en\mu_n + (en_i^2\mu_p/n)$, после дифференцирования получим

$$e\mu_n - en_i^2\mu_p/n^2 = 0.$$

Решая это уравнение, находим

$$n = n_i \sqrt{\mu_p / \mu_n};$$

$$p = n_i \sqrt{\mu_n / \mu_p}.$$

Для германия при 300 К получаем

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

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

Таким образом, минимальную удельную проводимость имеет слаболегированный полупроводник p -типа. Учитывая, что собственная удельная проводимость определяется уравнением $\sigma_i = en_i(\mu_n + \mu_p)$, находим искомое отношение

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_{\min}} = \frac{\mu_n + \mu_p}{2\sqrt{\mu_n\mu_p}} = \frac{0,39 + 0,19}{2\sqrt{0,39 \cdot 0,19}} = 1,065.$$

Задача 2. Кристаллы арсенида галлия n -типа имеют удельное сопротивление $\rho = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, подвижность электронов $\mu_n = 0,2 \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$ и в качестве основной легирующей примеси содержат кремний в количестве 10^{-2} атома %. Полагая, что все атомы кремния электрически активны, определить, сколько их находится в узлах галлия и сколько в узлах мышьяка. Плотность материала $d = 5320 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Решение

Число атомов галлия и мышьяка в единице объема

$$N_{\text{Ga}} = N_{\text{As}} = N_{\text{GaAs}} = d \frac{N_{\text{A}}}{M_{\text{GaAs}}} = \frac{5320 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{144,64 \cdot 10^{-3}} = 2,214 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

В единице объема арсенида галлия содержится $N_{\text{Ga}} + N_{\text{As}} = 4,42 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ атомов.

Общая концентрация атомов кремния в решетке GaAs

$$N_{\text{Si}} = 4,42 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-4} = 4,42 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

Концентрация электронов определяется разностью концентраций доноров и акцепторов

$$n = N_{\text{д}} - N_{\text{а}} = (e r \mu_n)^{-1} = (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,2)^{-1} = 1,56 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

Кремний является амфотерной примесью в GaAs и проявляет акцепторные свойства при вхождении в узлы мышьяка и донорные – при замещении атомов галлия. Поэтому $N_{\text{Si}}(\text{Ga}) - N_{\text{Si}}(\text{As}) = 1,56 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Из приведенных формул следует, что

$$N_{\text{Si}}(\text{Ga}) = 3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3};$$

$$N_{\text{Si}}(\text{As}) = 1,42 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

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

Решение

Удельное сопротивление связано с концентрацией электронов и дырок уравнением

$$\frac{1}{\rho} = e n \mu_n + e p \mu_p = e n_i^2 \mu_n \left(\frac{1}{p} + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right).$$

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

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

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

Задача 4. Определить концентрацию носителей заряда в собственном германии при температуре 350 К. Данные необходимые для расчета взять из таблицы 2.

Решение

Полупроводник называется собственным или типа *i* (*intrinsic*), если в нем отсутствуют какие-либо примеси. В этом случае свободные электроны и дырки образуются попарно только за счет тепловой генерации и рекомбинируют также попарно. Следовательно, в собственном полупроводнике концентрация свободных электронов равна концентрации дырок. Поскольку ширина запрещенной зоны полупроводника зависит от температуры, определим ее, используя зависимость (1):

$$\Delta\varepsilon_g = \Delta\varepsilon_{g0} - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)}.$$

Параметры германия возьмем из таблицы 2: ширина запрещенной зоны при температуре абсолютного нуля $\Delta\varepsilon_{g0} = 0,744$ эВ, параметры $\alpha = 4,774 \cdot 10^{-4}$

эВ / К, $\beta = 235$ К. Для температуры 350 К ширина запрещенной зоны равна:

$$\Delta\varepsilon_g = \Delta\varepsilon_{g0} - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)} = 0,744 - \frac{4,774 \cdot 10^{-4} \cdot 350^2}{350 + 235} = 0,644 \text{ эВ}.$$

Концентрация собственных носителей заряда определяется по формулам (10) и (11):

$$n_i = N_C \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right), \quad p_i = N_V \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}\right).$$

Согласно закону «действующих масс» $n_i p_i = n_i^2$, следовательно,

перемножив (10) на (11), получим:

$$\begin{aligned} n_i^2 &= N_C \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right) \cdot N_V \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}\right) = N_C N_V \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_V}{kT}\right) = \\ &= N_C N_V \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon_g}{kT}\right) \end{aligned}$$

откуда

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon_g}{2kT}\right)$$

Определим эффективные плотности состояний в зоне проводимости и в валентной зоне по формулам (12) и (13):

$$N_C = 2 \left(\frac{\pi m^* kT}{h^2} \right)^3 = 2 \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,56 \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 350}{(6,62 \cdot 10^{-34})^2} \right)^3 = 1,328 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^3 = 2 \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,35 \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 350}{(6,62 \cdot 10^{-34})^2} \right)^3 = 6,561 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

Зная эффективные плотности состояний можно определить собственную концентрацию носителей заряда в полупроводнике:

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp \left(-\frac{\Delta \epsilon_g}{2kT} \right) = \sqrt{1,328 \cdot 10^{25} \cdot 6,561 \cdot 10^{24}} \exp \left(-\frac{0,644}{2 \cdot 8,614 \cdot 10^{-5} \cdot 350} \right) = 2,146 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 5. Определить удельное электрическое сопротивление и отношение полного тока, протекающего через полупроводник к току, обусловленного электронной составляющей в собственном кремнии с концентрацией носителей заряда $n_i = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и подвижностями электронов и дырок $\mu_n = 0,15 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_p = 0,06 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ соответственно.

Решение

Удельное электрическое сопротивление обратно пропорционально удельной электрической проводимости, которая, согласно (25) равна:

$$\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p = qn(\mu_n + \mu_p) = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{19} \cdot (0,15 + 0,06) = 0,336 \text{ См} \cdot \text{м},$$

поскольку в собственном полупроводнике $n = p = n_i$.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{0,336} = 2,972 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Полный ток через полупроводник равен сумме дырочной и электронной составляющих дрейфового и диффузионного токов (29). Так как инжекция и экстракция носителей заряда отсутствуют, то полупроводник находится в равновесном состоянии и диффузионная составляющая тока отсутствует (градиент концентрации носителей заряда равен нулю). Следовательно, полный ток равен дрейфовому току, который, в свою очередь, состоит из дырочной и электронной составляющих:

$$j = j_{dp} = j_{dp,n} + j_{dp,p} = qn\mu_n E + qp\mu_p E,$$

где E – напряженность приложенного электрического поля. Отношение

полного тока к электронной составляющей будет равно:

$$\beta = \frac{j}{j_n} = \frac{qn\mu_n E + qp\mu_p E}{qn\mu_n E} = \frac{\mu_n + \mu_p}{\mu_n} = 1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} = 1 + \frac{0,06}{0,15} = 1,4.$$

Задача 6. Сравнить положение уровня Ферми для собственного арсенида галлия с эффективной плотностью состояний $N_C = 4 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $N_V = 6 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и GaAs n -типа с концентрацией электронов $n_n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и дырок $p_n = 10^{14} \text{ м}^{-3}$ при $T = 250 \text{ К}$.

Решение

Определим положение уровня Ферми в собственном полупроводнике. Концентрации носителей заряда в собственном полупроводнике, согласно (10) и (11) равны

$$n = N_C \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right), \quad p = N_V \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}\right).$$

Поскольку в собственном полупроводнике концентрация электронов равна концентрации дырок, приравняем эти выражения и выразим уровень Ферми:

$$\begin{aligned} N_C \exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right) &= N_V \exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}\right); \\ \frac{N_C}{N_V} &= \frac{\exp\left(-\frac{\varepsilon_F - \varepsilon_V}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{\varepsilon_C - \varepsilon_F}{kT}\right)} = \exp\left(-\frac{2\varepsilon_F - \varepsilon_C - \varepsilon_V}{kT}\right); \\ 2\varepsilon_F - \varepsilon_C - \varepsilon_V &= -kT \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right); \\ \varepsilon_F &= \frac{\varepsilon_C + \varepsilon_V}{2} - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) = \varepsilon_i - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right). \end{aligned}$$

Найдем положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны. Поскольку энергия уровней измеряется в электрон-вольтах (эВ), возьмем постоянную Больцмана $k = 8,614 \cdot 10^{-5} \text{ эВ / К}$, получим:

$$\varepsilon_F - \varepsilon_i = -\frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) = -\frac{8,614 \cdot 10^{-5} \cdot 250}{2} \ln\left(\frac{4 \cdot 10^{23}}{6 \cdot 10^{24}}\right) = 0,029 \text{ эВ}.$$

Следовательно, уровень Ферми в собственном полупроводнике лежит выше середины запрещенной зоны на 0,029 эВ. В полупроводнике n -типа концентрации электронов и дырок, согласно (20) и (21), равны

$$n = n_i \exp\left(\frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i}{kT}\right), \quad p = n_i \exp\left(-\frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i}{kT}\right).$$

Возьмем отношение концентраций и выразим уровень Ферми:

$$\frac{n}{p_n} = \frac{\exp\left(\frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i}{kT}\right)} = \exp\left(\frac{2\varepsilon_{Fn} - 2\varepsilon_i}{kT}\right);$$

$$2\varepsilon_{Fn} - 2\varepsilon_i = kT \ln\left(\frac{n}{p_n}\right);$$

$$\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i = \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{n}{p_n}\right).$$

Найдем положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны:

$$\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i = \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{n}{p_n}\right) = \frac{8,614 \cdot 10^{-5} \cdot 250}{2} \ln\left(\frac{10^{20}}{10^{14}}\right) = 0,149 \text{ эВ}.$$

Следовательно, уровень Ферми в полупроводнике n -типа лежит на 0,149 эВ выше середины запрещенной зоны. Найдем разность между уровнями Ферми в полупроводнике n -типа и собственном полупроводнике

$$\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_i = 0,149 - 0,029 = 0,12 \text{ эВ}.$$

В полупроводнике n -типа уровень Ферми расположен на 0,12 эВ выше уровня Ферми собственного полупроводника.

Задача 7. Определить концентрацию свободных электронов и дырок в полупроводнике p -типа, если собственная концентрация носителей равна $n_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$, концентрация акцепторных примесей $N_a = 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Решение

При достаточно низких температурах в примесных полупроводниках преобладает механизм образования свободных носителей заряда, основанный на ионизации примесных атомов.

Если полупроводник легирован акцепторными примесями, то в первую очередь происходит переход электронов из валентной зоны на акцепторный уровень с образованием дырок в валентной зоне. Образовавшиеся дырки являются основными носителями заряда, поскольку их концентрация превышает концентрацию свободных электронов в зоне проводимости. При некоторой температуре все акцепторы становятся ионизированными и концентрация дырок в валентной зоне примерно равна концентрации акцепторных примесей

$$p_p \approx N_a = 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Такое допущение справедливо, когда генерация носителей заряда по механизму ионизации примесных атомов намного больше тепловой генерации

носителей заряда, то есть, когда $n_i \gg N_a$. Остальные случаи будут рассмотрены ниже. Из закона «действующих масс» найдем концентрацию электронов, которые для акцепторного полупроводника являются неосновными носителями заряда

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(10^{18})^2}{10^{20}} = 10^{16} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 8. Определить концентрацию свободных электронов и дырок в полупроводнике n -типа, если собственная концентрация носителей равна $n_i = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, концентрация донорных примесей $N_d = 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Решение

При высоких температурах в примесных полупроводниках действуют два механизма образования свободных носителей заряда: основанный на ионизации примесных атомов и тепловая генерация носителей заряда.

При легировании полупроводника донорными примесями вначале происходит ионизация этих примесей, то есть электроны с донорного уровня переходят в зону проводимости, в результате чего образуется большое число свободных электронов. После полной ионизации примесей все большую роль начинает играть и тепловая генерация носителей заряда с образованием электронно-дырочных пар. В общем случае в полупроводнике должно выполняться условие электронейтральности, когда положительный заряд ионизированных доноров и дырок скомпенсирован отрицательным зарядом свободных электронов:

$$n = N_d + p.$$

Из закона «действующих масс» выразим концентрацию электронов и подставим в предыдущее выражение

$$\frac{n^2}{p} = n_i^2, \quad \frac{n_i^2}{p} = N_d + p.$$

Составим квадратное уравнение относительно p :

$$p^2 + N_d p - n_i^2 = 0.$$

Найдем корни уравнения:

$$D = N_d^2 + 4n_i^2, \\ p = \frac{-N_d \pm \sqrt{N_d^2 + 4n_i^2}}{2}.$$

Данный корень не подходит, поскольку концентрация оказывается отрицательной величиной. Следовательно, концентрация неосновных носителей заряда (дырок в полупроводнике n -типа) будет равна:

$$p_n = \frac{-N_d + \sqrt{N_d^2 + 4n_i^2}}{2} = \frac{-10^{20} + \sqrt{(10^{20})^2 + 4 \cdot (5 \cdot 10^{19})^2}}{2} =$$

$$= \frac{-10^{20} + 1,414 \cdot 10^{20}}{2} = 2,071 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

Найдем концентрацию электронов:

$$n = N_d + p_n = 10^{20} + 2,071 \cdot 10^{19} = 1,207 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Таким способом рационально находить концентрации носителей заряда при условии, что собственная концентрация по порядку близка к концентрации легирующей примеси, то есть, когда $n_i \approx N_d$.

Если собственная концентрация носителей много больше концентрации легирующих примесей, то есть когда $n_i \gg N_d$, то преобладает механизм тепловой генерации и концентрация основных и неосновных носителей заряда примерно равна собственной концентрации.

Задача 9. Определить контактную разность потенциалов p - n -перехода при комнатной температуре и ширину области пространственного заряда, если переход изготовлен из кремния со следующими параметрами $n_n = 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $p_n = 10^{17} \text{ м}^{-3}$, $p_p = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $n_p = 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Построить энергетическую диаграмму p - n -перехода.

Решение

Контактная разность потенциалов определяется как разность уровней Ферми в полупроводниках с различным типом проводимости.

$$\varphi_k = \frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_{Fp}}{q}.$$

Воспользуемся выражением для нахождения уровня Ферми из задачи 3. Комнатную температуру возьмем равной $T = 300 \text{ К}$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Fn} &= \varepsilon_i + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{n}{p_n} \right) = \varepsilon_i + \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2} \ln \left(\frac{10^{19}}{10^{17}} \right) = \varepsilon_i + 9,533 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = \\ &= \varepsilon_i + 0,06 \text{ эВ} \\ \varepsilon_{Fp} &= \varepsilon_i + \frac{kT}{2} \ln \left(\frac{n_p}{p} \right) = \varepsilon_i + \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2} \ln \left(\frac{10^{16}}{10^{20}} \right) = \varepsilon_i + 1,906 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = \\ &= \varepsilon_i - 0,12 \text{ эВ} \\ \varphi_k &= \frac{\varepsilon_{Fn} - \varepsilon_{Fp}}{q} = \frac{kT}{2q} \ln \left(\frac{n_n}{p} \right) - \frac{kT}{2q} \ln \left(\frac{n_p}{p} \right) = \frac{kT}{2q} \ln \left(\frac{n_n p_p}{p n_p} \right) = \\ &= \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \left(\frac{10^{19} \cdot 10^{20}}{10^{17} \cdot 10^{16}} \right) = 0,18 \text{ В} \end{aligned}$$

Область пространственного заряда (ОПЗ) образуется за счет ухода основных носителей заряда через переход во время диффузии. В результате в каждом из полупроводников вблизи перехода образуется область обедненная носителями заряда. Ширина обедненной области определяется выражением:

$$W_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k - U)}{qN_a^2 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}}, \quad W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k - U)}{qN_d^2 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника (для Si $\varepsilon = 11,8$), U – напряжение, приложенное к p - n -переходу.

При комнатной температуре все примесные атомы ионизированы, поэтому концентрации основных носителей заряда примерно равны концентрациям донорных и акцепторных примесей. В отсутствие внешнего напряжения ширины обедненных областей будут равны

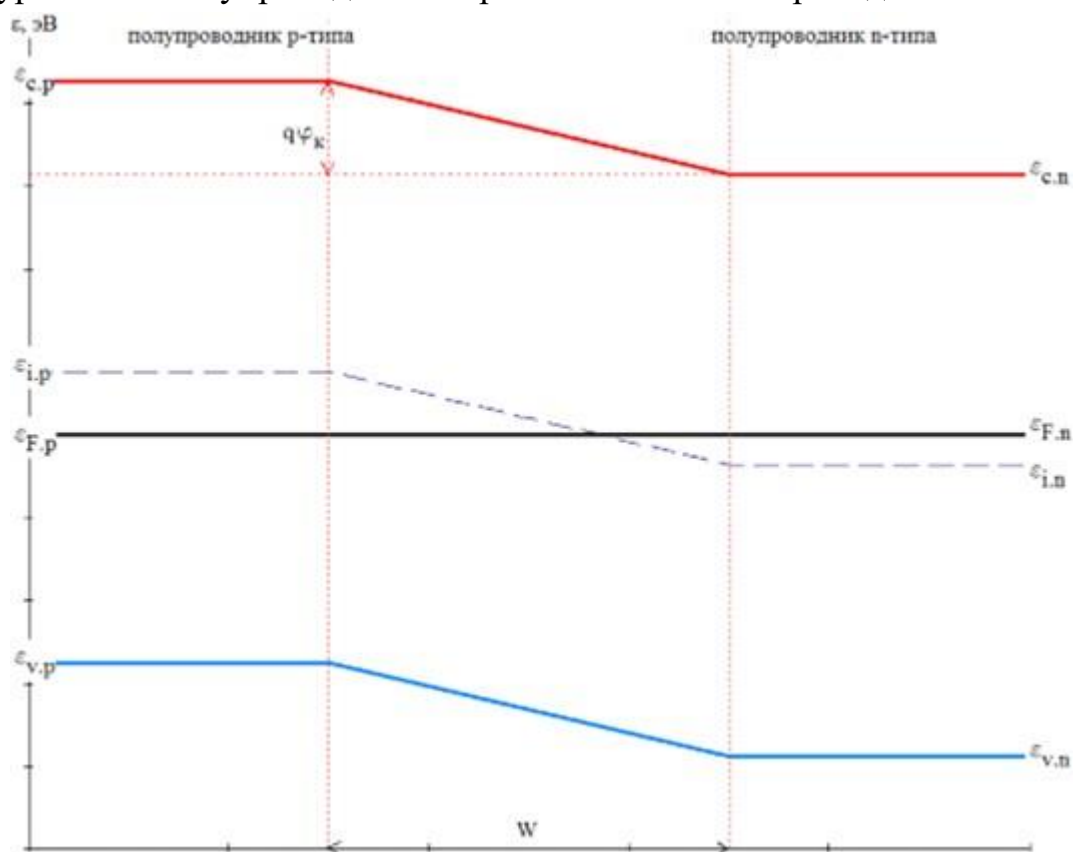
$$\begin{aligned} W_p &\approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_k}{qp_p^2 \left(\frac{1}{p_p} + \frac{1}{n_n} \right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 0,179}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{40} \left(\frac{1}{10^{20}} + \frac{1}{10^{19}} \right)}} = 4,607 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \\ W_n &\approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_k}{qn_n^2 \left(\frac{1}{p_p} + \frac{1}{n_n} \right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 0,179}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{38} \left(\frac{1}{10^{20}} + \frac{1}{10^{19}} \right)}} = 4,607 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \end{aligned}$$

Ширина ОПЗ равна сумме обедненных областей

$$W = W_p + W_n = 0,461 \cdot 10^{-6} + 4,607 \cdot 10^{-6} = 5,068 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Построим энергетическую диаграмму p - n -перехода. Для этого сначала отложим уровень Ферми. Он будет идти строго горизонтально, поскольку в равновесном состоянии энергия Ферми в p - и n -полупроводнике

выравнивается ($\varepsilon_{Fp} = \varepsilon_{Fn}$). Отметим среднюю часть по оси абсцисс в качестве ОПЗ (W). Далее отложим энергию середины запрещенной зоны (ε_{ip} и ε_{in}). В p -полупроводнике (слева от ОПЗ) она расположена на 0,12 эВ выше уровня Ферми, а в n -полупроводнике (справа от ОПЗ) – ниже уровня Ферми на 0,06 эВ. В ОПЗ соединим середины запрещенных зон ε_i , между собой прямой линией. Тангенс угла наклона этой линии пропорционален контактной разности потенциалов. После этого можно отметить дно зоны проводимости (ε_c) в обоих полупроводниках, лежащее выше середины запрещенной зоны на половину ширины запрещенной зоны ($\Delta\varepsilon_g / 2 = 0,56$ эВ), и потолок валентной зоны (ε_v), лежащий ниже середины запрещенной зоны также на половину ее величины (0,56 эВ). Отметим контактную разность потенциалов, как разность двух уровней в полупроводниках с различным типом проводимости.



Задача 10. Определить величину заряда на единицу площади и построить распределение напряженности внутреннего электрического поля в ОПЗ несимметричного p - n -перехода изготовленного из германия. Известно, что $N_d = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $N_a = 4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $W = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Решение

Величины заряда на единицу площади по обе стороны перехода равны

$$Q_p = qN_aW_p, Q_n = qN_dW_n.$$

В силу условия электронейтральности, положительные заряды в n -области, образованные ионизированными донорами, должны быть скомпенсированы отрицательными зарядами в p -области, образованные ионизированными акцепторами

$$Q_p = Q_n \Rightarrow qN_a W_p = qN_d W_n \Rightarrow W_p = W_n \frac{N_d}{N_a}.$$

Подставим ширину обедненной p -области в выражение для ширины ОПЗ, получим

$$W = W_n + W_p = W_n + W_n \frac{N_d}{N_a} = W_n \frac{N_a + N_d}{N_a} \Rightarrow$$

$$W_n = W \frac{N_a}{N_a + N_d} = 5 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 10^{20}}{4 \cdot 10^{20} + 10^{20}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

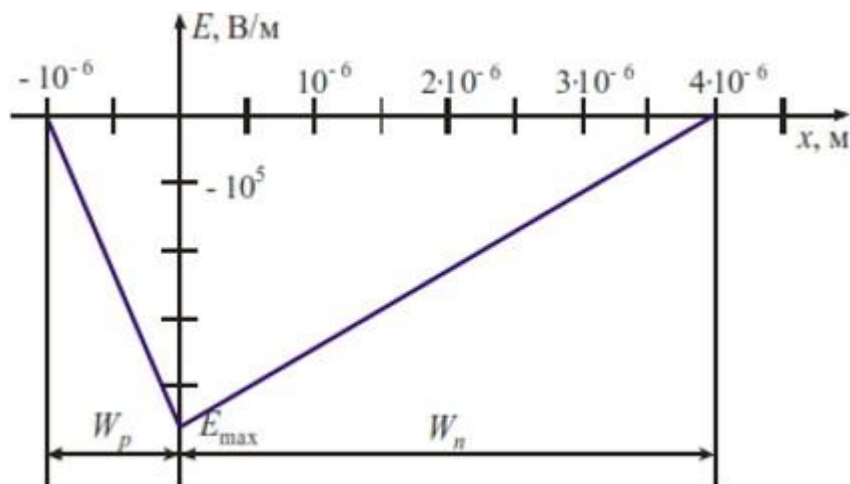
Тогда величина заряда на единицу площади будет равна

$$Q_n = qN_d W_n = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 6,408 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

Величина напряженности внутреннего электрического поля максимальна в области перехода (металлургической границы) и линейно убывает по ОПЗ, спадая до нуля на границах ОПЗ. Максимальное значение напряженности электрического поля определяется выражением

$$E_{\max} = -\frac{qN W}{\epsilon \epsilon_0} = -\frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 16} = -4,523 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Построим распределение напряженности электрического поля в ОПЗ.



Задача 11. Построить вольт-фарадную характеристику кремниевого p - n -перехода для обратных напряжений, имеющего следующие параметры: $\varphi_k = 0,6 \text{ В}$, $N_d = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $N_a = 4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $S = 5 \text{ мм}^2$.

Решение

Область пространственного заряда можно представить как конденсатор, емкость которого зависит от ширины обедненных областей и плотности объемного заряда. Эта емкость называется барьерной. Поскольку ширина ОПЗ зависит от напряжения, то емкость перехода также зависит от приложенного напряжения. При приложении прямого напряжения к переходу над барьерной емкостью преобладает диффузионная емкость, которая возникает вследствие инжекции основных носителей заряда в противоположные области. в результате чего возникают дополнительные (инжектированные) заряды в области перехода. Эта емкость резко возрастает с повышением приложенного напряжения. При приложении обратного напряжения главную роль играет барьерная емкость, так как в этом случае нет диффузии носителей заряда. Рассмотрим влияние внешнего поля на барьерную емкость. В общем случае выражение для емкости записывается в виде

$$C_{\text{бар}} = \left| \frac{dQ}{dU} \right|.$$

Воспользуемся выражением для определения заряда из предыдущей задачи

$$Q_n = SqN_d W_n = SqN_d \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\phi_k - U)}{qN_d^2 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}} = S \sqrt{\frac{2q\epsilon\epsilon_0(\phi_k - U)}{\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}};$$

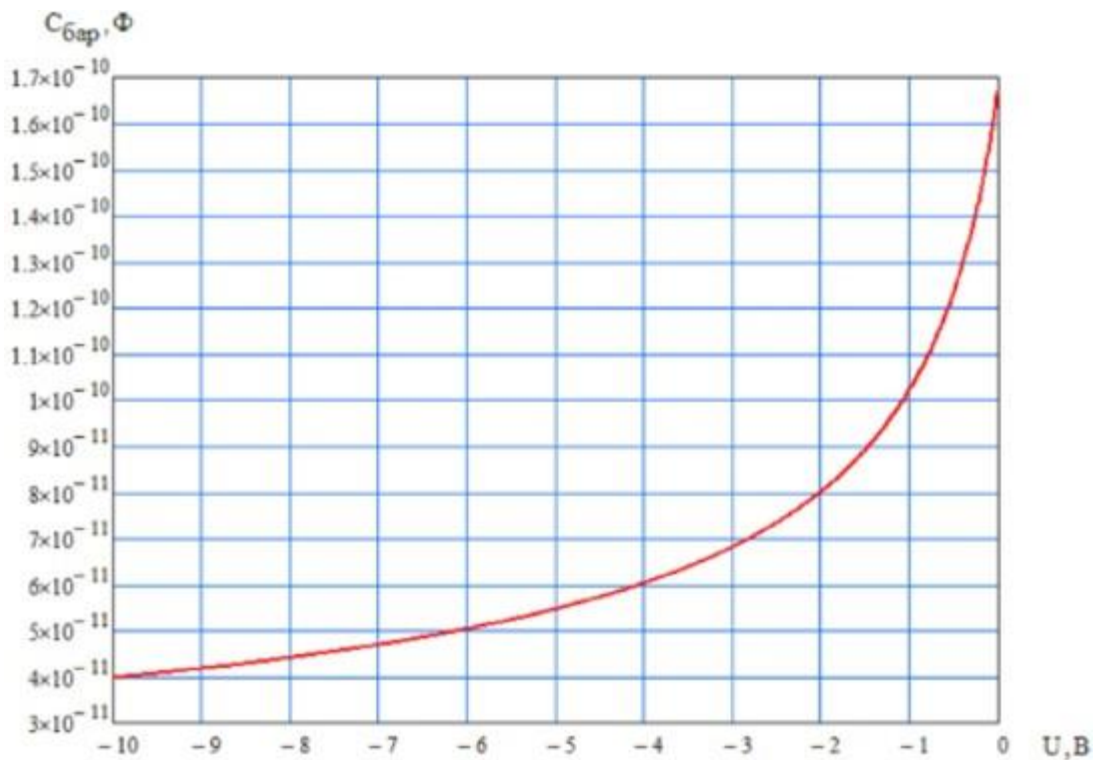
$$\frac{dQ}{dU} = S \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0}{2 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_k - U)}}.$$

Следовательно

$$C_{\text{бар}} = \left| \frac{dQ}{dU} \right| = S \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0}{2 \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_k - U)}}.$$

Построим зависимость барьерной емкости от приложенного напряжения. Это и будет вольт-фарадная характеристика *p-n*-перехода

$$C_{\text{бар}}(U) = 5 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 11,8 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}}{2 \left(\frac{1}{4 \cdot 10^{20}} + \frac{1}{10^{20}} \right) (0,6 - U)}} = \sqrt{\frac{1,674 \cdot 10^{-20}}{(0,6 - U)}}.$$



Задача 12. Построить вольт-амперную характеристику кремниевого p - n -перехода, площадью $S = 5 \text{ мм}^2$, при температуре $T = 300 \text{ К}$. Концентрации неосновных носителей заряда равны $p_n = 10^{15} \text{ м}^{-3}$, $n_p = 10^{14} \text{ м}^{-3}$.

Решение

Вольт-амперная характеристика p - n -перехода описывается уравнением

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right),$$

где I_0 – обратный ток диода, или ток насыщения.

В общем случае, ток через переход состоит из дрейфовой и диффузионной составляющих. Диффузионная составляющая плотности тока описывается уравнением вида

$$j_{\text{диф}} = -qD_p \frac{dp}{dx} + qD_n \frac{dn}{dx},$$

где D_p и D_n – коэффициенты диффузии дырок и электронов соответственно. Их можно определить, используя соотношение Эйнштейна

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot 0,06 = 1,55 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot 0,15 = 3,88 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Диффузионная длина носителей связана с коэффициентом диффузии и временем жизни (из табл. 2) соотношением

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{1,55 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 1,969 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{3,88 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 3,114 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

n

При приложении обратного напряжения, диффузионный ток становится равным нулю и обратный ток равен дрейфовому току $I_0 = I_{dp}$, который слабо зависит от приложенного напряжения. Дрейфовый ток обусловлен неосновными носителями заряда. Под действием электрического поля неосновные носители уходят через переход со скоростью дрейфа

$$V_{dp} = \frac{L}{\tau} = \frac{LD}{L^2} = \frac{D}{L}.$$

Поскольку плотность дрейфового тока равна

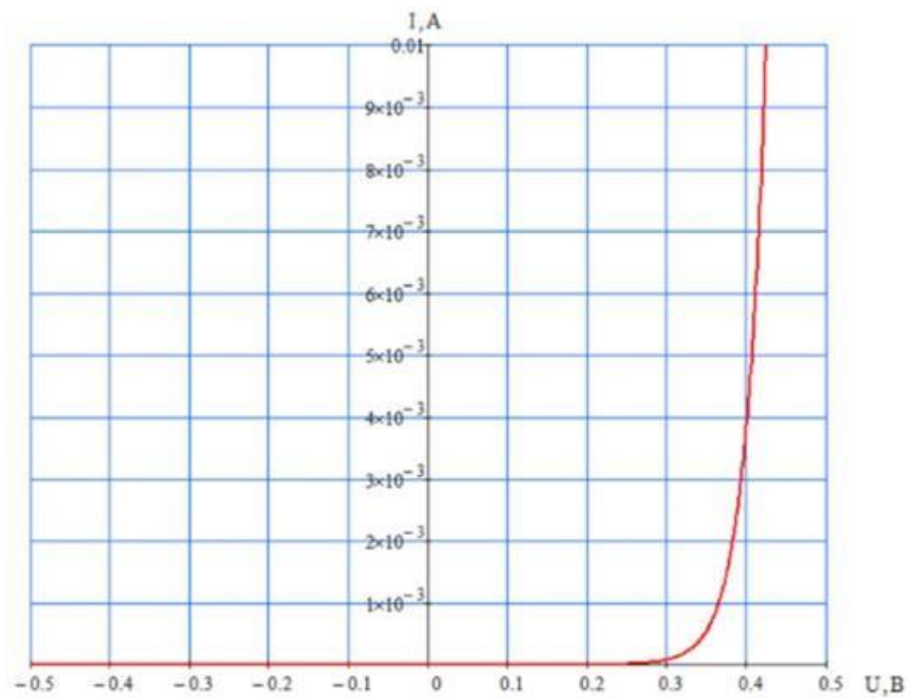
$$j_{dp} = j_p + j_n = q \left(p V_{dp} + n V_{np} \right) = q \left(\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right),$$

а ток связан с плотностью тока соотношением $I = S j$, то

$$I_0 = Sq \left| \frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right| = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot \left| \frac{1,55 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{15}}{1,969 \cdot 10^{-3}} + \frac{3,88 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{14}}{3,114 \cdot 10^{-3}} \right| = 7,3 \cdot 10^{-10} \text{ А}.$$

Построим зависимость тока от приложенного напряжения.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) = 7,3 \cdot 10^{-10} \cdot \left(e^{\frac{U}{0,0258}} - 1 \right).$$



Видно, что вольт-амперная характеристика p - n -перехода имеет ярко выраженный несимметричный характер. В области прямых напряжений ток p - n -перехода экспоненциально возрастает с ростом приложенного напряжения. В области отрицательных напряжений ток практически равен нулю. Построим обратную ветвь вольт-амперной характеристики в увеличенном масштабе.

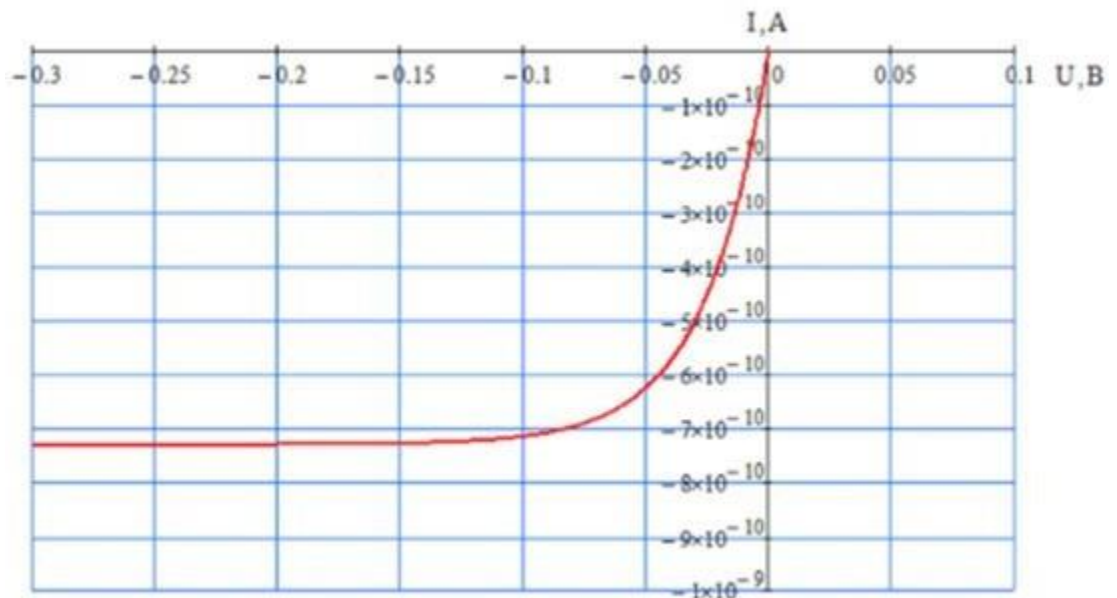


Таблица 2. Основные параметры полупроводниковых материалов

Материал полупроводника		Si	Ge	$GaAs$
Ширина запрещенной зоны при $T = 0$ К	$\Delta\varepsilon_{g0}$, эВ	1,17	0,744	1,519

Параметры для определения ширины запрещенной зоны	α , эВ/К	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$4,774 \cdot 10^{-4}$	$5,405 \cdot 10^{-4}$
	β , К	636	235	204
Параметры для определения подвижности носителей	a_n	2,42	1,66	1,0
	a_p	2,2	2,33	2,1
Подвижности носителей заряда при $T_0 = 300$ К	μ_{0n} , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0,15	0,39	0,85
	μ_{0p} , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	0,06	0,19	0,04
Эффективные массы носителей заряда	$m_n^* m_{\bar{e}}$	1,08	0,56	0,068
	$m_p^* m_{\bar{e}}$	0,56	0,35	0,45
Диэлектрическая проницаемость	ϵ	11,8	16,0	13,2
Время жизни носителей заряда	$\tau_{n,p}$, с	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$

Задача 13. Найти положение уровня Ферми в собственном германии при 300 К, если известно, что ширина его запрещенной зоны $\Delta W = 0,665$ эВ, а эффективные массы плотности состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны: $m_v = 0,388m_0$; $m_c = 0,55m_0$, где m_0 – масса свободного электрона.

Решение

Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике определяется выражением

$$W_F = \frac{W_c + W_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = W_i + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c},$$

где W_i – уровень, соответствующий середине запрещенной зоны;

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

– эффективная плотность состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно. В данном случае

$$N_v = \frac{2 \left(2 \cdot 3,14 \cdot 0,388 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \right)^{3/2}}{\left(6,62 \cdot 10^{-34} \right)^3} \text{ м}^{-3}.$$

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

Таким образом,

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

или

$$\begin{aligned} W_F - W_v &= W_i - W + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = \frac{\Delta W}{2} + kT \ln \frac{N_v}{N_c} = \\ &= 0,665 \cdot 2 - 6,78 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}, \end{aligned}$$

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

Решение

Собственная концентрация носителей заряда

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

Эффективная плотность состояний (м^{-3}) для электронов в зоне проводимости (см. решение задачи 11)

$$N_c = \frac{2 \left(2 \cdot 3,14 \cdot 1,05 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} T \right)^{3/2}}{\left(6,62 \cdot 10^{-34} \right)^3} = 2,69 \cdot 10^{25} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2}.$$

Эффективная плотность состояний (м^{-3}) для дырок в валентной зоне

Задача 15. Кристалл арсенида индия легирован серой так, что избыточная концентрация доноров $N_d - N_a = 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Можно ли считать, что при температуре $T = 300 \text{ }^\circ\text{С}$ электрические параметры этого полупроводника

близки параметрам собственного арсенида индия, если эффективные массы плотности состояний для электронов $m_c = 0,023m_0$, для дырок $m_v = 0,43m_0$, а

ширина запрещенной зоны (эВ) $InAs$ изменяется с температурой по закону $0,462 - 3,5 \cdot 10^{-4} T$.

Решение

Ширина запрещенной зоны ΔW арсенида индия при температуре $T = 573$ К равна $0,26$ эВ. Собственная концентрация носителей заряда при этой температуре

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} (m_c m_v)^{3/4} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right) =$$

$$= 2 \frac{(2\pi \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 573)^{3/2}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} (0,023 \cdot 0,43)^{3/4} (9,1 \cdot 10^{-31})^{3/2} \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{0,26}{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 573}\right) = 1,5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Отсюда следует, что при $T = 573$ К собственная концентрация носителей заряда $n_i \gg (N_d - N_a)$, т. е. полупроводник по свойствам близок собственному.

Задача 16. Через пластину кремния с удельным объемным сопротивлением $0,01$ Ом м проходит электрический ток плотностью 10 мА/мм². Найти средние скорости дрейфа электронов и дырок, если их подвижности равны $0,14$ и $0,05$ м² / (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

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

Задача 17. В приближении модели водородоподобного атома рассчитать для кремния и германия энергию ионизации донора ΔW_d и боровский радиус его электронной орбиты r_d . При расчете эффективную массу электронов m_n в кремнии и германии принять равной соответственно $0,5m_0$ и $0,2m_0$. Диэлектрические проницаемости полупроводников: $\epsilon_{Si} = 12,5$; $\epsilon_{Ge} = 16$.

Решение

Приняв модель водородоподобного атома примеси, энергию ионизации доноров можно определить из выражения $\Delta W_d = W_0 m_n / (\epsilon^2 m_0)$, где $W_0 = 13,6$ эВ – энергия ионизации атома водорода. При этом радиус орбиты донора $r_d = \epsilon r_0 m_0 / m_n$, где $r_0 = 5,3 \cdot 10^{-11}$ м – радиус первой боровской орбиты атома водорода.

Для кремния $\Delta W_d = 13,6 \cdot 0,5 / (12,5)^2 = 0,043$ эВ; $r_d = 12,5 \cdot 5,3 \cdot 10^{-11} / 0,5 = 1,32 \cdot 10^{-9}$ м = 1,32 нм.

Для германия $\Delta W_d = 0,01$ эВ; $r_d = 4,24$ нм.

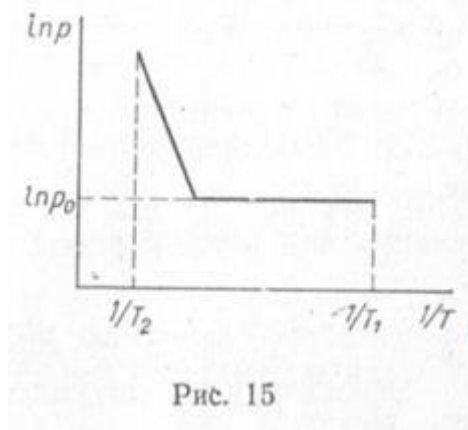


Рис. 15

Задача 18. В арсениде галлия эффективная масса электронов $m_n = 0,07m_0$, а диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 13$. Определить, при какой минимальной концентрации доноров станут заметны эффекты, связанные с перекрытием электронных оболочек соседних примесных атомов.

Решение

Перекрытие электронных оболочек соседних примесных атомов происходит при такой концентрации доноров, когда расстояние между ближайшими атомами примеси $l \leq 2 r_d$, где r_d – борковский радиус орбиты водородоподобного центра (см. решение задачи 15). Среднее расстояние между примесными атомами связано с их концентрацией соотношением

$$l = \sqrt[3]{(N_d)^{-1}}. \text{ Отсюда искомая концентрация доноров}$$

$$N_{d \min} = \left(\frac{2r_d}{0} \right)^3 = \left(\frac{2 \cdot 0,53 \cdot 10^{-10} \cdot 13}{0} \right)^3 = 1,3 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 19. В кристаллах арсенида галлия растворено 10^{-5} ат. % теллура. Найти положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны при $T = 500$ К. При расчете использовать данные задачи 3.1.28. Плотность арсенида галлия $d = 5,32$ Мг/м³.

Решение

Число атомов галлия и мышьяка в единице объема

$$N_{Ga} = N_{As} = N_{GaAs} = \frac{d}{M_{GaAs}} N_0 = \frac{5320 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{144,64 \cdot 10^{-3}} = 2,214 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

Так как все атомы доноров ионизированы, то концентрация электронов в полупроводнике равна концентрации атомов теллура:

$$n = N_{Te} = (N_{Ga} + N_{As}) \cdot 10^{-7} = 2,214 \cdot 2 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-7} = 4,428 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

Эффективная плотность состояний в зоне проводимости при $T = 500 \text{ К}$

$$N_c = \frac{2(2\pi m_n kT)^{3/2}}{h^3} = \frac{2(2\pi \cdot 0,067 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 500)^{3/2}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} \text{ м}^{-3}.$$

Найдем положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости:

$$W_c - W_F = kT \ln \frac{N_c}{n} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 500 \ln \left(\frac{9,36 \cdot 10^{23}}{4,428 \cdot 10^{21}} \right) = 0,231 \text{ эВ}.$$

Ширина запрещенной зоны при заданной температуре

$$\Delta W = 1,522 - 5,8 \cdot 10^{-4} T^2 \mid (T + 300) = 1,341 \text{ эВ}.$$

Положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны

$$W_F - W_i = \Delta W \mid 2 - (W_c - W_F) = 0,44 \text{ эВ}.$$

Задача 20. В кристалле антимонида индия на каждые 10^6 атомов сурьмы приходится один атом кремния и два атома олова. Определить концентрации электронов и дырок в этом полупроводнике при комнатной температуре, если собственная концентрация носителей заряда в антимониде индия $n_i = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, а его плотность $d = 5,78 \text{ Мг/м}^3$.

Решение

Концентрация атомов сурьмы

$$N_{Sb} = \frac{d}{M_{InSb}} N_0 = \frac{5780 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{236,57 \cdot 10^{-3}} = 1,47 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Кремний замещает в решетке *InSb* узлы мышьяка и является акцептором, а олово замещает индий и является донором. Поэтому кристалл *InSb* должен обладать электропроводностью *n*-типа. Избыточная концентрация доноров

$$N_d - N_a = N_{Sn} - N_{Si} = 1,47 \cdot 10^{23} \cdot 10^{-6} = 1,47 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}.$$

Из условия электрической нейтральности кристалла следует: $N_d^+ - N_a^- + p - n = 0$. Используя соотношение «действующих масс» для носителей заряда, получаем $n^2 - n(N_d - N_a) - n_i^2 = 0$, откуда $n = 0,735 \cdot 10^{22} + \sqrt{(0,54 + 2) \cdot 10^{44}} = 2,33 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

$$\text{Тогда } p = n_i^2 \mid n = 4 \cdot 10^{44} \mid (2,33 \cdot 10^{22}) = 1,72 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 21. В образце кремния n -типа при температуре $T = 300$ К время жизни неосновных носителей заряда $\tau_p = 5$ мкс, их подвижность $\mu_p = 0,04$ м² / (В с). Определить диффузионную длину неосновных носителей заряда.

Решение

Из соотношения Эйнштейна находим коэффициент диффузии дырок:

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

Диффузионная длина неосновных носителей заряда

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

Задача 22. Вычислить отношение полного тока через полупроводник к току, обусловленному дырочной составляющей: а) в собственном германии; б) в германии p -типа с удельным сопротивлением $0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Приять собственную концентрацию носителей заряда при комнатной температуре $n_i = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 / (\text{В}\cdot\text{с})$, подвижность дырок $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 / (\text{В}\cdot\text{с})$.

Решение

На основе закона Ома получаем выражение для отношения полного тока к его дырочной составляющей:

$$\beta_p = \frac{I_p}{I} = \frac{e(n\mu_n + p\mu_p)}{er\mu} = 1 + \frac{n\mu_n}{p\mu},$$

где n и p – концентрации электронов и дырок соответственно.

В собственном полупроводнике $n_i = p_i$ и, следовательно,

$$\beta_i = 1 + \mu_n / \mu_p = 1 + 0,39 / 0,19 = 3,05.$$

В полупроводнике p -типа с удельным сопротивлением, много меньшим собственного, вкладом электронов в электропроводность в первом приближении можно пренебречь. С учетом этого получаем концентрацию основных носителей заряда $p \approx (e\mu_p \rho)^{-1} = 6,58 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и концентрацию

неосновных носителей заряда $n = n_i^2 / p = 6,7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

Зная концентрацию электронов, можно уточнить отношение полного тока к дырочной составляющей:

$$\beta_p = 1 + \frac{6,7 \cdot 10^{17} \cdot 0,39}{6,58 \cdot 10^{20} \cdot 0,19} = 1,002.$$

Задача 23. Образец кремния n -типа при температуре $T_1 = 300 \text{ К}$ имеет удельное сопротивление $\rho = 0,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, причем концентрация электронов в

нем не изменяется при нагревании до температуры T_2
= 500 К. Определить, на сколько изменяется концентрация неосновных
носителей заряда в этом температурном диапазоне. При температуре T_1

подвижность электронов $\mu_n = 0,14 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. Значение собственной концентрации носителей заряда взять из задачи 3.1.19. Коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны $b = 2,84 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$, $n_i = 7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}$.

Решение

По заданным значениям ρ и μ_n находим концентрацию основных носителей заряда при температуре T_1

$$n = \frac{\gamma}{e\mu} = \frac{1}{e\mu \rho} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,14 \cdot 0,05} = 8,93 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Концентрацию неосновных носителей заряда (дырок) определяем из соотношения «действующих масс»:

$$p = n_i^2 / n = (7 \cdot 10^{15})^2 / (8,93 \cdot 10^{20}) = 5,5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}.$$

При температуре T_2

$$N_c = 5,79 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}; N_v = 2,26 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3};$$

$$\Delta W = \Delta W_1 - b(T_2 - T_1) = 1,12 - 2,84 \cdot 10^{-4} \cdot 200 = 1,063 \text{ эВ}.$$

Собственная концентрация носителей заряда при температуре T_2

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right) = 10^{25} \sqrt{5,79 \cdot 2,26} \exp\left(-\frac{1,063}{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 500}\right) = 1,6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Отсюда находим концентрацию неосновных носителей заряда

$$p = (1,6 \cdot 10^{20})^2 / (8,93 \cdot 10^{20}) = 2,87 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

Таким образом, на участке истощения доноров при повышении температуры от 300 до 500 К концентрация дырок в кремнии n -типа возрастает в $2,87 \cdot 10^{19} / (5,5 \cdot 10^{10}) = 5,2 \cdot 10^8$ раз.

Задача 24. Рассчитать концентрацию электронов и дырок в германии p -типа с удельным сопротивлением $0,05 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при температуре 300 К. Недостающие данные взять из условия задачи 20.

Решение

Удельное сопротивление связано с концентрацией электронов и дырок уравнением $1/\rho = en\mu_n + ep\mu_p = en^2\mu_n / p + ep\mu_p \dots$

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

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 25. При исследовании температурной зависимости концентрации носителей заряда для чистого кремния в области собственной электропроводности получены следующие результаты: при температуре $T_1 = 463 \text{ К}$ собственная концентрация $n_{i1} = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а при $T_2 = 781 \text{ К}$ $n_{i2} = 10^{23} \text{ м}^{-3}$. На основании этих данных рассчитать ширину запрещенной зоны при $T=300 \text{ К}$, если коэффициент ее температурного изменения $b = -2,84 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$.

Решение

$$n_i = \frac{1}{\sqrt{N_c N_v}} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right) = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta W_0 - bT}{2kT}\right) = BT^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta W_0}{2kT}\right),$$

где A и B – постоянные, не зависящие от температуры; ΔW_0 – ширина

запрещенной зоны, линейно экстраполированная к $T = 0 \text{ К}$. Тогда для двух экспериментальных точек имеем

$$\ln \frac{n_{i1}}{T_1^{3/2}} = \ln B - \frac{\Delta W_0}{2kT_1}; \quad \ln \frac{n_{i2}}{T_2^{3/2}} = \ln B - \frac{\Delta W_0}{2kT_2}.$$

Вычитая из второго уравнения первое, после преобразований получаем

$$\begin{aligned} \Delta W_0 &= 2k \ln \left[\frac{n_{i2} T_1^{3/2}}{n_{i1} T_2^{3/2}} \right] \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = \\ &= \frac{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \ln \left[\frac{10^{23} \cdot 463^{3/2}}{10^{20} \cdot 781^{3/2}} \right]}{1/463 - 1/781} = 1,201 \text{ эВ}. \end{aligned}$$

Ширина запрещенной зоны для $T = 300 \text{ К}$

$$\Delta W = \Delta W_0 + bT = 1,201 - 2,84 \cdot 10^{-4} \cdot 300 = 1,116 \text{ эВ}.$$

Задача 26. Кристалл кремния n -типа при температуре 300 К имеет удельное сопротивление $\rho = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Определить, при какой температуре в этом материале начинает доминировать собственная электропроводность,

если температурное изменение подвижности носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках определяется выражениями:

$\mu_n = 0,14(T/300)^{-3/2}$; $\mu_p = 0,05(T/300)^{-3/2}$, а ширины запрещенной зоны – выражением $\Delta W(T) = 1,205 - 2,84 \cdot 10^{-4} T$. Для расчета эффективной плотности состояний использовать данные задачи 12.

Решение

Полагая, что при $T = 300$ К все доноры полностью ионизированы, находим концентрацию примесей

$$N_d = (p e \mu_n)^{-1} = (0,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,14)^{-1} = 4,464 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Поскольку на участке истощения доноров концентрация носителей заряда не изменяется, температурное изменение удельной проводимости (См/м) подчиняется уравнению

$$\gamma = e N_d \mu_n = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,464 \cdot 10^{20} \cdot 0,14 \left(\frac{T}{300} \right)^{-3/2} = 5,2 \cdot 10^4 (T)^{-3/2}.$$

Удельная проводимость собственного полупроводника (См/м)

$$\begin{aligned} \gamma_i &= e n_i (\mu_n + \mu_p) = e \sqrt{N_c N_v} (\mu_n + \mu_p) \exp \left[-(\Delta W_0 - bT) / (2kT) \right] = \\ &= e \sqrt{N_c N_v} (\mu_n + \mu_p) \exp \left[b / (2k) \right] \exp \left[-\Delta W_0 / (2kT) \right]. \end{aligned}$$

Используя числовые значения N_c и N_v из задачи 12, получаем

$$\begin{aligned} \gamma &= 1,6 \cdot 10^{-19} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} \cdot 10^{23} \sqrt{2,69 \cdot 1,05} (0,14 + 0,05) \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} \times \\ &\times \exp \left(\frac{2,84 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5}} \right) \exp \left(- \frac{1,205}{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} T} \right) = 2,65 \cdot 10^6 \exp \left(- \frac{6985}{T} \right). \end{aligned}$$

Искомая температура находится из условия

$$5,2 \cdot 10^4 (T)^{-3/2} = 2,65 \cdot 10^6 \exp(-6985/T).$$

После упрощения и логарифмирования этого уравнения имеем $\lg \frac{1}{T} = 1,138 - \frac{2022}{T}$. Полученное уравнение можно решить численными

методами или графически. Графическое решение показано на рис. 16, где через $f(T)$ обозначена правая часть уравнения. Как видно из рис. 16, искомому решению отвечает значение $\frac{1}{T} = 1,9 \cdot 10^{-3}$, т. е. при $T > 523$ К в данном образце

$$\frac{1}{T} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$$

преобладает собственная электропроводность.

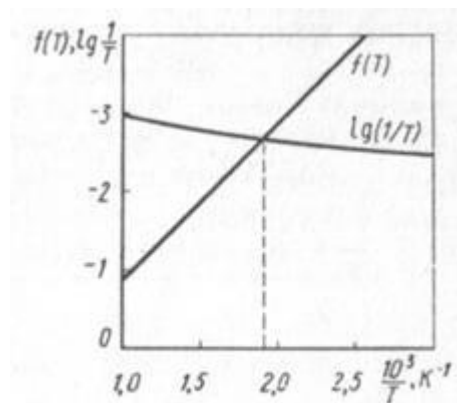


Рис. 16

Задача 27. В результате измерений установлено, что при температуре $T_1 = 300$ К удельное сопротивление собственного германия $\rho_{i1} = 0,5$ Ом·м, а при температуре $T_2 = 500$ К удельное сопротивление $\rho_{i2} = 1,25 \cdot 10^{-3}$ Ом·м. Полагая, что подвижность электронов и дырок при нагревании изменяется соответственно по закону: $\mu_n = 0,38 (T / 300)$ и $\mu_p = 0,19 (T / 300)^{-3/2}$, определить температурную зависимость ширины запрещенной зоны (в линейном приближении). Эффективная масса плотности состояний для электронов зоны проводимости $m_c = 0,55 m_0$, а для дырок валентной зоны $m_v = 0,388 m_0$.

Решение

Для собственной удельной проводимости полупроводника имеем (см. решение задач 24 и 25)

$$\gamma_i = \frac{1}{\rho_i} = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{b}{2kT}\right) \exp\left(-\frac{\Delta W_0}{2kT}\right) (\mu_n + \mu_p) = B \exp\left(-\frac{\Delta W_0}{2kT}\right),$$

где A и B – константы, не зависящие от температуры; ΔW_0 – ширина запрещенной зоны, экстраполированная к температуре $T = 0$ К. После логарифмирования имеем:

$$\ln \gamma_{i1} - \ln \gamma_{i2} = -\Delta W_0 \frac{1/T_1 - 1/T_2}{2k};$$

$$\Delta W_0 = \frac{2k \ln(\rho_{i2} / \rho_{i1})}{1/T_2 - 1/T_1} = \frac{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \ln(1,25 \cdot 10^{-3} / 0,5)}{1/500 - 1/300} = 0,775 \text{ эВ}.$$

При $T = 300$ К

$$n_i = \frac{\gamma_i}{e(\mu_n + \mu_p)} = \frac{1/0,5}{1,6 \cdot 10^{-19} (0,39 + 0,19)} = 2,16 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

С учетом этого $\exp\left(-\frac{\Delta W_0 - bT}{2kT}\right) = \frac{n_i}{\sqrt{N_c N_v}}.$

()

Отсюда следует, что при $T = 300$ К (см. решение задачи 11)

$$\Delta W = \Delta W_0 - bT = 2kT \ln \frac{\sqrt{N_c N_v}}{n_i} = 2kT \ln \frac{2(2\pi kT)^{3/2} (m_c m_v)^{3/4}}{n_i h^3} =$$

$$= 2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300 \ln \frac{2(2 \cdot 3,14 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^{3/2} (0,55 \cdot 0,388)^{3/4} (9,1 \cdot 10^{-31})^{3/2}}{2,16 \cdot 10^{19} (6,62 \cdot 10^{-34})^3} =$$

$$= 0,663 \text{ эВ.}$$

Тогда

$$b = \frac{\Delta W_0 - \Delta W}{T} = \frac{0,775 - 0,663}{300} = 3,75 \cdot 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{К}}.$$

Таким образом, для температурной зависимости ширины запрещенной зоны (эВ) получаем

$$\Delta W(T) = 0,775 - 3,75 \cdot 10^{-4} T.$$

Задача 28. На сколько увеличится удельная проводимость антимонида индия с собственной электропроводностью при изменении температуры от 20 до 21 °С, если ширина запрещенной зоны $\Delta W = 0,172$ эВ, а подвижность электронов и дырок изменился по закону $T^{3/2}$. Коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны $b = -2,8 \cdot 10^{-4}$ эВ/К.

Решение

Температурное изменение собственной удельной проводимости полупроводника определяется выражением (см. решение задачи 25) $\gamma_i = B \exp\left(-\frac{\Delta W_0}{2kT}\right)$. Отсюда следует, что

$$\frac{d\gamma_i}{dT} = B \exp\left(-\frac{\Delta W_0}{2kT}\right) \frac{\Delta W_0}{2kT^2} = \gamma_i \frac{\Delta W_0}{2kT^2}$$

и $\Delta \gamma_i / \gamma_i = \Delta W_0 \Delta T / (2kT^2)$. Учитывая, что

$$\Delta W_0 = \Delta W - bT = 0,172 + 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot 293 = 0,254 \text{ эВ,}$$

находим

$$\frac{\Delta \gamma_i}{\gamma_i} = \frac{0,254}{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 293^2} = 1,73 \cdot 10^{-2} = 1,73\%.$$

Задача 29. Вычислить для температуры $T = 40$ К концентрацию дырок и удельное сопротивление кремния p -типа, легированного бором до концентрации $N_a = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, если эффективная масса плотности состояний для

дырок валентной зоны $m_v = 0,56m_0$, положение энергетического уровня

бора $W_v + 0,045$ эВ, а подвижность дырок изменяется с температурой согласно выражению $\mu_p = 0,045 \cdot (T / 300)^{-3/2}$.

Решение

Эффективная плотность состояний для дырок валентной зоны

$$N_v = \frac{2(2\pi m_v kT)^{3/2}}{h^3} = \frac{2(2 \cdot 3,14 \cdot 0,56 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{23} \cdot 40)^{3/2}}{(6,62 \cdot 10^{-34})^3} \text{ м}^{-3}.$$

При $T = 40$ К энергия теплового возбуждения

$$kT = 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 40 = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ} \quad \Delta W_a = 0,045 \text{ эВ}.$$

Поэтому для концентрации дырок справедливо выражение

$$p = \sqrt{N_a N_v} \exp \left[-\frac{\Delta W_a}{kT} \right] = \sqrt{5,1 \cdot 10^{23} \cdot 10^{22}} \exp \left(-\frac{0,045}{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 40} \right) = 1,05 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Низкотемпературная подвижность дырок, ограниченная рассеянием на тепловых колебаниях решетки,

$$\mu_p = 0,045 \left(\frac{40}{300} \right)^{-3/2} = 0,928 \text{ м}^2 (\text{В} \cdot \text{с}).$$

Удельное сопротивление материала при $T=300$ К

$$\rho = (e p \mu_p)^{-1} = (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,05 \cdot 10^{20} \cdot 0,928)^{-1} = 6,4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Задача 30. Полупроводник легирован акцепторной примесью до концентрации $N_a = 2n_i$. Определить, во сколько раз изменится удельная проводимость полупроводника по отношению к собственной, если отношение подвижностей электронов и дырок $\mu_n / \mu_p = b$. Считать, что все акцепторы

находятся в ионизированном состоянии.

Решение

В соответствии с соотношением «действующих масс» для носителей заряда имеем: $np = n_i^2$. Из условия электронейтральности кристалла следует, что $p = n + N_a^-$. Отсюда для концентрации основных носителей заряда получаем уравнение $p^2 - 2n_i p - n_i^2 = 0$. Его решение: $p = (1 + \sqrt{2}) n_i$. Второе решение отбрасываем, исходя из физического смысла.

Концентрация неосновных носителей заряда $n = n_i / (1 + \sqrt{2})$.

Удельная проводимость легированного полупроводника

$$\gamma = e n \mu_n + e p \mu_p = e n_i \mu_p (0,414b + 2,414).$$

Собственная удельная проводимость полупроводника при той же температуре

$$\gamma_i = en_i (\mu_n + \mu_p) = en_i \mu_p (b + 1).$$

Отсюда находим отношение удельных проводимостей:

$$\gamma \mid \gamma_i = (0,414b + 2,414) (b + 1).$$

Задача 31. В образце кремния n -типа при температуре $T = 300$ К время жизни неосновных носителей заряда $\tau_p = 5$ мкс, их подвижность $\mu_p = 0,04$ м² / (В·с). В одну из плоскостей образца вводится и поддерживается постоянной во времени избыточная концентрация дырок $\Delta p_0 = 10^{19}$ м⁻³. Определить плотность диффузионного тока в непосредственной близости от этой плоскости. На какой глубине концентрация дырок составит 10^{18} м⁻³? Считать, что толщина образца значительно больше диффузионной длины носителей заряда.

Решение

Из соотношения Эйнштейна находим коэффициент диффузии дырок:

$$D_p = \mu_p kT \mid e = 0,04 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \cdot 300 \mid 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \mid \text{с}.$$

Диффузионная длина неосновных носителей заряда

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

Распределение дырок по толщине образца при одномерной диффузии характеризуется уравнением $\Delta p = \Delta p_0 \exp(-x / L_p)$, где x – расстояние от поверхности. Плотность диффузионного тока при одномерной диффузии

$$j_p = -eD_p \frac{dp}{dx} = \frac{eD_p}{L_p} \Delta p(x).$$

Для $x = 0$ (т. е. в непосредственной близости от поверхности)

$$j_p = \frac{eD_p}{L_p} \Delta p_0 = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{19}}{7,2 \cdot 10^{-5}} = 23 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Глубина x_1 , на которой достигается заданная концентрация неосновных носителей заряда,

$$x_1 = -L_p \ln \frac{\Delta p_1}{\Delta p_0} = -72 \ln \frac{10^{18}}{10^{19}} = 166 \text{ мкм}.$$

Задача 32. Определить скорость оптической генерации g неравновесных носителей заряда в пластине кремния на глубине 100 мкм от освещаемой поверхности при фотовозбуждении монохроматическим излучением интенсивностью $I_0 = 10^{20}$ м⁻²·с⁻¹, если показатель поглощения материала на длине волны излучения $\alpha = 5 \cdot 10^4$ м⁻¹, а коэффициент отражения излучения R

$$= 0,3.$$

Решение

Скорость оптической генерации, т. е. число носителей заряда, возбуждаемых светом в единицу времени в единице объема полупроводника, зависит от показателя поглощения и интенсивности излучения на заданной глубине x . Изменение интенсивности излучения подчиняется закону Бугера-Ламберта $I(x) = I_0 (1 - R) \exp(-\alpha x)$.

Число квантов, поглощаемых в слое единичной площади толщиной dx , определяется выражением $dI = I(x) \alpha dx$. Скорость оптической генерации

$$g(x) = \frac{dI}{dx} = \alpha I_0 (1 - R) \exp(-\alpha x) = 5 \cdot 10^4 \cdot 10^{20} \cdot (1 - 0,3) \exp(-5 \cdot 10^4 \cdot 100 \cdot 10^{-6}) = \\ = 2,36 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Задача 33. Определить избыточную концентрацию носителей заряда в эпитаксиальном слое кремния толщиной $b = 20$ мкм при оптическом возбуждении монохроматическим излучением с интенсивностью $I = 10^{21} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, если время жизни неравновесных носителей заряда $\tau = 10$ мкс, а показатель собственного поглощения кремния на длине волны излучения $\alpha = 2000 \text{ м}^{-1}$. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта η принять равным единице.

Решение

Так как $b \ll 1/\alpha$, то скорость оптической генерации g практически постоянна по всему объему эпитаксиального слоя.

Избыточная концентрация носителей заряда в установившемся режиме

$$\Delta n = \tau g = \tau \eta \alpha I = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 \cdot 10^{21} = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 34. На пластину из арсенида галлия площадью $S = 100 \text{ мм}^2$ и толщиной $b = 0,5 \text{ мм}$ падает монохроматическое излучение длиной волны $\lambda = 556 \text{ нм}$. Определить, какое число электронно-дырочных пар каждую секунду генерируется в объеме полупроводника при освещенности $E = 100 \text{ лк}$. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта принять равным единице. Процессами отражения пренебречь. На заданной длине волны показатель поглощения материала $\alpha = 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Решение

На заданной длине волны показатель поглощения $GaAs$ велик, глубина поглощения $1/\alpha \ll b$. Поэтому все фотоны падающего излучения

поглощаются в объеме полупроводника, а каждый поглощенный фотон рождает новую пару носителей заряда. На пластину падает световой поток $\Phi = ES = 100 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 10^{-2}$ лм. На длине волны $\lambda = 0,556$ мкм мощность

излучения 1 Вт соответствует световому потоку 683 лм. Мощность излучения, падающего на пластинку полупроводника, $P = (683)^{-1} \cdot 10^{-2} = 1,46 \cdot 10^{-5}$ Вт. Данной длине волны соответствует энергия фотонов $h\nu = hc/\lambda \approx 2,23$ эВ. Отсюда находим число фотонов, поглощаемых в объеме полупроводника в единицу времени. Оно равно числу генерируемых электронно-дырочных пар

$$N_{\Phi} = \frac{P}{h\nu} = \frac{1,46 \cdot 10^{-5}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,23} = 4,1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}.$$

Задача 35. Пластина германия n -типа длиной $l = 10$ мм, шириной $a = 2$ мм и толщиной $b = 0,5$ мм имеет продольное сопротивление $R = 2$ кОм. Время жизни неосновных носителей заряда $\tau = 100$ мкс. На образец нормально поверхности падает монохроматическое излучение с длиной волны $\lambda = 0,546$ мкм. На этой длине волны световой эквивалент потока излучения $K_{\lambda} = 625$ лм / Вт. Считая, что весь падающий на образец световой поток полностью расходуется на генерацию электронно-дырочных пар, определить, при какой освещенности образца его сопротивление уменьшится в два раза. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта η принять равным единице, а подвижность электронов μ_n и дырок μ_p соответственно 0,39 и 0,19 м² / (В·с). При данной температуре собственная концентрация носителей $n_i = 2,1 \cdot 10^{19}$ м⁻³. Поверхностной рекомбинацией пренебречь.

Решение

Найдем удельное сопротивление германия

$$\rho_0 = Rab/l = 2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} / 10^{-2} = 0,2 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Удельное сопротивление связано с концентрацией носителей n и p соотношением

$$1/\rho_0 = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) = e(n_0\mu_n + n_i^2\mu_p/n).$$

Отсюда получаем уравнение для равновесной концентрации электронов

$$n^2 - \frac{n_0}{e\mu_n\rho_0} + \frac{n_i^2\mu_p}{\mu_n} = 0.$$

Подставляя в него значения из условия задачи, имеем

$$n^2 - \frac{n_0}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,39 \cdot 0,2} + \frac{(2,1 \cdot 10^{19})^2 \cdot 0,19}{0,39} = 0$$

или

$$n^2 - 8 \cdot 10^{19} n_0 + 2,15 \cdot 10^{38} = 0.$$

Решением этого уравнения является $n_0 = 7,72 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Равновесная концентрация дырок

$$p_0 = n_i^2 / n_0 = (2,1 \cdot 10^{19})^2 / (7,72 \cdot 10^{19}) = 5,7 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}.$$

При поглощении света в образце генерируется равное число неравновесных электронов Δn и дырок Δp . Поэтому удельная проводимость освещенного образца

$$\gamma_c = e(\Delta n + n_0)\mu_n + e(\Delta p + p_0)\mu_p = 2 \cdot 10^{-10} \text{ См/м}$$

или $10 = 1,6 \cdot 10^{19} \Delta n (0,39 + 0,19) + 1/0,2$. Отсюда $\Delta n = \Delta p = 5,4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Общее число неравновесных электронов и дырок, создаваемых при поглощении фотонов во всем объеме образца V :

$$\Delta n = \Delta p = \Delta n V = 5,4 \cdot 10^{19} (10 \cdot 2 \cdot 0,5) 10^{-9} = 5,4 \cdot 10^{11}.$$

Вследствие рекомбинации число электронно-дырочных пар в образце уменьшается со скоростью $r = \Delta n_x / \tau = 5,4 \cdot 10^{11} / 10^{-4} = 5,4 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$. Чтобы в образце поддерживалось необходимое динамическое равновесие, т. е. неизменное число неравновесных носителей заряда, должно выполняться условие $r = \eta N_\Phi$, где N_Φ – число фотонов, ежесекундно поглощаемых в

объеме полупроводника. Требуемый световой поток

$$\Phi = N_\Phi \frac{hc}{\lambda} K_\lambda = \frac{5,4 \cdot 10^{15} \cdot 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 625}{0,546 \cdot 10^{-6}} = 1,23 \text{ лм}.$$

Тогда освещенность образца

$$F = \Phi / S = 1,23 / (10 \cdot 2 \cdot 10^{-6}) = 6,15 \cdot 10^4 \text{ лк}.$$

Задача 36. На пластину полупроводника размерами $l \cdot b \cdot d$ перпендикулярно плоской поверхности падает поток монохроматического излучения интенсивностью I_0 . Показатель преломления полупроводника n_0 и показатель оптического поглощения α . Полагая, что в создании фототока I_Φ принимают участие только электроны, и пренебрегая темновым током, доказать, что

$$I_\Phi = e \mu_n \tau_n \eta \frac{b}{l} I_0 \frac{4n_0 U}{(n_0 + 1)^2} (1 - e^{-\alpha d}),$$

где τ_n – время жизни электронов; η – квантовый выход внутреннего фотоэффекта; d – размер полупроводниковой пластины (в направлении падения света); U – напряжение, приложенное вдоль пластины (по размеру l).

Решение

В соответствии с законом Буфера-Ламберта изменение интенсивности излучения при удалении от поверхности в глубь Полупроводника I

$\gamma(x) = I_0 (1 - R) \exp(-\alpha x)$. При нормальном падении световых лучей коэффициент френелевского отражения $R = \left(\frac{n_0 - 1}{n_0 + 1} \right)^2$.

Выделим тонкий слой толщиной dx , в пределах которого интенсивность излучения можно считать постоянной. Тогда в стационарных условиях для избыточной концентрации электронов справедливо выражение

$$\Delta n(x) = g(x) \tau_n = \eta \alpha \tau_n I_0 (1 - R) \exp(-\alpha x),$$

где $g(x)$ – скорость оптической генерации носителей заряда (см. решение задачи 33).

Электрический ток, протекающий в слое dx на глубине x ,

$$dI_\Phi = \gamma(x) E b dx = e b \Delta n(x) \mu_n \frac{U}{l} dx.$$

Суммируя проводимость всех слоев и переходя к интегралу, найдем полный фототок

$$I_\Phi = e \mu_n b \frac{U}{l} \int_0^d \Delta n(x) dx = e \mu_n \tau_n \eta \frac{b}{l} I_0 (1 - R) \left(1 - e^{-\alpha d} \right).$$

Задача 37. Известно, что в фоторезисторах из собственного сульфида кадмия фототок создается главным образом электронами. Докажите, что отношение числа электронов, проходящих во внешней цепи под действием внешнего поля, к числу носителей заряда, возбуждаемых светом в полупроводнике, определяется выражением $G = \tau_n / t$, где τ_n – время жизни электронов; t – время их дрейфа между электродами.

Решение

Для упрощения анализа рассмотрим случай слабого поглощения, когда скорость оптической генерации носителей заряда практически постоянна во всем объеме полупроводника. Тогда $G = \frac{I_\Phi}{gV}$, где $V = lbd$ – объем

полупроводника; l – расстояние между электродами; g – скорость оптической генерации носителей заряда.

Пренебрегая темновым током, получаем выражение для тока в освещенном фоторезисторе

$$I_\Phi = \sigma_\Phi U = \gamma_\Phi \frac{bd}{l} U = e \Delta n \mu_n b d E,$$

где $\Delta n = \tau_n g$. Тогда

$$G = \frac{\tau_n g \mu_n b d E}{l} = \frac{\tau_n U_n}{l} = \frac{\tau_n}{t}.$$

Аналогично можно решить задачу и для случая неравномерного поглощения света.

Задача 38. Прямоугольный образец полупроводника n -типа с размерами $a = 50$ мм, $b = 5$ мм и $\delta = 1$ мм помещен в магнитное поле с индукцией $B = 0,5$ Тл. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости образца. Под действием напряжения $U_a = 0,42$ В, приложенного вдоль образца, по нему протекает ток $I_a = 20$ мА. Измерения показывают ЭДС Холла $U_H = 6,25$ мВ. Найти удельную проводимость, подвижность и концентрацию носителей заряда для этого полупроводника, полагая, что электропроводность обусловлена носителями только одного знака.

Решение

Удельное сопротивление полупроводника

$$\rho = \frac{U_H \delta}{I_a a} = \frac{0,42 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-3}} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Отсюда следует, что удельная проводимость $\gamma = 1 / \rho = 480$ См/м. Коэффициент Холла вычисляем по формуле

$$R_H = \frac{U_H \delta}{I_a B} = \frac{6,25 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5} = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 / \text{Кл}.$$

Концентрация электронов

$$n = (R_H e)^{-1} = (6,25 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19})^{-1} = 10^{22} \text{ м}^{-3}.$$

Из выражения $\gamma = en\mu_n$ следует, что подвижность электронов

$$\mu_n = \gamma R_H = 480 \cdot 6,25 \cdot 10^4 = 0,3 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}).$$

Задача 39. В кремнии n -типа с концентрацией доноров $N_d = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ при температуре $T_1 = 20$ К коэффициент Холла $R_{H1} = 428 \text{ м}^3/\text{Кл}$, а при температуре $T_2 = 40$ К $R_H = 0,21 \text{ м}^3/\text{Кл}$. Определить энергию ионизации доноров.

Решение

Концентрация носителей заряда при $T = 40$ К

$$n = (R_H e)^{-1} = (0,21 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19})^{-1} = 2,98 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

Поскольку $n \ll N_d$, можно воспользоваться формулой

$$n = \sqrt{N_c N_d} \exp\left[-\frac{\Delta W_d}{2kT}\right].$$

Тогда коэффициент Холла

$$R_{\text{h}} = \frac{1}{ne} = \frac{\exp\left[-\Delta W_{\text{d}} / (2kT)\right]}{e\sqrt{N_{\text{c}}N_{\text{d}}}}.$$

Учитывая, что $N_c \sim T^{3/2}$, приходим к соотношению

$$\ln \frac{R_{H2} T_2^{3/4}}{R_{H1} T_1^{3/4}} = \frac{\Delta W}{2k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right).$$

Отсюда находим энергию ионизации доноров

$$\Delta W_d = \frac{2k \ln \left[\frac{R_{H2} T_2^{3/4}}{R_{H1} T_1^{3/4}} \right]}{1/T_2 - 1/T_1} = \frac{2 \cdot 8,625 \cdot 10^{-5} \ln \left[\frac{0,21 \cdot 40^{3/4}}{(428 \cdot 20^{3/4})} \right]}{1/40 - 1/20} = 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ эВ.}$$

Задача 40. Вычислить коэффициент Холла для германия с собственной электропроводностью при температурах $T_1 = 300$ К и $T_2 = 500$ К, полагая, что подвижности электронов и дырок изменяются в соответствии с выражениями: $\mu_n = 0,39 (T / 300)^{-3/2}$; $\mu_p = 0,19 (T / 300)^{-3/2}$. Параметры зонной структуры, необходимые для расчета собственной концентрации носителей заряда, взять из условия задачи 11. $\Delta E_g = 0,665$ эВ.

Решение

Если в электропроводности полупроводника участвуют носители заряда двух типов, то коэффициент Холла определяется выражением

$$R_H = - \frac{A}{e} \frac{n(\mu_n | \mu_p)_2 - p}{[n(\mu_n | \mu_p) + p]^2},$$

где A – коэффициент, зависящий от механизмов рассеяния, преобладающих в полупроводнике.

Полагая, что при комнатной и более высоких температурах на значение коэффициента Холла влияет в основном рассеяние на тепловых колебаниях узлов решетки (при этом $A = 1,18$), для собственного полупроводника имеем

$$R_H = - \frac{1,18}{e} \frac{\mu_n | \mu_p - 1}{n_i (\mu_n | \mu_p + 1)}.$$

При температуре T_1 собственная концентрация носителей заряда в германии равна $2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, а при T_2 она равна $1,9 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ (см. задачу 3.1.25). Отсюда находим коэффициент Холла

$$R_H = - \frac{1,18(0,39 | 0,19 - 1)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,1 \cdot 10^{19} (0,39 | 0,19 + 1)} = -0,12 \text{ м}^3 | \text{ Кл.}$$

Аналогично для $T = 500$ К находим $R_H = -1,34 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 | \text{ Кл.}$

Задача 41. В результате измерений установлено, что в пластине кремния p -типа при температуре $T = 500$ К наблюдается инверсия знака коэффициента

Холла. Найти концентрацию акцепторов в полупроводнике, если $\mu_n = 0,14 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_p = 0,048 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$, причем отношение подвижностей остается неизменным во всем температурном интервале измерений. Данные для расчета собственной концентрации носителей заряда взять из задач 12 и 21.

Решение

При температуре инверсии знака коэффициента Холла выполняется условие (см. решение задачи 41) $n\mu_n^2 - p\mu_p^2 = 0$. Отсюда следует: $p = n \frac{\mu_n^2}{\mu_p^2}$.

Используя соотношение «действующих масс» для носителей заряда: $np = n_i^2$,

получаем $p = n_i \frac{\mu_n}{\mu_p}$.

При $T = 500 \text{ К}$ собственная концентрация носителей заряда в кремнии $n_i = 1,6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ (см. решение задачи 21). Поэтому концентрация дырок при температуре инверсии

$$p = 1,6 \cdot 10^{20} \cdot 0,14 / 0,048 = 4,67 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

При понижении температуры до 300 К концентрация дырок остается практически неизменной и равной концентрации акцепторов. Таким образом, $N_a = 4,7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Задача 42. Какая разность потенциалов возникает между концами образца собственного германия при его неравномерном нагреве, если перепад температуры по образцу $\Delta T = 10 \text{ К}$, а температура более холодного конца равна 500 К ? Параметры зонной структуры германия взять из условия задачи 11. Отношение подвижностей носителей заряда μ_n / μ_p принять равным двум.

Решение

Разность потенциалов между концами полупроводника при неравномерном его нагреве пропорциональна разности температур: $\Delta U_T = \alpha_T \Delta T$, где α_T – относительная термоЭДС, которая в собственном

полупроводнике определяется выражением

$$\alpha_T = \frac{k}{e} \left[\frac{\mu_n}{\mu_n + \mu_p} \left(2 + \ln \frac{N_c}{n_i} \right) - \frac{\mu_p}{\mu_n + \mu_p} \left(2 + \ln \frac{N_v}{p_i} \right) \right],$$

где значения концентрации носителей заряда, а также эффективной плотности состояний для электронов в зоне проводимости и для дырок в валентной зоне для собственного германия могут быть найдены из выражений, приведенных в решении задачи 11.

При температуре $T = 500$ К имеем: $n_i = p_i = 1,87 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; $N_c = 2,2 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$; $N_v = 1,3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Тогда

$$\alpha_T = \frac{1}{8,625 \cdot 10^{-5}} \left[\frac{1}{1+0,5} \left(2 + \ln \frac{2,2 \cdot 10^{25}}{1,87 \cdot 10^{22}} \right) - \frac{1}{2+1} \left(2 + \ln \frac{1,3 \cdot 10^{25}}{1,87 \cdot 10^{22}} \right) \right] = 0,28 \text{ K}^{-1} \text{ мВ}$$

$$\Delta U_T = \alpha_T \Delta T = 0,28 \cdot 10 = 2,8 \text{ мВ}.$$

Задача 43. Вычислить дифференциальную термоЭДС для кремния n -типа с концентрацией фосфора $N_d = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ при температуре $T = 300 \text{ К}$. На сколько изменится значение термоЭДС, если температуру полупроводника повысить до 400 К .

Решение

Для полупроводника n -типа дифференциальная термоЭДС

$$\alpha_T = \frac{k}{\gamma n \mu_n} \left(2 + \ln \frac{N_c}{n} \right) = \frac{k}{e} \left(2 + \ln \frac{N_c}{n} \right)$$

где γ – удельная проводимость полупроводника.

При комнатной и более высоких температурах все мелкие доноры в кремнии ионизированы, поэтому $n = N_d$. При $T = 300 \text{ К}$ имеем $N_c = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ (см. решение задачи 12), откуда

$$\alpha_T = \frac{1}{8,625 \cdot 10^{-5}} \left(2 + \ln \frac{2,69 \cdot 10^{25}}{10^{22}} \right) = 8,54 \cdot 10^{-4} \text{ В К}^{-1} = 854 \text{ мВ К}^{-1}.$$

При $T = 400 \text{ К}$ получаем

$$N_c = 2,69 \cdot 10^{25} \left(\frac{400}{300} \right)^{3/2} = 4,14 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

и соответственно $\alpha_T = 891 \text{ мВ К}^{-1}$. Таким образом, при повышении температуры на 100 К удельная термоЭДС возрастает на $4,3 \%$.

Задача 44. Рассчитать количество сурьмы, необходимое для выращивания кристалла германия n -типа с удельным сопротивлением $\rho = 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ из расплава массой $m_l = 4 \text{ кг}$ в предположении равномерного распределения легирующей примеси по объему кристалла. Коэффициент распределения сурьмы между твердой и жидкой фазами $k_{sb} = N_s / N_l = 3 \cdot 10^{-3}$ (N_s , N_l – концентрация примесей в твердой и жидкой фазе соответственно), плотность расплава $d_l = 5600 \text{ кг/м}^3$, подвижность электронов $\mu_n = 0,38 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$.

Решение

Заданному удельному сопротивлению соответствует концентрация электронов

$$n = (e \mu_n \rho)^{-1} = (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot 0,38)^{-1} = 1,64 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

При комнатной температуре все атомы сурьмы в германии полностью ионизированы, поэтому концентрация электронов равна концентрации доноров: $n = N_d = N_{Sb} = N_s$.

Требуемая концентрация сурьмы в жидкой фазе

$$N_l = N_s |k_{Sb} = 1,64 \cdot 10^{23} \left| (3 \cdot 10^{-3}) \right| = 5,47 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Определив объем исходного расплава $V = m_l |d_l = 4 |5600 = 7,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$,

найдем суммарное число атомов сурьмы в жидкой фазе

$$Q = N_l V = 5,47 \cdot 10^{23} \cdot 7,14 \cdot 10^{-4} = 3,9 \cdot 10^{20}.$$

Масса легирующей навески

$$m_{Sb} = \frac{Q}{N_0} A_{Sb} = \frac{3,9 \cdot 10^{20}}{6,02 \cdot 10^{23}} \cdot 121,75 \cdot 10^{-3} = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ кг}.$$

Задача 45. Известно, что при температуре 800 °С растворимость мышьяка в жидком галлии составляет 2,0 ат. %. Рассчитать, какое количество арсенида галлия m_{GaAs} необходимо растворить в 10 г галлия, чтобы получить насыщенный раствор-расплав при данной температуре.

Решение

По определению атомной доли

$$x_{As}^l = \frac{N_{As}}{N_{Ga} + N_{As}} = \frac{N'_{Ga} + N''_{Ga} + N_{As}}{N'_{Ga} + N''_{Ga} + N_{As}} = \frac{N'_{Ga} + 2N_{As}}{N'_{Ga} + N_{As}},$$

где N'_{Ga} – число атомов галлия в исходной навеске; $N''_{Ga} = N_{As}$ – число атомов галлия, поступивших в расплав при растворении $GaAs$. Тогда

$$N_{As} = \frac{N'_{Ga} x_{As}^l}{1 - 2x_{As}^l} = N_{GaAs} = \frac{m_{GaAs} N_0}{M_{GaAs}},$$

где N_0 – число Авогадро. Необходимое количество арсенида галлия

$$m_{GaAs} = \frac{m_{Ga} M_{GaAs} x_{As}^l}{A_{Ga} (1 - 2x_{As}^l)} = \frac{10 \cdot 144,63 \cdot 0,02}{69,72(1 - 2 \cdot 0,02)} = 0,432 \text{ г}.$$

Задача 46. Рассчитать массу элементарных компонентов, используемых для образования 1 мм³ твердого раствора $Al_{0,4}Ga_{0,6}As$. Считать, что в твердых растворах $Al_xGa_{1-x}As$ соблюдается закон Вегарда. Необходимые сведения о бинарных соединениях, образующих твердый раствор, взять из справочника.

Решение

По закону Вегарда период решетки

$$a = 0,4a_{AlAs} + 0,6a_{GaAs} = 0,4 \cdot 0,35651 + 0,6 \cdot 0,35656 \text{ нм.}$$

Плотность твердого раствора

$$d = \frac{4M_{Al_{0,4}Ga_{0,6}As}}{N_0 a^3} = \frac{4 \cdot 127,55 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23} (0,5656 \cdot 10^{-9})^3} = 4683 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

с учетом того, что в состав элементарной ячейки кристаллической решетки со структурой сфалерита входит в среднем четыре формульные единицы $Al_{0,4}Ga_{0,6}As$. Масса синтезируемого материала $m = dV = 4683 \cdot 10^{-9} = 4,683$ мг.

Количество алюминия

$$m_{Al} = \frac{0,4 A_{Al} m}{M_{Al_{0,4}Ga_{0,6}As}} = \frac{0,4 \cdot 27 \cdot 4,683}{127,55} = 0,397 \text{ мг.}$$

Аналогично находим массы других компонентов: $m_{Ga} = 1,535$ мг; $m_{As} = 2,75$ мг.

Задача 47. Определить длину волны излучения, возникающего при прямой межзонной рекомбинации в твердых растворах $Ga_{0,8}In_{0,2}As$ при температуре $T = 300$ К, если известно, что ширина запрещенной зоны твердого раствора $Ga_{0,5}In_{0,5}As$ равна 0,74 эВ.

Решение

Изменение энергетических зазоров в зависимости от состава твердого раствора может быть аппроксимировано плавной кривой параболического вида $\Delta W(x) = \Delta W_1 x + \Delta W_2 (1 - x) - bx(1 - x)$, где ΔW_1 и ΔW_2 – ширина запрещенной зоны бинарных соединений, образующих твердый раствор; x – состав твердого раствора; b – эмпирический коэффициент нелинейности.

Ширина запрещенной зоны арсенида галлия $\Delta W_1 = 1,43$ эВ, а арсенида индия $\Delta W_2 = 0,36$ эВ. Для твердого раствора состава $x = 0,5$ имеем: $0,74 = 1,43 \cdot 0,5 + 0,36 \cdot 0,5 - b \cdot 0,5 \cdot 0,5$. Отсюда коэффициент нелинейности $b = 0,62$.

Ширина запрещенной зоны твердого раствора $Ga_{0,8}In_{0,2}As$

$$\Delta W = 1,43 \cdot 0,8 + 0,36 \cdot 0,2 - 0,62 \cdot 0,8 \cdot 0,2 = 1,12 \text{ эВ.}$$

Длина волны рекомбинационного излучения

$$\lambda = hc / \Delta W = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8 / 1,12 = 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 1,11 \text{ мкм.}$$

Задача 48. Определить, при каких значениях x и y период кристаллической решетки твердых растворов $Ga_x In_{1-x} P_y As_{1-y}$ совпадает с периодом решетки фосфида индия. Каким образом свойство изопериодичности твердых растворов используется в материалах электронной техники?

Решение

Твердый раствор $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$ можно представить состоящим из четырех бинарных соединений: GaP , InP , $GaAs$ и $InAs$, при этом молярная доля бинарного соединения в составе твердого раствора определяется произведением мольных индексов при соответствующих компонентах. Тогда в соответствии с законом Вегарда период решетки твердого раствора можно представить уравнением

$$a(x, y) = xa_{GaP} + (1-x)ya_{InP} + x(1-y)a_{GaAs} + (1-x)(1-y)a_{InSb}.$$

По условию задачи $a(x, y) = a_{InP}$. Отсюда получаем уравнение изопериодического замещения

$$xa_{GaP} + (y - xy - 1)a_{InP} + x(1-y)a_{GaAs} + (1-x)(1-y)a_{InSb} = 0.$$

Используя справочные данные, имеем: $a_{GaP} = 0,5451$ нм; $a_{InP} = 0,5869$ нм; $a_{GaAs} = 0,5653$ нм; $a_{InAs} = 0,6058$ нм.

После подстановки числовых значений и преобразований получаем условие изопериодического замещения по отношению к InP :

$$y = \frac{0,0189 - 0,0405x}{0,0189 + 0,0013x}.$$

Задача 49. Рассчитайте максимальную толщину эпитаксиального слоя h , осаждаемого на подложку площадью $S = 1$ см² из насыщенного раствора-расплава фосфида галлия в галлий массой $m = 1$ г при равновесном охлаждении гетерогенной системы от 950 °С до 900 °С, если при 950 °С растворимость фосфора в жидкой фазе $x_p' = 1,5$ ат. %, а при 900 °С $x_p'' = 1$ ат. %. Плотность фосфида галлия принять равной 4,1 Мг / м³.

Решение

В общей массе раствора-расплава m на растворитель (галлий) приходится

$$m_{Ga} = \frac{m_p(1-x_p')A_p}{x_p'A_p + (1-x_p')A_{Ga}} = \frac{(1-0,015) \cdot 69,72}{0,015 \cdot 30,97 + (1-0,015) \cdot 69,72} = 0,9933 \text{ г},$$

где A_{Ga} и A_p – молярные массы галлия и фосфора.

Масса растворившегося соединения

$$m_{GaP}' = \frac{m_{Ga}M_{GaP}x_p}{A_{Ga}(1-2x_p)},$$

где M_{GaP} – молярная масса соединения.

Поскольку количество растворителя при изменении температуры остается неизменным, масса вещества, выделяемого из раствора-расплава,

$$\Delta m = m'_{GaP} - m''_{GaP} = \frac{m}{A_{Ga}} \left(\frac{x'}{1-2x'_p} - \frac{x''}{1-2x''_p} \right)$$

$$= \frac{0,9933 \cdot 100,7}{69,72} \left(\frac{0,015}{1-2 \cdot 0,015} - \frac{0,01}{1-20,01} \right) = 7,546 \cdot 10^{-3} \text{ г.}$$

Полагая, что все избыточно растворенное вещество осаждается на подложке, найдем толщину эпитаксиального слоя

$$h = \frac{\Delta m}{S_p} = \frac{7,546 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 4,1} = 1,84 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 18,4 \text{ мкм.}$$

Задача 50. Имеется германиевый p - n -переход с концентрацией примесей $N_d = 10^3 N_a$, причем на каждые 10^8 атомов германия приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов при температуре $T = 300$ К. Концентрации атомов германия N и ионизированных атомов n_i , принять равными $4,4 \cdot 10^{22}$ и $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Решение

Концентрация акцепторных атомов $N_a = N / 10^3 = 4,4 \cdot 10^{22} / 10^3 = 4,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Концентрация атомов доноров $N_d = 10^3 N_a = 4,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Если примеси ионизированы, то контактная разность потенциалов

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0,0258 \ln \frac{4,4 \cdot 10^{19} \cdot 4,4 \cdot 10^{22}}{(2,5 \cdot 10^{13})^2} = 0,326 \text{ В.}$$

Задача 51. Удельное сопротивление p -области германиевого p - n -перехода $\rho_p = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, а удельное сопротивление n -области $\rho_n = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Вычислить высоту потенциального барьера p - n -перехода при $T = 300$ К.

Решение

Удельное сопротивление p -области полупроводника $\rho_p \approx 1 / (N_a e \mu_p)$, где μ_p – подвижность дырок. Отсюда, используя приложение 3, найдем концентрацию акцепторов в p -области

$$N_a = \frac{1}{\rho_p e \mu_p} = \frac{1}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1900} = 1,65 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Аналогично найдем концентрацию доноров в n -области

полупроводника

$$N_{\text{д}} = \frac{1}{\rho_n e \mu_n} = \frac{1}{1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900} = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

Считая примеси ионизированными, найдем высоту потенциального барьера p - n -перехода

$$e\varphi_k = kT \ln(N_a N_d |n_i^2).$$

Приняв $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (из условия задачи 51), находим:

$$e\varphi_k = 8,62 \cdot 10^{-5} \ln \left| \frac{1,65 \cdot 10^{15} \cdot 1,6 \cdot 10^{15}}{(2,5 \cdot 10^{13})^2} \right| = 0,215 \text{ эВ.}$$

Задача 52. В структуре с германиевым p - n -переходом удельная проводимость p -области $\gamma_p = 10^4 \text{ См/м}$ и удельная проводимость n -области $\gamma_n = 10^2 \text{ См/м}$. Подвижности электронов μ_n и дырок μ_p в германии соответственно равны 0,39 и 0,19 $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Вычислить контактную разность потенциалов в переходе при температуре $T = 300 \text{ К}$, если собственная концентрация $n_i = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

Решение

Для материала p -типа $\gamma_p \approx p_p e \mu_p$, где p_p – концентрация дырок. Отсюда

$$p_p = \gamma_p \left| \left(e \mu_p \right) \right| = 10^4 \left| \left(0,19 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \right) \right| = 3,29 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Аналогично найдем концентрацию электронов в n -области:

$$n_n = \gamma_n \left| \left(e \mu_n \right) \right| = 100 \left| \left(0,39 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \right) \right| = 1,6 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

Концентрация дырок в n -области

$$p_n = n_i^2 \left| n_n \right| = (2,5 \cdot 10^{18})^2 \left| 1,6 \cdot 10^{21} \right| = 3,91 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}.$$

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{p_p}{p_n} \right) = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{e} \ln \left(\frac{3,29 \cdot 10^{23}}{3,91 \cdot 10^{17}} \right) = 0,35 \text{ В.}$$

Задача 53. Используя данные и результаты предыдущей задачи, найти:

а) плотность обратного тока насыщения, а также отношение дырочной составляющей обратного тока насыщения к электронной, если диффузионная длина электронов и дырок $L_n = L_p \cdot 10^{-3} \text{ м}$; б) напряжение, при котором плотность прямого тока $j = 10^5 \text{ А/м}^2$.

Решение

а) Плотность обратного тока насыщения, обусловленного неосновными носителями, $j_0 = D_p e p_n \left| L_p \right| + D_n e n_p \left| L_n \right|$. Из предыдущей задачи имеем

$$p_n = 3,91 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}; \quad n_p = n_i^2 \left| n_n \right| = 1,9 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}. \text{ Известно, что } D = (kT/e) \mu \text{ и}$$

$D_n = (kT \mid e) \mu_n$. Следовательно,

$$j_0 = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \left[\frac{(3,91 \cdot 10^{17} \cdot 0,91 + 0,19 \cdot 10^{15} \cdot 0,39)}{1 \cdot 10^{-3}} \right] = 0,31 \text{ А/м}^2.$$

Отношение дырочной составляющей обратного тока насыщения к электронной

$$I_{0p} / I_{0n} = \mu_p p_n L_n / (\mu_n n_p L_p) = 0,19 \cdot 3,91 \cdot 10^{17} / (0,39 \cdot 1,9 \cdot 10^{15}) = 100.$$

б) Напряжение U , которое необходимо приложить к переходу для получения тока плотностью 10^5 А/м^2 , найдем из выражения $j = j_0 [e^{eU/(kT)} - 1]$.

При этом $e^{eU/(kT)} - 1 = j/j_0 = 10^5 / 0,31 = 3,2 \cdot 10^5$, откуда $eU/(kT) = 12,7$. Тогда

$$U = 12,7 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 / (1,6 \cdot 10^{-19}) = 0,328 \text{ В}.$$

Задача 54. Германиевый p - n -переход имеет обратный ток насыщения 1 мкА , а кремниевый переход таких же размеров – обратный ток насыщения 10^{-8} А . Вычислить и сравнить прямые напряжения $U_{пр}$ на переходах при $T = 293 \text{ К}$ и токе 100 мА .

Решение

Ток через p - n -переход определим по формуле $I = I_0 \{ \exp[eU_{пр}/(kT)] - 1 \}$, где I_0 – обратный ток насыщения.

Для германиевого p - n -перехода можем записать:

$$100 \cdot 10^{-3} = 10^{-6} \exp[1,6 \cdot 10^{-19} U_{пр} / (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293)],$$

откуда $U_{пр} = 288 \text{ мВ}$.

Аналогично для кремниевого p - n -перехода при $I_0 = 10^{-8} \text{ А}$ получаем $U_{пр} = 407 \text{ мВ}$.

Задача 55. Обратный ток насыщения I_0 p - n -перехода при комнатной температуре равен 10^{-14} А . При повышении температуры до $125 \text{ }^\circ\text{С}$ обратный ток насыщения увеличился в 10^5 раз. Определить напряжение на переходе при комнатной температуре и температуре $125 \text{ }^\circ\text{С}$, если прямой ток через него $I = 1 \text{ мА}$.

Решение

Из вольт-амперной характеристики p - n -перехода имеем

$I/I_0 + 1 = \exp\left[\frac{eU}{kT}\right]$. Логарифмируя и решая это уравнение относительно U , получаем

$$U = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right).$$

При $T = 293 \text{ K}$

$$U = 0,026 \ln(10^{-3} \cdot 10^{-4} + 1) = 0,66 \text{ В.}$$

При $T = (293+125) \text{ K}$:

$$U = 0,036 \ln(10^{-3} \cdot 10^{-14} \cdot 10^5) = 0,5 \text{ В.}$$

Задача 56. Известно, что контактная разность потенциалов в резком p - n -переходе $\varphi_k = \frac{e}{2\epsilon\epsilon_0} (n_n \delta_n^2 + p_p \delta_p^2)$, где n_n и p_p – концентрация основных

носителей заряда в n - и p -области соответственно; δ_n и δ_p – ширина области объемного заряда по обеим сторонам границы раздела электронного и дырочного полупроводников соответственно; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная. Используя это выражение, определить ширину области объемного заряда δ симметричного и несимметричного p - n -переходов в отсутствие и при наличии внешнего напряжения. Получить выражение для барьерной емкости резких симметричного и несимметричного p - n -переходов.

Решение

Объемные заряды в обеих областях, прилегающих p - n -переходу, равны между собой, поэтому $n_n \delta_n = p_p \delta_p$, а так как $\delta = \delta_n + \delta_p$, то

$$\varphi_k = \frac{e}{2\epsilon\epsilon_0} \delta^2 \frac{n_n p_p}{n_n + p_p}.$$

Полагая примеси ионизированными ($n_n = N_d$, $p_p = N_a$), находим выражение для ширины области объемного заряда в отсутствие внешнего напряжения для симметричного резкого p - n -перехода:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \varphi_k \frac{N_d + N_a}{N_d N_a}}.$$

При подаче внешнего напряжения U меняются высота потенциального барьера p - n -перехода и ширина области объемного заряда

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 (N_d + N_a)}{e N_d N_a}} (\varphi_k - U).$$

Это выражение имеет смысл при $|\varphi_k - U| > 0$, поэтому при обратных

напряжениях $U < 0$ (обычно $\varphi_k \ll |U|$), при прямых напряжениях $U > 0$ ($\varphi_k \ll U$).

В несимметричном p - n -переходе концентрация примесей в одной области много больше, чем в другой. Поэтому, полагая, например, $N_a \gg N_d$, получаем

$$\delta = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0(\phi_k - U) |eN_d|}.$$

Пользуясь формулой для плоского конденсатора, можно найти барьерную емкость p - n -перехода $C_{\text{бар}} = \epsilon_0\epsilon S |\delta|$, S – площадь перехода. Тогда

для симметричного резкого p - n -перехода

$$C_{\text{бар}} = S \sqrt{\frac{e\epsilon_0\epsilon N_d N_a}{2(N_d + N_a)(\phi_k - U)}},$$

а для несимметричного перехода

$$C_{\text{бар}} = S \sqrt{\frac{e\epsilon_0\epsilon N}{2(\phi_k - U)}},$$

где N – концентрация примесей в слаболегированной области.

Задача 57. Обратный ток насыщения контакта металл-полупроводник с барьером Шотки $I_0 = 2$ мкА. Контакт соединен последовательно с резистором и источником постоянного напряжения $U_{\text{ист}} = 0,2$ В. Определить сопротивление резистора R , если падение напряжения на нем $U_R = 0,1$ В. Контакт находится при температуре $T = 300$ К.

Решение

Ток через барьер Шотки $I = I_0 \left[e^{eU/(kT)} - 1 \right]$, где U – прямое напряжение.

Поскольку падение напряжения на резисторе $U_R = 0,1$ В, напряжение на контакте $U = U_{\text{ист}} - U_R = 0,2 - 0,1 = 0,1$ В. Поэтому ток в цепи

$$I = 2 \cdot 10^{-6} \left[\exp \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} - 1 \right] = 93 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

Следовательно, $R = U / I = 0,1 / (93 \cdot 10^{-6}) = 1,08$ кОм.

Задачи

3.1 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 для электронов зоны проводимости и для дырок валентной зоны соответственно равны: $m_c = 1,05m_0$; $m_v = 0,56m_0$,

где m_0 – масса свободного электрона.

3.2 В собственном германии ширина запрещенной зоны при температуре 300 К равна 0,665 эВ. На сколько надо повысить температуру, чтобы число электронов в зоне проводимости увеличилось в два раза? Температурным изменением эффективной плотности состояний для электронов и дырок при расчете пренебречь.

3.3 Определить, как изменится концентрация электронов в арсениде галлия, легированном цинком до концентрации $N_{\text{Zn}} = 10^{22} \text{ м}^{-3}$, при повышении температуры от 300 до 500 К. Полагать, что при 300 К все атомы цинка полностью ионизированы.

3.4 Определить ток через образец кремния прямоугольной формы размерами $l \times b \times h = 5 \times 2 \times 1 \text{ мм}$, если вдоль образца приложено напряжение 10 В. Известно, что концентрация электронов в полупроводнике $n = 10^{21} \text{ м}^{-3}$, их подвижность $\mu_n = 0,14 \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$.

3.5 Рассчитать удельное сопротивление кристаллов арсенида галлия, легированных хромом до концентрации $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ при температуре 300 К, если энергия ионизации атомов хрома $\Delta W_a = 790 \text{ мэВ}$, а подвижность дырок $\mu_p = 0,04 \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$. Эффективную массу дырок принять равной $0,48 m_0$.

3.6 Образец кремния содержит в качестве примеси фосфор с концентрацией атомов $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Какую нужно создать концентрацию атомов галлия в этом полупроводнике, чтобы тип электропроводности изменился на противоположный, а удельное сопротивление стало равным $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$? При расчетах полагать, что подвижность дырок $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$. Выразить требуемую концентрацию галлия в массовых долях, если плотность кремния $d = 2,328 \text{ Мг} \cdot \text{м}^{-3}$.

3.7 В кристалле сверхчистого германия с периодом идентичности решетки $a = 0,5657 \text{ нм}$ при температуре 300 К один из каждых $2 \cdot 10^9$ атомов ионизирован. Полагая, что подвижность электронов и дырок равна соответственно $0,39$ и $0,19 \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$, определить удельное сопротивление материала в данных условиях.

3.8 В результате измерений установлено, что кристаллы арсенида галлия, легированные теллуром, при комнатной температуре имеют удельное сопротивление $\rho = 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, подвижность электронов $\mu_n = 0,5 \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$ и содержат железо как остаточную примесь в массовой доле $10^{-5} \%$. Вычислить, какое удельное сопротивление имели бы кристаллы при отсутствии примеси железа. Изменением подвижности электронов от содержания примесей пренебречь. Плотность арсенида галлия принять равной $5,32 \text{ Мг} \cdot \text{м}^{-3}$.

3.9 Сравнить относительные изменения удельных проводимостей меди и собственного германия при повышении температуры от 20 до 21 °С. Необходимые для расчета данные взять из приложения.

3.10 Вычислить собственное удельное сопротивление арсенида галлия при температурах 300 и 500 К, если температурные изменения подвижности электронов и дырок определяются выражениями: $\mu_n = 0,85(T/300)^{-2}$; $\mu_p = 0,045(T/300)^{-2,5}$.

3.11 Через кристалл кремния *n*-типа с удельным 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 м²·(В·с)⁻¹? Как и почему изменится время дрейфа, если электрический ток той же плотности пропускать через кристалл кремния *n*-типа с более высоким удельным сопротивлением?

3.12 Образец арсенида галлия с удельным сопротивлением $5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м характеризуется коэффициентом Холла $3 \cdot 10^{-4}$ м³·Кл⁻¹. Определить: а) напряженность холловского поля, возникающего при пропускании через образец тока плотностью 10 мА·мм⁻² и воздействии магнитного поля с индукцией 2 Тл; б) напряженность внешнего электрического поля для создания заданной плотности тока.

3.13 Пленка антимиона индия *n*-типа размерами $l \times b = 20 \times 10$ мм расположена в плоскости, перпендикулярной магнитному полю Земли. Вычислить, какую разность потенциалов нужно приложить вдоль пленки (по длине l), чтобы на других сторонах получить ЭДС Холла $U_H = 1$ мВ. Индукцию магнитного поля Земли принять равной 44 мкТл, а подвижность электронов $\mu_n = 7,8$ м²·(В·с)⁻¹.

3.14 Вычислить дифференциальную термоЭДС для кремния *n*-типа с концентрацией фосфора $N_d = 10^{22}$ м⁻³ при температуре $T = 300$ К. На сколько изменится значение термоЭДС, если температуру полупроводника повысить до 400 К.

3.15 При перепаде температуры $\Delta T = 3$ К по толщине кремниевой пластины *n*-типа между плоскостями образца возникает термоЭДС $\Delta U_T = 2,5$ мВ. Определить концентрацию доноров в материале, если средняя температура образца $T = 500$ К.

3.16 Какая разность потенциалов возникает между концами образца собственного германия при его неравномерном нагреве, если перепад температуры по образцу $\Delta T = 10$ К, а температура более холодного конца равна 500 К? Ширина запрещенной зоны германия $\Delta W = 0,665$ эВ, а эффективные

массы плотности состояний $m_c = 0,55m_0$, $m_v = 0,388m_0$. Отношение подвижностей заряда μ_n / μ_p принять равным двум.

3.17 На рис. 4.2 показана схема для исследования термоэлектрического эффекта в полупроводниках. Вычислить, насколько отличается относительная дифференциальная термоЭДС термопары медь – полупроводник и абсолютная дифференциальная термоЭДС полупроводника, в качестве которого взят кремний p -типа с концентрацией мелких акцепторов $N_a = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ (при средней температуре $T = 300 \text{ К}$).

3.18 Имеется кремниевый p - n -переход с концентрацией примесей $N_d = 10^3 N_a$, причем на каждые 10^8 атомов кремния приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов при температуре $T = 300 \text{ К}$. Концентрацию атомов кремния N и концентрацию n_i принять равными $5,0 \cdot 10^{22}$ и 10^{10} см^{-3} .

3.19 Барьерная емкость резкого p - n -перехода равна 200 пФ при обратном напряжении 2 В. Какое требуется обратное напряжение, чтобы она уменьшилась до 50 пФ, если контактная разность потенциалов $\varphi_k = 0,82 \text{ В}$?

3.20 В равновесном состоянии высота потенциального барьера p - n -перехода равна 0,2 В, концентрация акцепторных примесей $N_a = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в p -области, что много меньше концентрации донорных примесей N_d в n -области. Найти барьерную емкость p - n -перехода, соответствующую обратным напряжениям 0,1 и 10 В, если площадь перехода $S = 1 \text{ мм}^2$. Вычислить ширину области объемного заряда p - n -перехода для этих напряжений. Чему она будет равна при прямом напряжении 0,1 В?

3.21 Определить барьерную емкость и ширину p - n -перехода, сформированного в арсениде индия, при температуре $T = 300 \text{ К}$, если концентрация основных носителей заряда: $p_p = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $n_n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, относительная диэлектрическая проницаемость InAs $\epsilon = 14,6$, площадь поперечного сечения p - n -перехода $S = 0,1 \text{ мм}^2$. К p - n -переходу приложено обратное напряжение $|U_{\text{обр}}| = 100 \text{ В}$.

3.22 Ток, текущий через идеальный p - n -переход при большом обратном напряжении и температуре 60°С , равен 0,4 мкА. Найти ток при прямом смещении 0,2 В и комнатной температуре.

3.23 Барьерная емкость диода при обратном напряжении 2 В равна 250 пФ. Какое требуется напряжение, чтобы при температуре 27°С уменьшить емкость до 50 пФ, если концентрации донорных и акцепторных примесей соответственно равны $N_d = 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ и $N_a = 5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$?

3.24 Найти ток через переход металл-полупроводник при прямом смещении 3 В, если металл – алюминий, а полупроводник – кремний n -типа с концентрацией доноров $N_d = 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Температура равна 40 °С.

Тема 2. ПАССИВНЫЕ И АКТИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ И ЭЛЕМЕНТЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Цель занятия: закрепление теоретических знаний о механизмах поляризации диэлектриков в электрическом поле, под действием механических напряжений, спонтанной поляризации; приобретение практических навыков расчета параметров пассивных и активных диэлектриков.

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

$$P = nql, \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (4.1)$$

где q – величина заряда одного диполя, Кл; l – расстояние между центрами положительного и отрицательного заряда, м; n – число диполей в 1 м^3 . 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. В зависимости от вида заряда и расстояния, на которое он способен перемещаться, различают электронную, ионную, дипольную (ориентационную), миграционную поляризацию.

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

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}, \quad (4.2)$$

где Q_d – заряд конденсатора, обусловленный поляризацией диэлектрика.

Заряд конденсатора

$$Q = CU, \text{ Кл.} \quad (4.3)$$

Емкость конденсатора с диэлектриком

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d}, \text{ Ф,} \quad (4.4)$$

где $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ – диэлектрическая постоянная; S – площадь электродов, м^2 ; d – расстояние между ними, м .

Удельный заряд конденсатора

$$\frac{Q}{S} = \frac{CU}{S} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U}{d} = \varepsilon \varepsilon_0 E = D, \quad (4.5)$$

где $E = U/d$ – напряженность электрического поля, $\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$; D – диэлектрическая индукция (смещение), $\text{Кл} \cdot \text{м}^{-2}$. Так как $Q = Q_0 + Q_d$, то

$$D = \varepsilon_0 E + \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) E = \varepsilon_0 E + \varepsilon_0 \chi E = \varepsilon_0 E + P, \quad (4.6)$$

где $\chi = \varepsilon - 1$ – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика; $P = \varepsilon_0 \chi E$ – поляризованность диэлектрика, $\text{Кл} \cdot \text{м}^{-2}$. В сильных электрических полях линейная зависимость между поляризованностью и напряженностью поля нарушается.

Диэлектрическая проницаемость неоднородных диэлектриков. Если плоский конденсатор с неоднородным диэлектриком можно рассматривать как m параллельно соединенных конденсаторов с однородными диэлектриками, то относительная диэлектрическая проницаемость неоднородного диэлектрика

$$\varepsilon_n = \sum_{i=1}^{i=m} C_i \varepsilon_i, \quad (4.7)$$

где C_i – объемная концентрация i компонента, m – количество параллельно расположенных компонентов неоднородного диэлектрика.

Если плоский конденсатор с неоднородным диэлектриком можно рассматривать как m последовательно соединенных конденсаторов с однородными диэлектриками, то

$$\frac{1}{\varepsilon_n} = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{C_i}{\varepsilon_i}. \quad (4.8)$$

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

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

$$\ln \varepsilon_c = C_1 \cdot \ln \varepsilon_1 + C_2 \cdot \ln \varepsilon_2, \quad (4.9)$$

где $\varepsilon_c, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ – относительные диэлектрические проницаемости смеси и отдельных компонентов соответственно; C_1 и C_2 – объемные концентрации компонентов, $C_1 + C_2 = 1$.

Поляризация под действием механических напряжений. Материалы, способные поляризоваться в отсутствие внешнего электрического поля под

действием механических напряжений, называются пьезоэлектриками, а физическое явление электризации, сопровождающей деформацию, – пьезоэффектом. Его причиной служит смещение положительных и отрицательных ионов или отдельных фрагментов молекул в кристаллах, не имеющих центра симметрии.

Количественной мерой пьезоэффекта (основной характеристикой пьезоэлектрика) является пьезомодуль – коэффициент пропорциональности между поляризованностью (или электрической индукцией D , так как при $E = 0$ $P = D$) и механическим напряжением:

$$P = d\sigma, \quad (4.10)$$

где d – пьезомодуль, Кл·Н⁻¹; σ – механическое напряжение, Па.

Эффективность преобразования электрической энергии в механическую и обратно характеризует коэффициент электромеханической связи

$$k = \sqrt{W_{\text{вых}} W_{\text{вх}}}, \quad (4.11)$$

где $W_{\text{вых}}$, $W_{\text{вх}}$ – плотность выходной преобразованной энергии и входной энергии соответственно, Дж·м⁻³.

Спонтанная поляризация. Если кристалл достаточно долго находится при постоянной температуре, наличие спонтанно поляризованного состояния внешне не проявляется, так как поле связанных зарядов нейтрализуется свободными носителями зарядов внутри диэлектрика или на его поверхности. Электризация диэлектриков при изменении температуры называется пирозлектрическим эффектом. Пироактивность диэлектрика оценивает пирозлектрический коэффициент

$$\gamma_{\text{пир}} = \Delta P / \Delta T, \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}, \quad (4.12)$$

где ΔP – изменение спонтанной поляризации при изменении температуры на ΔT .

Пирозлектрики, вектор поляризованности которых может переориентироваться под действием внешнего электрического поля, являются сегнетоэлектриками.

Электропроводность диэлектриков. В общем случае ток в диэлектрике

$$I = I_{\text{см}} + I_{\text{абс}} + I_{\text{скв}}, \quad (4.13)$$

где $I_{\text{см}}$ – ток смещения, $I_{\text{абс}}$ – ток абсорбции, $I_{\text{скв}}$ – ток сквозной проводимости. Кратковременный ток смещения обусловлен быстрыми видами поляризации (электронным, ионным). 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 ток сквозной проводимости.

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

$$\gamma = qn\mu = \gamma_0 \exp(-W_a / kT), \quad (4.14)$$

где q – заряд иона, Кл; n – концентрация ионов, м^{-3} ; μ – подвижность носителей заряда, $\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; γ_0 – константа, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; $W_a = W / 2 + v$, $W = W_f$ или

$W = W_s$ – энергия образования дефектов Френкеля или Шоттки в зависимости от типа дефектов, Дж; v – энергия активации перемещения ионов, Дж; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ – 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

$$R_s = \rho_s \frac{l}{b}, \quad (4.15)$$

где l – 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 процессами установления поляризации при изменении напряженности электрического поля.

Потери мощности на нагрев диэлектрика в постоянном электрическом поле

$$P = U^2 / R, \text{ Вт}, \quad (4.16)$$

где U – напряжение, В; R – сопротивление диэлектрика, Ом. Потери мощности в единице объема диэлектрика называются удельными электрическими потерями и определяются по формуле

$$P_{\text{уд}} = E^2 / \rho, \text{ Вт/м}^3, \quad (4.17)$$

где E – напряженность электрического поля, $\text{В}\cdot\text{м}^{-1}$; ρ_s – удельное электрическое сопротивление, $\text{Ом}\cdot\text{м}$.

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* $\text{tg}\delta$. 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 . Векторные диаграммы и схемы замещения для диэлектрика с потерями показаны на рисунке.

Угол δ , дополняющий угол сдвига фаз между током и напряжением до 90° , называется *углом диэлектрических потерь*.

Диэлектрические потери для параллельной схемы

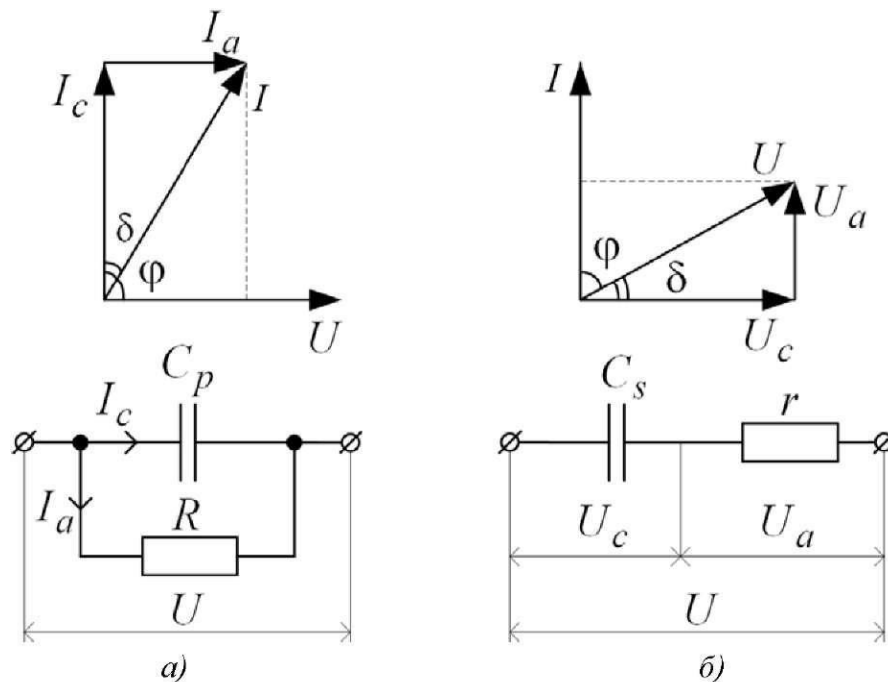
$$P = U^2 \omega C_p \text{tg}\delta, \quad (4.18)$$

где $\text{tg}\delta = I_a / I_c = 1 / \omega C_p R$; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, $\text{рад}\cdot\text{с}^{-1}$; f – частота, Гц.

Диэлектрические потери для последовательной схемы

$$P = \frac{U^2 \omega C_s \text{tg}\delta}{1 + \text{tg}^2\delta}, \quad (4.19)$$

где $\text{tg}\delta = U_r / U_c = \omega C_s r$.



Векторные диаграммы и схемы замещения диэлектрика с потерями: а – параллельная, б – последовательная

Для качественных диэлектриков с малыми потерями можно пренебречь значением $tg^2\delta$ по сравнению с единицей, и в этом случае выражения для мощности, рассеиваемой в диэлектрике, будут одинаковы для обеих схем:

$$P = U^2 \omega C tg\delta. \quad (4.20)$$

Удельные диэлектрические потери определяются выражением

$$P_{уд} = \frac{P}{V} = \omega \varepsilon tg\delta E^2 = \frac{\varepsilon f tg\delta}{1,8 \cdot 10^{10}} E^2 = \gamma_a E^2, \quad (4.21)$$

где $\gamma_a = \frac{\varepsilon f tg\delta}{1,8 \cdot 10^{10}}$ – активная составляющая удельной проводимости

диэлектрика, $Om^{-1} \cdot m^{-1}$. Полная удельная проводимость может быть представлена в виде комплексной величины

$$\bar{\gamma} = \gamma_a + j\gamma_c = \frac{\varepsilon f}{1,8 \cdot 10^{10}} (tg\delta + j), \quad (4.22)$$

где γ_c – реактивная составляющая удельной проводимости.

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

Диэлектрик, обладающий диэлектрическими потерями, можно характеризовать **комплексной диэлектрической проницаемостью**

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon - j\varepsilon', \quad (4.23)$$

где действительная часть ε представляет собой относительную диэлектрическую проницаемость, а мнимая часть $\varepsilon' = \varepsilon \cdot tg\delta$ – коэффициент диэлектрических потерь.

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

$$E_{пр} = U_{пр} / d, \text{ В/м}, \quad (4.24)$$

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

Электрическая прочность не является фундаментальным параметром материала. Различают следующие механизмы пробоя диэлектриков: электрический, электротепловой, электрохимический, поверхностный, ионизационный.

В режиме, близком к электрическому пробое, зависимость удельной проводимости от напряженности поля описывается эмпирической формулой

Пуля

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta_1 E), \quad (4.25)$$

а в некоторых случаях формулой Френкеля

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\beta_2 \sqrt{E}), \quad (4.26)$$

где γ_0 – удельная проводимость в области независимости γ от E , β_1 , β_2 – коэффициенты, характеризующие материал.

Примеры решения задач

Задача 1. Нормально вектору напряженности однородного электрического поля $E_0 = 100 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ расположена пластина изотропного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$. Определить: а) напряженность поля E и электрическое смещение (электрическую индукцию) D внутри пластины; б) поляризованность диэлектрика P и поверхностную плотность связанных зарядов σ .

Решение

а) Среднее макроскопическое электрическое поле E в диэлектрике в ε раз меньше внешнего: $E = 100/2 = 50 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$. Для большинства диэлектриков поляризованность пропорциональна напряженности поля:

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

В изотропных диэлектриках векторы напряженности электрического поля и поляризованности совпадают по направлению, а электрическое смещение

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

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

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

Задача 2. Между плоскими электродами площадью $S = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ размещены соединенные последовательно две пластины из различных диэлектрических материалов. Один из них имеет: диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_1 = 2$; удельную проводимость $\gamma_1 = 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; толщину h_1

$= 1 \text{ см}$; другой имеет: $\varepsilon_2 = 3$; $\gamma_2 = 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; $h_2 = 2 \text{ см}$. В момент времени t

$= 0$ к электродам подключено постоянное напряжение $U = 5 \text{ кВ}$. Определить напряженность электрического поля в обоих диэлектриках в моменты времени $t = 0$ и $t \rightarrow \infty$. Найти напряженность электрического поля в этих диэлектриках при $t \rightarrow \infty$, если к электродам приложено переменное напряжение $U = 20 \text{ В}$ частотой $f = 50 \text{ МГц}$.

Решение

При постоянном напряжении в момент времени $t = 0$ напряженность поля в обоих диэлектриках равна нулю, так как процесс поляризации в них еще не произошел.

При $t \rightarrow \infty$ распределение постоянного напряжения между пластинами диэлектриков определяется их активными сопротивлениями R_1 и R_2 : $U_1/U_2 = R_1/R_2$, где

$$R_1 = h_1 |(\gamma_1 S)| = 10^{-2} | (10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-4}) | = 5 \cdot 10^7 \text{ Ом},$$

$$R_2 = h_2 |(\gamma_2 S)| = 2 \cdot 10^{-2} | (10^{-10} \cdot 2 \cdot 10^{-4}) | = 10^{12} \text{ Ом}.$$

Отсюда следует, что $U_1 \ll U_2$. Так как $U = U_1 + U_2$, то напряженность электрического поля в диэлектриках:

$$E_1 = U_1 / h_1 = 100 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1},$$

$$E_2 = U_2 / h_2 = 9,9995 \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}.$$

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

$$x_{C1} = h_1 | (2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_1 S) |,$$

$$x_{C2} = h_2 | (2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_2 S) |,$$

$$x_{C1} = 10^{-2} | (6,28 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-4}) | \approx 9 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

$$x_{C2} = 2 \cdot 10^{-2} | (6,28 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}) | \approx 1,2 \cdot 10^4 \text{ Ом}.$$

Так как $x_{C1} \ll R_1$ и $x_{C2} \ll R_2$, то $U_1/U_2 = x_{C1}/x_{C2}$.

Отсюда $E_1 = 857 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$, $E_2 = 571 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$.

Задача 3. При комнатной температуре тангенс угла диэлектрических потерь ультрафарфора $\text{tg} \delta_0 = 5 \cdot 10^{-4}$, а при повышении температуры до 100°C он возрастает в два раза. Чему равен $\text{tg} \delta$ этого материала при температуре 200°C ? Во сколько раз увеличится активная мощность, выделяющаяся в высокочастотном проходном изоляторе из этого материала, при изменении температуры от 20 до 200°C ? Изменением диэлектрической проницаемости керамики пренебречь.

Решение

Потери в ультрафарфоре обусловлены сквозной электропроводностью, поэтому тангенс угла диэлектрических потерь увеличивается с температурой по экспоненциальному закону: $\text{tg} \delta_T = \text{tg} \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]$, где $\text{tg} \delta_0$ – значение при

$T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, α – температурный коэффициент $\text{tg}\delta$, который может быть найден из выражения

$$\alpha = \frac{\ln \operatorname{tg} \delta_{100} - \ln \operatorname{tg} \delta_0}{100 - 20} = 8,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Тогда $\operatorname{tg} \delta_{200} = 2,38 \cdot 10^{-3}$.

Выделяющаяся в изоляторе активная мощность P_a растет с температурой пропорционально $\operatorname{tg} \delta$. Поэтому

$$\frac{P}{P_{a0}} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta_0} = \frac{2,38 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}} = 4,76.$$

Задача 4. Предполагая отсутствие рассеяния теплоты в окружающее пространство, определить, на сколько увеличится температура полиэтиленового изолятора толщиной 1 см после нахождения его в течение 30 с в переменном однородном электрическом поле частотой 1 МГц при напряжении 10 кВ. Принять удельную теплоемкость изолятора $c = 2,25 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); плотность $d = 940$ кг·м⁻³; $\varepsilon = 2,4$; $\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$. Провести аналогичный расчет для изолятора из электротехнического фарфора той же толщины, если его теплоемкость $c = 1,1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); плотность $d = 2500$ кг·м⁻³; $\varepsilon = 7$; $\operatorname{tg} \delta = 10^{-2}$.

Решение

Мощность, рассеиваемая в диэлектрике толщиной h , расположенном между электродами площадью S ,

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = (U^2 2\pi f \varepsilon \varepsilon_0 S \operatorname{tg} \delta) | h.$$

Количество теплоты, которое выделяется в объеме изолятора за время t ,

$$Q = P_a t.$$

Зная габариты изолятора и удельную теплоемкость материала, можно определить повышение температуры

$$\Delta T = \frac{Q}{cdV} = \frac{P_a t}{cdSh} = \frac{U^2 2\pi f \varepsilon \varepsilon_0 t \operatorname{tg} \delta}{cdh^2}.$$

1. Для полиэтилена

$$\Delta T = \frac{(10^4)^2 \cdot 2\pi \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,4 \cdot 30 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{2,25 \cdot 10^3 \cdot 940 \cdot (10^{-2})^2} = 0,76 \text{ K}.$$

2. Для электротехнического фарфора $\Delta T = 42,4 \text{ K}$.

Для снижения тепловыделения, обусловленного диэлектрическими потерями, необходимо, чтобы не только $\operatorname{tg} \delta$, но и ε были малыми. Отсюда вытекает важное требование малого коэффициента диэлектрических потерь $\varepsilon'' = \varepsilon \operatorname{tg} \delta$ высокочастотных электроизоляционных материалов.

Задача 5. Спонтанная поляризованность монокристаллов титаната бария при комнатной температуре равна $0,25 \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-2}$. Предполагая, что причиной возникновения спонтанной поляризации является только смещение иона титана из центра элементарной кубической ячейки, определить это смещение. Период идентичности a решетки принять равным $0,4 \text{ нм}$.

Решение

Поляризованность есть электрический момент единицы объема:

$$P = q \Delta l / V_0,$$

где q – заряд иона; Δl – смещение; V_0 – объем элементарной ячейки. Заряд

иона титана Ti^{4+} $q = 4e$, $V_0 = a^3$. Тогда $\Delta l = PV / q = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 0,025 \text{ нм}$.

Задача 6. 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 $a = 0,28 \text{ нм}$.

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

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

Задача 7. При тех же условиях, что и в предыдущей задаче, определить напряженность электрического поля, действующего на монокристалл каменной соли, если её диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 5,65$. Вычислить коэффициент упругой связи ионов $\kappa_{\text{упр}}$ в кристалле, полагая, что напряженность внутреннего поля равна напряженности внешнего поля.

Решение

Поляризованность диэлектрика пропорциональна напряженности электрического поля. Отсюда

$$E = \frac{P}{\epsilon_0 (\epsilon - 1)} = \frac{0,02}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (5,65 - 1)} = 4,85 \cdot 10^8 \text{ В} / \text{м}.$$

Так как смещению ионов под действием поля препятствуют силы

упругой связи, то в состоянии равновесия, $q \cdot E = k_{\text{упр}} \Delta x$. Отсюда

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

Задача 8. 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 σ_d . Диэлектрическую проницаемость материала принять равной шести.

Решение

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

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

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

Задача 9. Диэлектрическая проницаемость воздуха при 300 К и нормальном атмосферном давлении $\varepsilon = 1,00058$. На сколько изменится ее значение, если давление воздуха увеличить в 20 раз?

Решение

Зависимость диэлектрической проницаемости газа ε от давления p : $d\varepsilon / dp = (\varepsilon - 1)/p$. Отсюда

$$\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon - 1} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p}; \quad \ln \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_1 - 1} = \ln \frac{p_2}{p_1};$$

$$\varepsilon_2 - 1 = (\varepsilon_1 - 1) p_2 / p_1 = (1,00058 - 1) \cdot 20 = 0,0116.$$

Таким образом, при увеличении давления в 20 раз диэлектрическая проницаемость воздуха возрастет до значения $\varepsilon_2 = 1,0116$.

Задача 10. Композиционный керамический материал изготовлен на основе двух диэлектриков с диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_1 = 40$ и $\varepsilon_2 = 80$. Предполагая хаотическое распределение компонентов, определить состав керамики, если

$$\alpha_{\varepsilon_1} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}; \quad \alpha_{\varepsilon_2} = -1,5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}.$$

Чему равна диэлектрическая проницаемость композиционного диэлектрика?

Решение

Для расчета ε используем формулу Лихтенеккера в виде $\ln \varepsilon = \theta_1 \ln \alpha_{\varepsilon_1} + \theta_2 \ln \alpha_{\varepsilon_2}$, где θ_1 и θ_2 – объемные концентрации компонентов.

Температурный коэффициент ε композиционного диэлектрика можно вычислить, продифференцировав формулу Лихтенеккера: $\alpha_{\varepsilon} = \theta_1 \alpha_{\varepsilon_1} + \theta_2 \alpha_{\varepsilon_2}$.

Решая систему уравнений

$$\theta_1 \alpha_{\varepsilon_1} + \theta_2 \alpha_{\varepsilon_2} = 0;$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 1$$

для термокомпенсированного материала, находим

$$\theta_1 = \varepsilon_{\varepsilon_2} \left| (\alpha_{\varepsilon_2} - \alpha_{\varepsilon_1}) \right| = 0,882; \theta_2 = 0,112; \varepsilon = 43,4.$$

Задача 11. Почему диэлектрическая проницаемость непропитанной конденсаторной бумаги $\varepsilon_{\text{нб}}$ возрастает при увлажнении? Рассчитайте, на сколько максимально может увеличиться диэлектрическая проницаемость бумаги с плотностью $d_6 = 1000 \text{ кг/м}^3$ после длительного пребывания в среде с относительной влажностью 98 %. При расчете считать, что для целлюлозы $\varepsilon_{\text{ц}} = 6,5$; плотность $d_{\text{ц}} = 1500 \text{ кг/м}^3$.

Решение

Конденсаторная бумага состоит из волокон твердого органического вещества – целлюлозы и находящегося между волокнами воздуха (полагая $\varepsilon_{\text{в}} = 1$; $d_{\text{в}} = 0$). Значение $\varepsilon_{\text{нб}}$ может быть определено по формуле Лихтенеккера для сложного диэлектрика в предположении, что компоненты (целлюлоза и воздух) электрически включены последовательно:

$$1/\varepsilon_{\text{нб}} = \theta_{\text{ц}}/\varepsilon_{\text{ц}} + \theta_{\text{в}}/\varepsilon_{\text{в}}, \text{ где } \theta_{\text{ц}} \text{ и } \theta_{\text{в}} - \text{объемные концентрации целлюлозы и}$$

$$\text{воздуха соответственно. Тогда } \varepsilon_{\text{нб}} = \varepsilon_{\text{ц}} \varepsilon_{\text{в}} \left| \left(\theta_{\text{ц}} \varepsilon_{\text{в}} + \varepsilon_{\text{ц}} \theta_{\text{в}} \right) \right|.$$

Для сухой бумаги $\theta_{\text{ц}} + \theta_{\text{в}} = 1$, поэтому $\theta_{\text{ц}} d_{\text{ц}} + \theta_{\text{в}} d_{\text{в}} = d_6$, где $\theta_{\text{ц}} = d_6/d_{\text{ц}}$, и

$$\varepsilon_{\text{нб}} = \frac{\varepsilon_{\text{ц}} \varepsilon_{\text{в}}}{\varepsilon_{\text{ц}} - (d_6/d_{\text{ц}})(\varepsilon_{\text{ц}} - \varepsilon_{\text{в}})} = \frac{6,5 \cdot 1}{6,5 - (1000/1500)(6,5 - 1)} \approx 2,3.$$

Поскольку бумага гигроскопична, после длительного пребывания во влажной среде воздух в ней может быть замещен водой. Диэлектрическая проницаемость увлажненной бумаги

$$\varepsilon_{\text{влб}} = \frac{\varepsilon_{\text{ц}} \varepsilon_{\text{вд}}}{\varepsilon_{\text{ц}} - (d_6/d_{\text{ц}})(\varepsilon_{\text{ц}} - \varepsilon_{\text{вд}})}$$

где $\epsilon_{\text{вд}} = 81$ – диэлектрическая проницаемость воды. После подстановки числовых значений получаем $\epsilon_{\text{вд б}} = 10,6$, т. е. максимально диэлектрическая

проницаемость непропитанной бумаги может увеличиться во влажной среде в 4,6 раза.

Следует отметить, что приведенный расчет носит оценочный характер, так как при большом отличии значений ϵ компонентов сложного диэлектрика пользоваться уравнением Лихтенеккера не рекомендуется, а в нашем случае $\epsilon_{\text{вд}} \gg \epsilon_{\text{ц}}$.

Задача 12. Две противоположные грани куба с ребром $a = 10$ мм из диэлектрического материала с удельным объемным сопротивлением $\rho_v = 10^{10}$ Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением $\rho_s = 10^{11}$ Ом покрыты металлическими электродами (рис. 25, а). 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 (рис. 25, а). Поэтому сопротивление между электродами определяется параллельным соединением объемного сопротивления и поверхностных сопротивлений четырех граней, как показано на эквивалентной схеме куба с электродами (рис. 25, б). Тогда

$$R_v = \rho_v \frac{a}{a^2} = \rho_v \frac{1}{a} = 10^{10} \frac{1}{10 \cdot 10^{-3}} = 10^{12} \text{ Ом};$$

$$R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4} = \rho_s a = 10^{11} \cdot 10 = 10^{12} \text{ Ом}.$$

$$R_{\text{из}} = R_v \parallel R_{s1} \parallel R_{s2} \parallel R_{s3} \parallel R_{s4} = \frac{1}{\frac{1}{R_v} + \frac{4}{R_s}} = \frac{1}{\frac{1}{10^{12}} + \frac{4}{10^{11}}} = 2,44 \cdot 10^{10} \text{ Ом}.$$

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

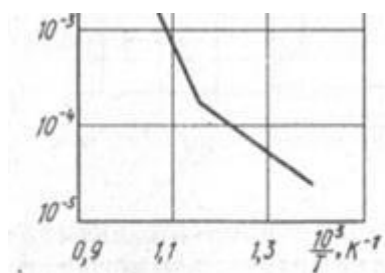


Рис. 24

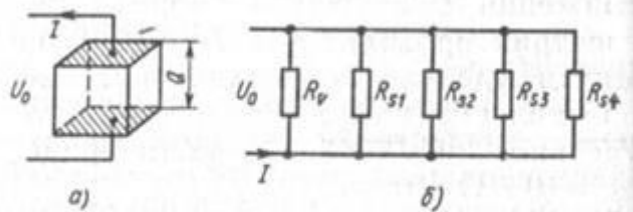


Рис. 25

Задача 13. Площадь каждого электрода ионизационной камеры $S = 100 \text{ см}^2$, расстояние между электродами $l = 6,2 \text{ см}$. Какой ток установится между электродами при напряжении $U = 20 \text{ В}$, если известно, что ионизатор ежесекундно образует в 1 см^3 газа $N = 10^9$ одновалентных ионов каждого знака? Подвижность положительных и отрицательных ионов $\mu_+ = \mu_- = 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, коэффициент рекомбинации $\nu = 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$. Какую долю тока

насыщения составляет найденный ток?

Решение

В слабых полях, когда выполняется закон Ома, плотность тока в газе

$$j = gn(\mu_+ + \mu_-)E = qn(\mu_+ + \mu_-)Ul,$$
$$\text{где } n = \sqrt{Nv^{-1}} = \sqrt{10^9 \cdot 10^6 \cdot 10^{12}} = 3,16 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3},$$

что примерно соответствует равновесной концентрации пар ионов.

Тогда ток между электродами

$$I = jS = 3,26 \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 10^{-4} = 3,26 \cdot 10^{-9} \text{ А.}$$

Плотность тока насыщения в более сильных полях $j_n = qNl = 9,92 \cdot 10^{-6} \text{ А м}^2$. При этом ток насыщения $I_n = j_n S = 9,92 \cdot 10^{-8} \text{ А}$, $I / I_n = 0,033$.

Задача 14. При изменении температуры от 60 до 127 °С удельное сопротивление радиофарфора уменьшается от $\rho_1 = 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ до $\rho_2 = 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ , радиофарфора, считая его постоянным в рассматриваемом диапазоне температур. При этом же допущении найти удельное сопротивление материала при комнатной температуре.

Решение

Постоянство температурного коэффициента удельного сопротивления предполагает экспоненциальную зависимость $\rho(T)$: $\rho = Ae^{\alpha_\rho T}$.

Отсюда следует, что

$$\alpha_\rho = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{127 - 60} \ln \frac{10^{11}}{10^{13}} = -0,0687 \text{ К}^{-1};$$
$$\rho_2 = \rho_1 \left| e^{\alpha_\rho \Delta T} \right| = 10^{13} \left| e^{-0,0687(60-20)} \right| = 1,56 \cdot 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см.}$$

Задача 15. При комнатной температуре тангенс угла диэлектрических потерь ультрафарфора $\text{tg } \delta_0 = 5 \cdot 10^{-4}$, а при повышении температуры до 100 °С он возрастает в два раза. Чему равен $\text{tg } \delta$ этого материала при температуре 200 °С? Во сколько раз увеличится активная мощность, выделяющаяся в высокочастотном проходном изоляторе из этого материала, при изменении температуры от 20 до 200 °С? Изменением диэлектрической проницаемости керамики пренебречь.

Решение

Потери в ультрафарфоре обусловлены сквозной электропроводностью, поэтому тангенс угла диэлектрических потерь увеличивается с температурой по экспоненциальному закону:

$$\operatorname{tg} \delta_T = \operatorname{tg} \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)], \text{ где } \operatorname{tg} \delta_0 - \text{значение при } T_0 = 20^\circ \text{C}; \alpha -$$

температурный коэффициент $\operatorname{tg} \delta$, который может быть найден из выражения

$$\alpha = \frac{\ln \operatorname{tg} \delta_{100} - \ln \operatorname{tg} \delta_0}{100 - 20} = 8,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Тогда $\operatorname{tg} \delta_{200} = 2,38 \cdot 10^{-3}$.

Выделяющаяся в изоляторе активная мощность P_a растет с температурой пропорционально $\operatorname{tg} \delta$. Поэтому

$$\frac{P_{a200}}{P_{a0}} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{200}}{\operatorname{tg} \delta_0} = \frac{2,38 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}} = 4,76.$$

Задача 16. При тех же условиях, что и в предыдущей задаче, определить удельные потери в диэлектрике, если его диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 150$, электрическая прочность $E_{\text{пр}} = 10 \text{ МВ/м}$ и запас по электрической прочности $K = 10$.

Решение

Удельные потери рассчитываются на объем рабочего диэлектрика конденсатора: $p = P_a / (Sh)$, где S и h – площадь обкладок и толщина диэлектрика соответственно. Толщину диэлектрика находим из условия обеспечения электрической прочности:

$$h = U \sqrt{\frac{2K}{E_{\text{пр}}}} = 100 \sqrt{\frac{2}{10}} \cdot 10^6 = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Площадь обкладок может быть определена из выражения для емкости плоского конденсатора

$$S = \frac{Ch}{\epsilon_0 \epsilon} = \frac{100 \cdot 10^{-12} \cdot 1,42 \cdot 10^{-4}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 150} = 1,07 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

$$\text{Отсюда } p = 10^{-3} / (1,07 \cdot 10^{-5} \cdot 1,42 \cdot 10^{-4}) = 6,58 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3.$$

Задача 17. Между латунными электродами площадью S помещена керамическая пластина толщиной $h = 5 \text{ мм}$, имеющая диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 7$, тангенс угла диэлектрических потерь при комнатной температуре $\operatorname{tg} \delta_0 = 2 \cdot 10^{-4}$, температурный коэффициент $\alpha_{\operatorname{tg} \delta} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Определить допустимое напряжение U между электродами на рабочей частоте $f = 50 \text{ МГц}$, если температура, до которой нагревается пластина в электрическом поле, не превышает $T = 373 \text{ К}$. При расчете полагать,

что суммарный коэффициент теплопередачи от диэлектрика во

внешнюю среду $\sigma = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а температура окружающей среды $T_0 = 293 \text{ К}$.

Решение

В керамических материалах, имеющих $\varepsilon < 10$, преобладающими являются потери сквозной электропроводности. Поэтому при экспоненциальной зависимости $\text{tg } \delta$ от температуры после подстановки постоянных величин в выражение для мощности, выделяющейся в пластине, получим

$$P_a = U^2 f \varepsilon S \exp[\alpha_{\text{tg}\delta} (T - T_0)] \text{tg}\delta_0 \left(1,8 \cdot 10^{10} h\right).$$

Мощность, отводимая от диэлектрика, $P_T = 2\sigma S (T - T_0)$. Из равенства $P_a = P_T$ находим

$$U = \sqrt{\frac{3,6 \cdot 10^{10} \sigma h (T - T_0)}{f \varepsilon \text{tg}\delta_0 \exp[\alpha_{\text{tg}\delta} (T - T_0)]}} = \sqrt{\frac{3,6 \cdot 10^{10} \cdot 30 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 80}{50 \cdot 10^6 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \exp(5 \cdot 10^{-3} \cdot 80)}} = 2033 \text{ В}.$$

Задача 18. На рис. 27,а показана электрическая схема колебательного контура измерителя добротности, где C_x характеризует емкость исследуемого конденсатора, r_x – эквивалентное сопротивление потерь в диэлектрике. В процессе измерений напряжение U_1 поддерживается неизменным. С помощью конденсатора C_0 контур настраивают в резонанс. Постройте резонансные характеристики колебательного контура при отключенном исследуемом конденсаторе. Как влияют потери в диэлектрике на добротность контура и ширину резонансной кривой $U_2 (C_0)$? Докажите, что тангенс угла потерь в диэлектрике можно определить по формуле $\text{tg}\delta = \frac{C_1}{C_x} \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} \right)$, где

C_1 – резонансная емкость контура; Q_1 и Q_2 – добротность контура при включенном и отключенном конденсаторах соответственно.

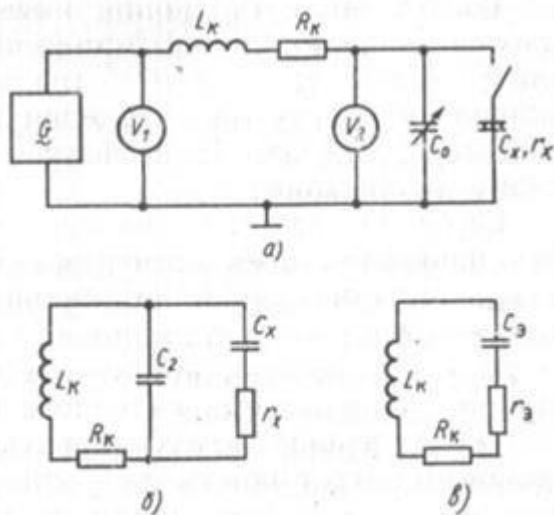


Рис. 27

Решение

При резонансе в контуре с отключенным конденсатором $\omega L = 1 / \omega C_1$. Отсюда $Q_1 = 1 / (\omega C_1 R_k)$, где R_k – активное сопротивление контура.

При подключении исследуемого конденсатора для настройки контура в резонанс необходимо изменить емкость переменного конденсатора C_2 , причем $C_1 = C_2 + C_x$, $\text{tg } \delta = \omega r_x C_x$ (рис. 27, б). Потери в исследуемом конденсаторе определяются выражением $P = U^2 \omega C \text{tg } \delta = U^2 \omega^2 r C^2$.



Рис. 28

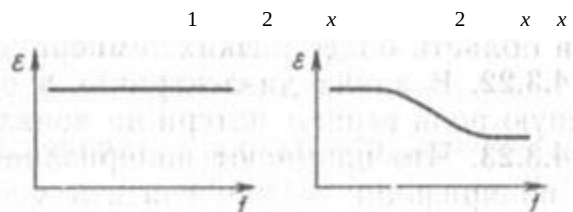


Рис. 29

Измерительную схему на рис. 27, б можно привести к последовательной эквивалентной схеме (рис. 27, в), где $C_3 = C_1$, мощность рассеяния $P = U^2 \omega^2 r C^2 = P$. Отсюда эквивалентное последовательное

сопротивление $r_3 = r_x C_x^2 / C_1^2$.

При резонансе контура с подключенным конденсатором

$$1/Q_2 = \omega (r_3 + R_k) C_1 = \omega r_3 C_1 + 1/Q_1$$

или

$$\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} = \omega r C = \omega r C^2 \frac{C}{C} = \text{tg } \delta \cdot C \frac{C}{C}.$$

Окончательно имеем

$$\text{tg } \delta = \frac{C_1}{C} \left(\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} \right).$$

$$x \left(\begin{array}{c} 2 \\ 1 \end{array} \right)$$

Задача 19. Какие дополнительные диэлектрические потери возникают в двухслойном диэлектрике, слои которого параллельны плоскостям электродов (рис. 28)? При отношении удельных проводимостей слоев $\gamma_1 / \gamma_2 = 3$ каким должно быть отношение диэлектрических проницаемостей слоев, чтобы дополнительные диэлектрические потери не возникали?

Решение

В слоистых диэлектриках дополнительные диэлектрические потери возникают из-за миграционной поляризации, механизм которой заключается в накоплении свободных зарядов на границе раздела слоев с различной электропроводностью. На определенной частоте эти заряды не успевают рассасываться в течение полупериода изменения приложенного напряжения, поляризация становится запаздывающей и сопровождается потерями. Однако если постоянные времени слоев $\tau = R_{\text{из}} C$ одинаковы, то на границе раздела заряды не накапливаются и потери, обусловленные миграционной поляризацией, не возникают. При этом $\varepsilon_1 / \gamma_1 = \varepsilon_2 / \gamma_2$, т. е. $\varepsilon_1 = 3 \varepsilon_2$.

Задача 20. Как и почему изменится пробивное напряжение воздуха при нормальном атмосферном давлении, если температуру повысить от 20 до 100 °С?

Решение

Из эксперимента известно, что пробивное напряжение воздуха вблизи нормального атмосферного давления ($p_0 = 0,1$ МПа) изменяется прямо пропорционально изменению относительной плотности газа δ (так как изменяется длина свободного пробега электронов): $U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} \delta$, где $U_{\text{пр}0}$ – пробивное напряжение в нормальных условиях ($p = 0,1$ МПа; $T_0 = 293$ К). С другой стороны, из уравнения Менделеева — Клапейрона следует, что при неизменном давлении плотность газа d изменяется обратно пропорционально температуре: $pV = (m / M)RT$, откуда $\frac{m}{V} = d = \frac{pM}{RT}$, где m – масса; M – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная.

Изменение относительной плотности газа $\delta = d_1 / d_0 = T_0 / T_1 = 293 / 373 = 0,785$, т. е. если повысить температуру от 293 до 373 К, то при нормальном атмосферном давлении пробивное напряжение воздуха уменьшится в 1,27 раза.

Задача 21. а) Предполагая отсутствие рассеяния теплоты в окружающее пространство, определить, на сколько увеличится температура полиэтиленового изолятора толщиной 1 см после нахождения его в течение 30 с в переменном однородном электрическом поле частотой 1 МГц при

напряжении 10 кВ. Принять удельную теплоемкость изолятора $c = 2,25 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); плотность $d = 940$ кг/м³; $\varepsilon = 2,4$; $\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$.

б) Провести аналогичный расчет для изолятора из электротехнического фарфора той же толщины, если его теплоемкость $c = 1,1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), плотность $d = 2500$ кг/м³, $\varepsilon = 7$, $\operatorname{tg} \delta = 10^{-2}$.

Решение

Мощность, рассеиваемая в диэлектрике толщиной h , расположенном между электродами площадью S , $P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = (U^2 2\pi f \varepsilon \varepsilon_0 S \operatorname{tg} \delta) / h$. Количество теплоты, которая выделяется в объеме изолятора за время t , $Q = P_a t$.

Зная габариты изолятора и удельную теплоемкость материала, можно определить повышение температуры

$$\Delta T = \frac{Q}{cdV} = \frac{P_a t}{cdSh} = \frac{U^2 2\pi f \varepsilon \varepsilon_0 t \operatorname{tg} \delta}{cdh^2}.$$

а) Для полиэтилена

$$\Delta T = \frac{(10^4)^2 \cdot 2\pi \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,4 \cdot 30 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{2,25 \cdot 10^3 \cdot 940 \cdot (10^{-2})^2} = 0,76 \text{ К}.$$

б) Для электротехнического фарфора $\Delta T = 42,4$ К.

Для снижения тепловыделения, обусловленного диэлектрическими потерями, необходимо, чтобы не только $\operatorname{tg} \delta$, но и ε были малыми. Отсюда вытекает важное требование малого коэффициента диэлектрических потерь $\varepsilon'' = \varepsilon \operatorname{tg} \delta$ высокочастотных электроизоляционных материалов.

Задача 22. Спонтанная поляризованность монокристаллов титаната бария при комнатной температуре равна 0,25 Кл/м². Предполагая, что причиной возникновения спонтанной поляризации является только смещение иона титана из центра элементарной кубической ячейки, определить это смещение. Период идентичности a решетки принять равным 0,4 нм.

Решение

Поляризованность есть электрический момент единицы объема: $P = q \Delta l / V_0$, где q – заряд иона; Δl – смещение; V_0 – объем элементарной ячейки. Заряд иона титана Ti^{4+} $q = 4e$; $V_0 = a^3$. Тогда $\Delta l = P V_0 / q = 2,5 \cdot 10^{-11}$ м = 0,025 нм.

Задача 23. Выведите выражение, позволяющее рассчитать тангенс угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрика по известной площади петли гистерезиса, полученной на экране осциллографа.

Решение

Активная мощность P_a , рассеянная в сегнетоэлектрике за один период T изменения напряженности электрического поля, пропорциональна площади петли гистерезиса S_n – зависимости мгновенного заряда сегнетоэлектрического конденсатора q от мгновенного напряжения на обкладках u :

$$P_a = \frac{1}{T} \oint u dq = K_u K_q S_n \int T;$$

где K_u и K_q – масштабные коэффициенты напряжения и заряда по осям x_m , y_m .

В то же время известное выражение для рассеиваемой в диэлектрике активной мощности: $P = V^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$, для нашего случая можно представить в

$$\text{виде } P_a = \frac{u_m q_m 2\pi}{2T} \operatorname{tg} \delta,$$

где $u_m = x_m K_u$, $q_m = y_m K_q$ – амплитуды напряжения и заряда, которым соответствуют максимальные отклонения по осям x_m и y_m . Отсюда окончательно получаем $\operatorname{tg} \delta = S_n (\pi x_m y_m)$.

Задача 24. Пластина электрета толщиной $h = 1$ мм, имеющая на поверхности связанные электрические заряды плотностью $\sigma = 10^{-5}$ Кл/м², помещена в закороченный плоский конденсатор, как показано на рис. 39. Определить напряженность электрического поля в воздушном зазоре E_l и внутри электрета E_i , если ширина зазора $l = 10^{-2}$ мм, а диэлектрическая проницаемость электрета $\varepsilon = 150$. Краевым эффектом пренебречь.

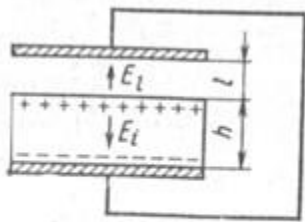


Рис. 39

Решение

Согласно теореме Остроградского-Гаусса имеем $\varepsilon_0 E + \varepsilon_0 \varepsilon E_i = \sigma$.

Разность потенциалов между верхним и нижним электродами равна нулю, поэтому $E_l l - E_i h = 0$. Из этих двух уравнений получаем:

$$E_l = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 (1 + \varepsilon l / h)} = \frac{10^{-5}}{8,85 \cdot 10^{-12} (1 + 150 \cdot 10^{-5} / 10^{-3})} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ В/м};$$

$$E = \frac{\sigma d}{\varepsilon_0 (1 + \varepsilon l/h) h} = 4,5 \cdot 10^5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-3} = 4,5 \cdot 10^3 \text{ В/м.}$$

Задача 25. В результате электризации плоского диэлектрика на нем получена поверхностная плотность связанных электрических зарядов $\sigma = 10^{-4}$ Кл/м². Как изменится значение σ , если электрет на некоторое время закоротить с помощью металлических электродов? Электрическая прочность воздуха $E_{\text{пр в}} = 3,2$ МВ/м.

Решение

Напряженность электрического поля E_l в воздушном зазоре между электретом и металлическим электродом определяется выражением, приведенным в решении задачи 20.

$$\text{При закорачивании электрета } (l \rightarrow 0) \\ E_l \rightarrow \sigma / \varepsilon_0 = 10^{-4} / (8,85 \cdot 10^{-12}) = 11,3 \cdot 10^6 \text{ В/м.}$$

Однако достижению такой напряженности электрического поля препятствует пробой воздушного зазора, который произойдет при $E_l = E_{\text{пр в}}$. Свободные заряды, образующиеся при пробое воздуха, оседают на поверхность диэлектрика и уменьшают поверхностную плотность заряда σ . Отсюда следует, что после снятия закорачивающих электродов поверхностная плотность заряда электрета

$$\sigma_1 = E_{\text{пр в}} \cdot \varepsilon_0 = 3,2 \cdot 10^6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} = 2,83 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}^2.$$

Задача 26. На пластину X-среза пьезоэлектрического кварца толщиной $h = 1$ мм вдоль оси X воздействует механическое напряжение $\sigma_1 = 10^5$ Н/м². Определить разность потенциалов между противоположными плоскостями пластины, если в направлении оси X пьезомодуль продольного пьезоэффекта $d_{11} = 2,3 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. Диэлектрическую проницаемость кварца принять равной 4,6.

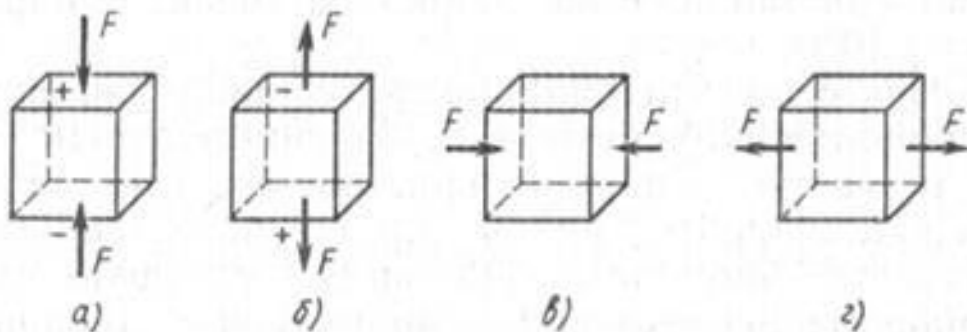


Рис. 40

Решение

В соответствии с уравнением прямого пьезоэффекта $P_1 = d_{11} \sigma_1$. Для плоского однородного диэлектрика при равномерной механической нагрузке заряд на поверхности $Q = PS$. Разность потенциалов между плоскими гранями

$$U = Q |C = \frac{d \sigma S}{\epsilon_0 \epsilon_1 h} = \frac{d \sigma h}{\epsilon_0 \epsilon_1} = \frac{2,3 \cdot 10^{-12} \cdot 10^5 \cdot 10^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4,5} = 5,77 \text{ В.}$$

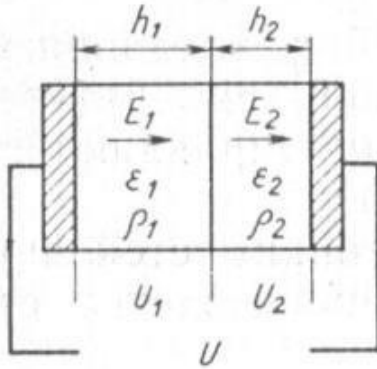


Рис. 41

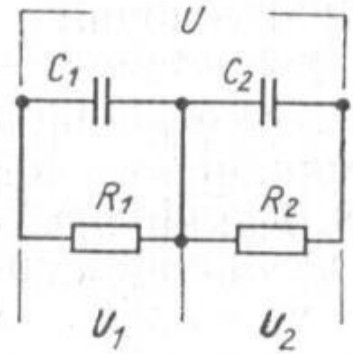


Рис. 42

Задача 27. Определить напряженности электрического поля E_1 и E_2 в каждом слое конденсатора, изображенного на рис. 41. В конденсаторе использованы пленка политетрафторэтилена и пропитанная конденсаторная бумага одинаковой толщины ($h_1 = h_2 = 20$ мкм). Известны диэлектрические проницаемости ϵ и удельные объемные сопротивления ρ этих материалов: $\epsilon_1 = 2$; $\epsilon_2 = 4$; $\rho_1 = 10^{15}$ Ом·м; $\rho_2 = 10^8$ Ом·м. Какая доля внешнего напряжения падает на каждом слое? Расчет провести для постоянного напряжения 100 В и переменного напряжения амплитудой 100 В.

Решение

На рис. 42 приведена эквивалентная схема двухслойного конденсатора, изображенного на рис. 41, где C_1 и C_2 , R_1 , R_2 – соответственно емкости и сопротивления изоляции слоев. Очевидно, что $U = U_1 + U_2$.

На переменном напряжении $U_1 / U_2 = C_2 / C_1 = \epsilon_2 h_1 / h_2 \epsilon_2$. После преобразований имеем

$$U = \frac{U \epsilon_2 h_1}{\epsilon_1 h_1 + \epsilon_2 h_2}; \quad U = \frac{U \epsilon_1 h_2}{\epsilon_1 h_1 + \epsilon_2 h_2};$$

$$\text{тогда } E_1 = \frac{U_1}{h_1} = \frac{U \epsilon_2}{\epsilon_1 h_1 + \epsilon_2 h_2} = \frac{100 \cdot 4}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 3,33 \text{ МВ/м;}$$

$$E_2 = \frac{U_2}{h_2} = \frac{U \epsilon_1}{\epsilon_1 h_1 + \epsilon_2 h_2} = 1,67 \text{ МВ/м.}$$

На постоянном напряжении

$$U = \frac{U_1 \rho_1 h_1}{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2}; E = \frac{U}{h} = \frac{U_1 \rho_1}{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2} = \frac{100 \cdot 10^{15} \cdot 2}{10^{-15} \cdot 20 \cdot 10^{-6} + 10^8 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 5 \text{ МВ м};$$

$$E_2 = \frac{U_2}{h_2} = \frac{U_1 \rho_1}{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2} = 0,5 \text{ В м}.$$

На переменном напряжении бумага в таком конденсаторе электрически нагружена более слабо, а на постоянном напряжении она не нагружена вообще.

Задача 28. Определить активную мощность, выделяющуюся в медных обкладках плоского конденсатора емкостью $C = 1000$ пФ, при подключении его к источнику переменного напряжения 220 В частотой 50 Гц. Ширина каждой обкладки $b = 10$ мм, длина $L = 15$ мм, толщина $\delta = 50$ мкм. Выводы конденсатора находятся на противоположных узких сторонах обкладок. При расчете полагать, что плотность тока в месте подключения вывода равномерна по всей ширине обкладки. Как будет меняться мощность, рассеиваемая в обкладках, при увеличении частоты приложенного напряжения?

Решение

На переменном напряжении U частотой f при включении конденсатора по его выводам протекает ток, определяемый емкостным сопротивлением конденсатора:

$$I = 2\pi fUC = 2\pi \cdot 50 \cdot 220 \cdot 1000 \cdot 10^{-12} = 6,9 \cdot 10^{-5} \text{ А}.$$

Этот ток, обусловленный процессами переполяризации в рабочем диэлектрике конденсатора, будет меняться вдоль обкладки, уменьшаясь по линейному закону до нуля на стороне, противоположной расположению вывода (рис. 45,а). На рис. 45,б сплошной линией показано распределение тока вдоль верхней обкладки конденсатора, штриховой – вдоль нижней. Выделим малый участок обкладки длиной dx с координатой x (отсчет x ведется от точки, в которой ток равен нулю). При этом в пределах участка dx ток $I_x = Ix / L$; выделяющаяся на этом участке мощность $dP_x = I_x^2 dR_x$, где $dR_x = \rho_{Cu} dx / (b\delta)$ – сопротивление участка.

Потери в обеих обкладках конденсатора

$$P_{\text{об}} = 2 \int_0^L \frac{I^2 \rho_{\text{Cu}}}{L^2 b \delta} x^2 dx = \frac{2}{3} I^2 \rho_{\text{Cu}} \frac{L}{b \delta} = \frac{2 \cdot 0,017 \cdot 10^{-16} \cdot (6,9 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-6}} =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}$$

С увеличением частоты потери будут увеличиваться по квадратичному закону в связи с возрастанием емкостного тока. На высоких частотах следует учесть увеличение сопротивления обкладок за счет поверхностного эффекта.

Задача 29. Дана эквивалентная схема конденсатора (рис. 48), на которой: C – емкость конденсатора; R – сопротивление изоляции; r – сопротивление выводов и обкладок. Вывести выражение для расчета $\text{tg } \delta_k$ конденсатора, учитывающее потери в диэлектрике и металле. Постройте (качественно) частотную зависимость $\text{tg } \delta_k$. Как будет зависеть $\text{tg } \delta_k$ от температуры?. При каких видах поляризации рабочего диэлектрика конденсатора справедлива данная эквивалентная схема?

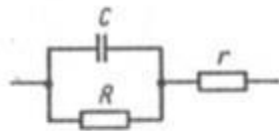


Рис. 48

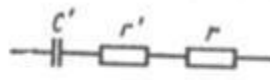


Рис. 49

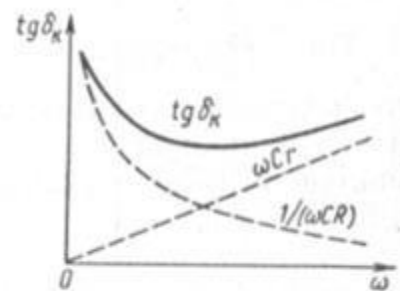


Рис. 50

Решение

Пользуясь формулами для перехода от параллельной эквивалентной схемы диэлектрика к последовательной, представим приведенную в условиях задачи эквивалентную схему в виде, изображенном на рис. 49, где

$$r' = R \left(1 + \omega^2 C^2 R^2 \right); \quad C' = \frac{C}{1 + \omega^2 C^2 R^2},$$

$\omega^2 C^2 R^2 = 1 / \text{tg}^2 \delta$, $\text{tg} \delta$ – тангенс угла потерь рабочего диэлектрика, если считать, что потери в нем обусловлены только сквозной электропроводностью. Полагая, что $\text{tg}^2 \delta \ll 1$; $\omega^2 C^2 R^2 \gg 1$, получаем

$$r' = 1 / \left(\omega^2 C^2 R^2 \right); \quad C' = C. \quad \text{Для последовательной схемы}$$

$$\text{tg} \delta_k = \omega C' (r + r') = \omega C r + 1 / (\omega C R) ..$$

Эта формула (и эквивалентная схема на рис. 48) справедлива, если в рабочем

диэлектрике конденсатора наблюдаются только мгновенные виды

поляризации (электронная и ионная), а сопротивление изоляции конденсатора велико.

Соответствующая полученному выражению частотная зависимость δ_k приведена на рис. 50. С увеличением температуры сопротивление изоляции уменьшается, а сопротивление металла обкладок несколько возрастает. Температурная зависимость емкости определяется механизмами поляризации диэлектрика.

Задача 30. Вывести формулу для расчета температурного коэффициента емкости α_C плоского конденсатора с учетом влияния температуры на геометрические размеры рабочего диэлектрика и обкладок. Как изменится эта формула, если в конденсаторе в качестве обкладок использовать металлическую пленку, нанесенную непосредственно на рабочий диэлектрик (такие конденсаторы называют металлизированными)?

Решение

По определению, $\alpha = \frac{1}{C} \frac{dC}{dT}$. Расчет проведем для плоского

конденсатора с обкладками в форме квадрата со стороной a ; рабочий диэлектрик конденсатора с диэлектрической проницаемостью ϵ имеет толщину h . Тогда $C = \epsilon \epsilon_0 \frac{a^2}{h}$. В этом выражении от температуры зависят

величины ϵ , a и h , поэтому

$$\frac{dC}{dT} = \epsilon_0 \left(\frac{a^2}{h} \frac{\partial \epsilon}{\partial T} + \epsilon \frac{\partial a^2}{\partial T} - \frac{a^2}{h^2} \frac{\partial h}{\partial T} \right)$$

Отсюда

$$\alpha_C = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial T} + 2 \frac{1}{a} \frac{\partial a}{\partial T} - \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial T},$$

или $\alpha_C = \alpha_\epsilon + 2\alpha_m - \alpha_d$, где α_ϵ – температурный коэффициент диэлектрической проницаемости; α_m и α_d – температурные коэффициенты линейного расширения металла обкладок и диэлектрика.

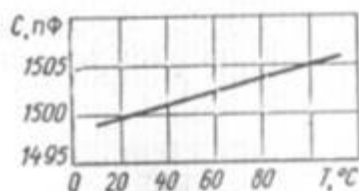


Рис. 51

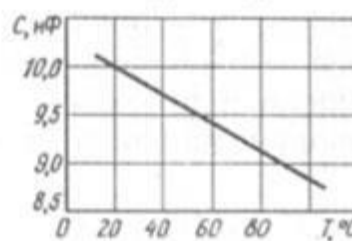


Рис. 52

Изменения с температурой размеров обкладок конденсатора, выполненных из тонкой металлической пленки, определяются изменениями геометрических размеров диэлектрика. Поэтому $\alpha_m = \alpha_\partial$ и $\alpha_C = \alpha_\varepsilon + \alpha_\partial$.

Задача 31. В комбинированном пленочном конденсаторе спиральной конструкции для получения высокой температурной стабильности емкости совместно используют диэлектрические пленки двух различных полимеров, имеющих разные знаки температурного коэффициента диэлектрической проницаемости α_ε . Конструкция конденсатора аналогична изображенной на рис. 46, а и содержит полистирольную (1) и поликарбонатную (2) пленки различной толщины. Пробивное напряжение $U_{пр}$ конденсатора должно быть не менее 1000 В. Определить, при какой толщине пленок температурный коэффициент емкости α_C близок нулю. Чему равен $\lg \delta$ такого конденсатора, если учитывать потерь только в диэлектрических пленках. Основные свойства использованных диэлектрических пленок указаны в приложении 3.

Решение

В комбинированном пленочном конденсаторе емкости двух диэлектрических лент включены параллельно, поэтому $C = C_1 + C_2$ (индекс 1 относится к полистирольной ленте, индекс 2 – к поликарбонатной). Тогда

$$\alpha_C = \frac{1}{C} \frac{dC}{dT} = \frac{1}{C} \left(\frac{dC_1}{dT} + \frac{dC_2}{dT} \right) = \frac{C_1}{C} \frac{dC_1}{dT} + \frac{C_2}{C} \frac{dC_2}{dT}.$$

Полагая, что температурные изменения емкостей лент обусловлены в основном температурными изменениями ε_1 и ε_2 (см. решение задачи 26), для конденсатора с температурной компенсацией

получаем $\alpha_C = \frac{C_1}{C} \alpha_{\varepsilon 1} + \frac{C_2}{C} \alpha_{\varepsilon 2} = 0$. С учетом знаков $\alpha_{\varepsilon 1}$ и $\alpha_{\varepsilon 2}$ это выражение

можно представить в виде $C_1 / C_2 = |\alpha_{\varepsilon 2}| / |\alpha_{\varepsilon 1}|$, откуда

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{|\alpha_{\varepsilon 1}|}{|\alpha_{\varepsilon 2}|} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5}{300 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 0,278.$$

Так как напряжения на обеих диэлектрических лентах одинаковы, напряженность электрического поля в ленте 1 более чем в три раза превышает напряженность поля в ленте 2, поэтому

$$h_1 = \frac{U_{пр}}{E_{пр1}} = \frac{10^3}{2 \cdot 10^8} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 5 \text{ мкм}; \quad h_2 = \frac{h_1}{0,278} = 18 \text{ мкм}.$$

При этом $E_2 = U_{пр} / h_2 < E_{пр2}$.

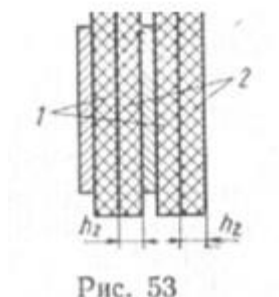
Используя параллельную эквивалентную схему диэлектрика с потерями, можно записать

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega CR} = \frac{R_1 + R_2}{\omega(C_1 + C_2)R_1R_2},$$

где R_1 и R_2 могут быть соответственно найдены из выражений: $\operatorname{tg} \delta_1 = 1/(\omega C_1 R_1)$; $\operatorname{tg} \delta_2 = 1/(\omega C_2 R_2)$. После преобразований получаем

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{C_1}{C_1 + C_2} \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C_2}{C_1 + C_2} \operatorname{tg} \delta_2 = \frac{\varepsilon_1 h_2 \operatorname{tg} \delta_1 + \varepsilon_2 h_1 \operatorname{tg} \delta_2}{\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1} = \\ &= \frac{2,5 \cdot 18 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-4} + 3 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 18 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 6,5 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Задача 32. Листовой изоляционный материал «миканит» состоит из девяти слоев бакелитового лака толщиной по 5 мкм, служащих диэлектрической связкой, и десяти слоев, содержащих частицы слюды толщиной по 25 мкм. Электрические свойства этих материалов указаны в приложении 4. Определить пробивное напряжение листа миканита, полагая, что для слюды $E_{\text{пр}1} = 75$ МВ/м, для лака $E_{\text{пр}2} = 50$ МВ/м: а) в постоянном электрическом поле; б) в переменном электрическом поле частотой 50 Гц. При расчете полагать, что параметры миканита не зависят от частоты.



Решение

При расчете пробивного напряжения миканита заменим его двухслойным диэлектриком (Рис. 41), суммарная толщина слоев слюды которого $h_1 = 25 \cdot 10 = 250$ мкм, а суммарная толщина слоев лака $h_2 = 5 \cdot 9 = 45$ мкм. Воспользовавшись выражениями, полученными при решении задачи 23, и с учетом того, что при воздействии постоянного поля напряженность поля в слюде во много раз больше, чем в лаке, получим

$$U_1/U_2 = \rho_1 h_1 / (\rho_2 h_2) = 10^{14} \cdot 250 \cdot 10^{-6} / (10^{11} \cdot 45 \cdot 10^{-6}) = 5,56 \cdot 10^3.$$

Поэтому пробой миканита произойдет при внешнем напряжении, соответствующем напряженности электрического поля в слюде:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр1}}(\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) \mid \rho_1 = \frac{75 \cdot 10^6 \cdot (10^{14} \cdot 250 \cdot 10^{-6} + 10^{11} \cdot 45 \cdot 10^{-6})}{10^{14}} = 18,75 \text{ кВ.}$$

На переменном напряжении $U_1 / U_2 = \varepsilon_2 h_1 / (\varepsilon_1 h_2) = 2,78$. Так как $h_2 \ll h_1$ и $E_{\text{пр2}} < E_{\text{пр1}}$, то прежде всего определим, при каком внешнем напряжении произойдет пробой лака:

$$U = \frac{E_{\text{пр2}}(\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1)}{\sqrt{2} \varepsilon_1} = \frac{50 \cdot 10^6 \cdot (8 \cdot 45 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 250 \cdot 10^{-6})}{\sqrt{2} \cdot 8} = 6,01 \text{ кВ.}$$

После пробоя лака все внешнее напряжение будет приложено к слюде, а ее пробой произойдет при увеличении внешнего напряжения до значения $U_{\text{пр}} = E_{\text{пр1}} h_1 \mid \sqrt{2} = 13,26 \text{ кВ.}$

Задача 33. При тех же условиях, что и в предыдущей задаче, рассчитать диэлектрическую проницаемость миканита (ε_m).

Решение

В соответствии с формулой Лихтенеккера, для последовательного включения компонентов $\varepsilon_m = (\theta_1 / \varepsilon_1 + \theta_2 / \varepsilon_2)^{-1}$, где

$$\theta_1 = h_1 \mid (h_2 + h_1) = 0,847; \theta_2 = h_2 \mid (h_2 + h_1) = 0,153.$$

Окончательно получаем $\varepsilon_m = 6,94$.

Задача 34. Конденсатор емкостью 200 пФ, изготовленный из пленки полистирола, заряжен до напряжения 100 В, а затем отключен от источника напряжения. Измерения, проведенные через 5 сут, показали, что на выводах конденсатора сохранилось напряжение 10 В. Пренебрегая поверхностной утечкой, определить сопротивление изоляции конденсатора. Вычислить удельное объемное сопротивление полистирола, если известно, что его диэлектрическая проницаемость равна 2,5.

Решение

Измерение напряжения на электродах конденсатора в процессе саморазряда описывается выражением $U_C(t) = U_C(0) \times \exp(-t / \tau_C)$, где $U_C(0)$ – напряжение, до которого был заряжен конденсатор; $\tau_C = R_{\text{из}} C$ – постоянная времени конденсатора (произведение сопротивления изоляции на емкость). После логарифмирования этого выражения получаем

$$R_{\text{из}} = \frac{t}{C \ln[U_C(0) / U_C(t)]} = \frac{5 \cdot 24 \cdot 3600}{200 \cdot 10^{-12} \ln(100 / 10)} = 9,4 \cdot 10^{14} \text{ Ом.}$$

Так как $R C = \varepsilon \varepsilon_r \rho$, то $\rho = R C (\varepsilon \varepsilon_r) = 8,4 \cdot 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$

из 0 из 0

Задача 35. Под каким углом должны пересекаться печатные проводники, расположенные на различных сторонах печатной платы, чтобы между ними была наименьшая емкостная связь? Оценить минимальные емкость и полное сопротивление между двумя проводниками шириной $a = 1$ мм при толщине платы $h = 0,5$ мм. Плата изготовлена из стеклотекстолита ($\varepsilon_{\text{п}} = 7$; $\rho_{\text{п}} = 10^{10}$ Ом · м). Расчет провести для частоты $f = 1$ МГц, краевым эффектом пренебречь.

Решение

Емкость $C_{\text{пп}}$ между пересекающимися печатными проводниками, расположенными на разных сторонах печатной платы, зависит от площади перекрытия проводников, которая будет наименьшей, если они пересекаются под углом 90° . В этом случае (без учета краевого эффекта)

$$C_{\text{пп}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{п}} a^2}{h} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 7 \cdot 10^{-6}}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,124 \text{ пФ.}$$

Полное сопротивление $Z_{\text{пп}}$ между этими проводниками определяется параллельно включенными емкостным сопротивлением $x_C = 1 / (2\pi f C_{\text{пп}})$ и активным

сопротивлением утечки $R_{\text{ут}} = \rho_{\text{п}} h a^2 = 10^{10} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{12}$ Ом.

Так $x_C \ll R_{\text{ут}}$, то $Z_{\text{пп}} \approx x_C = 1,28$ МОм.

Задача 36. Высокочастотный коаксиальный кабель длиной $l = 10$ см расположен на поверхности металлического корпуса блока (рис. 55), где цифрами обозначено: 1 – внутренний медный проводник диаметром $D_1 = 0,7$ мм; 2 – внутренняя изоляция из полиэтилена ($\varepsilon_2 = 2,3$; $\rho_2 = 10^{14}$ Ом · м); 3 – медная сетчатая оплетка с внутренним диаметром $D_2 = 5,7$ мм и толщиной $\delta = 0,3$ мм; 4 – наружный изолирующий слой толщиной $h = 1$ мм, изготовленный из поливинилхлоридного пластиката ($\varepsilon_4 = 6$; $\rho_4 = 10^{11}$ Ом · м). Рассчитать емкость и сопротивление изоляции: а) между внутренним проводником и оплеткой, если кабель разомкнут на концах; б) между оплеткой кабеля и корпусом блока, считая, что поверхность кабеля соприкасается с корпусом 5 на участке размером $a = 1$ мм.

Решение

а) В сечении кабеля (рис. 56) выделим в полиэтиленовой изоляции 2 участок бесконечно малой толщины dx , имеющий координату x , отсчитываемую от центра кабеля. Длину окружности с радиусами x и $x + dx$

можно полагать одинаковой. Тогда сопротивление участка изоляции толщиной dx (с координатой x) току утечки I_{yt} равно $dR_x = \rho_2 dx / (2\pi x l)$.

Сопротивление изоляции между внутренним проводником 1 и оплеткой 3 получим, проинтегрировав выражение для dR_x в пределах от $x = D_1 / 2$ до $x = D_2 / 2$:

$$R_{1-3} = \int_{D_1/2}^{D_2/2} \frac{\rho_2 dx}{2\pi x l} = \frac{\rho_2 l}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1} = \frac{10^{14} \ln(5,7/0,7)}{2\pi \cdot 0,1} = 3,34 \cdot 10^{14} \text{ Ом.}$$

Если кабель находится под напряжением, то вектор напряженности электрического поля в полиэтиленовой изоляции направлен по радиусу сечения кабеля и емкость участка толщиной dx равна $dC_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 2\pi x l}{dx}$.

Отсюда после интегрирования получаем выражение для расчета емкости между внутренним проводником и оплеткой:

$$C_{1-3} = \frac{2\pi \epsilon \epsilon_2 l}{\ln(D_2/D_1)} = \frac{2\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,3 \cdot 0,1}{\ln(5,7/0,7)} = 6,1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 6,1 \text{ пФ.}$$

б) Емкость между оплеткой кабеля 3 и корпусом блока 5 может быть определена из формулы для расчета емкости плоского конденсатора, если считать его рабочим диэлектриком наружную изоляцию кабеля 4:

$$C_{3-5} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_4 l a}{h} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 0,1 \cdot 10^{-13}}{10^{-3}} = 5,31 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 5,31 \text{ пФ.}$$

Сопротивление изоляции

$$R_{3-5} = \rho_4 \frac{h}{a l} = 10^{11} \cdot 10^{-3} / (0,1 \cdot 10^{-3}) = 10^{12} \text{ Ом.}$$

(см. рис. 55) изготавливают из полиэтилена? Что произойдет, если изготовить ее из пластифицированного поливинилхлорида?

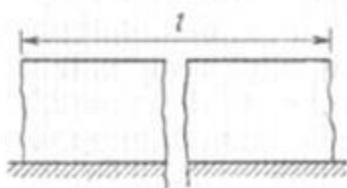


Рис. 55

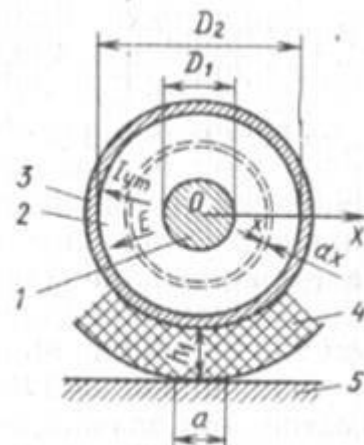


Рис. 56

Задача 37. Определить максимально возможное значение показателя преломления материала светоизолирующей оболочки n_0 цилиндрического световода, при котором все световые лучи из конического пучка с углом 120° при вершине испытывают полное внутреннее отражение на границе сердцевина – оболочка (рис. 58). Показатель преломления материала сердцевины n_c принять равным 1,6. Внешней средой является воздух ($n_e = 1$).

Решение

Чтобы отсутствовало преломление световых лучей на границе сердцевина – оболочка, между показателями преломления должно выполняться соотношение $n_e \sin \theta = \sqrt{n_c^2 - n_0^2}$, где θ – апертурный угол, в пределах которого падающие лучи распространяются вдоль световода. Отсюда следует, что

$$n_0 = \sqrt{n_c^2 - n_e^2 \sin^2 \theta} = \sqrt{1,6^2 - \sin^2 60^\circ} = 1,345.$$

Задача 38. Определить показатель поглощения α материала световедущей жилы цилиндрического световода, если известно, что затухание светового потока при распространении по световоду составляет 20 дБ/км. При расчете полагать, что светопропускание световода ограничивается только потерями на оптическое поглощение.

Решение

Затухание B (дБ/км) светового потока Φ связано с показателем поглощения соотношением $B = (1/l) 10 \lg(\Phi_{\text{вх}} / \Phi_{\text{вых}})$. Учитывая, что

$\Phi_{\text{вых}} = \Phi_{\text{вх}} \exp(-\alpha l)$, получаем $B = (10/l) \alpha l \lg e = 4,34\alpha$. Отсюда следует, что

$$\alpha = B / 4,34 = 20 / 4,34 = 4,6 \text{ км}^{-1} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}.$$

Задача 39. Определить, на сколько различаются коэффициенты светопропускания цилиндрических световодов одинаковой длины, но с различным диаметром световедущей жилы ($D_1 = 50$ мкм; $D_2 = 100$ мкм). Расчет выполнить для параллельного пучка лучей, распространяющихся под углом $\theta = 10^\circ$ к оси световода. Коэффициент отражения R_0 от границы раздела оболочка – сердцевина принять равным 0,9998; длина световода $l = 1$ м.

Решение

Диаметр световедущей жилы оказывает существенное влияние лишь на оптические потери, обусловленные неполнотой внутреннего отражения от

границы раздела оболочка – жила. С учетом этого светопропускание волокна можно выразить формулой

$$\tau_b = AR^{l(\text{tg}\theta)} p_0,$$

где A – некоторая постоянная; R_0 – коэффициент отражения излучения от границы жила – оболочка. Отсюда следует, что

$$\tau_{b2} / \tau_{b1} = R_0^{l(D_2-1/D_1)\text{tg}\theta} = 0,9998^{(10^4-2\cdot 10^4)\cdot 0,176} = 1,42.$$

Задачи для самостоятельного решения

4.1. 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.

4.2. При тех же условиях, что и в предыдущей задаче, определить напряженность электрического поля, действующего на монокристалл каменной соли, если ее диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 5,65$. Вычислить коэффициент упругой связи ионов $k_{\text{упр}}$ в кристалле, полагая, что напряженность внутреннего электрического поля равна напряженности внешнего поля.

4.3. 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 q_1 и на диэлектрике q_d . Диэлектрическую проницаемость материала принять равной 6.

4.4. Композиционный керамический материал изготовлен на основе двух диэлектриков с диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_1 = 40$ и $\varepsilon_2 = 80$.

Предполагая хаотическое распределение компонентов, определить состав термокомпенсированной керамики, если $\alpha_{e1} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{e2} = -1,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Чему равна диэлектрическая проницаемость композиционного диэлектрика?

4.5. Определить плотность вспененного полистирола (пенополистирола), имеющего диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{\text{всп}} = 1,5$.

Какую долю объема этого материала занимает воздух? Вспениванию подвергался полистирол с параметрами $\varepsilon = 2,6$; $d = 1050 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

4.6. Две противоположные грани куба с ребрами $a = 10$ мм из диэлектрического материала с удельным объемным сопротивлением $\rho_v = 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и удельным поверхностным сопротивлением $\rho_s = 10^{11} \text{ Ом}$ покрыты

металлическими электродами. Определить ток, протекающий через эти грани куба при постоянном напряжении $U_0 = 2$ кВ.

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

4.8. 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?

4.9. Кубик из диэлектрика с ребром 0,06 м имеет удельное объемное сопротивление 10^{12} Ом·м и удельное поверхностное сопротивление $5 \cdot 10^{12}$ Ом. На противоположные грани кубика нанесены электроды, к которым приложено напряжение частотой 1 МГц. Определить модуль комплексной проводимости кубика на этой частоте, если его диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 60$.

4.10. На электроды куба из диэлектрического материала подано переменное напряжение $U = 10$ В частотой $f = 1$ МГц. Требуется:

а) определить тангенс угла диэлектрических потерь для этого материала, удельные потери p , коэффициент диэлектрических потерь ε'' ;

б) получить выражение для комплексной диэлектрической проницаемости ε на частоте 1 МГц, если диэлектрическая проницаемость материала $\varepsilon = 2,8$. При расчете полагать, что потери в диэлектрике обусловлены его электропроводностью.

4.11. Активная мощность рассеяния P_{a1} в кабеле с изоляцией из полиэтилена при напряжении $U = 20$ В частотой 1 МГц равна 200 мкВт. Чему равна активная мощность рассеяния P_{a2} в этом же кабеле при напряжении 10 В частотой 2 МГц? Считать, что потери в полиэтилене обусловлены только сквозной электропроводностью.

4.12. Определить коэффициент потерь неполярного диэлектрика на частоте 1 МГц, если удельное сопротивление материала равно 10^{15} Ом·м.

4.13. Известно, что при тепловом пробое в равномерном поле диэлектрик однородной структуры толщиной 2 мм, расположенный между электродами площадью 2 см^2 , пробивается при напряжении 15 кВ. При каком напряжении пробьется этот же диэлектрик, если его расположить между электродами площадью 3 см^2 ?

4.14. 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?

4.15. Известно, что ниобат калия кристаллизуется в структуре перовскита с периодом решетки $c \approx a = 0,4$ нм. Определить электрический дипольный момент на одну элементарную ячейку, если спонтанная поляризованность этого сегнетоэлектрика $P = 0,3$ мкКл·м⁻².

Тема 4. Магнитные материалы и элементы на их основе.

Цель занятия: изучение механизмов намагничивания и основных характеристик магнитных материалов, приобретение практических навыков расчета магнитных и электрических параметров ферро- и ферримагнетиков, определяющих их применение в электронных средствах.

Намагниченность I , $A \cdot m^{-1}$, определяется как отношение суммарного магнитного момента M , $A \cdot m^2$, равномерно намагниченного вещества к его объему V , m^3 ,

$$I = M / V. \quad (5.1)$$

Магнитный момент вещества находится векторным суммированием атомных магнитных моментов. Магнитный момент атома $M_{ат}$ представляет векторную сумму орбитальных и спиновых магнитных моментов всех z электронов атома

$$M_{ат} = \sum_1^z M_{орб} + \sum_1^z M_{сп} . \quad (5.2)$$

В отсутствие внешнего магнитного поля магнитный момент атома не равен нулю только при наличии незаполненной электронной оболочки. В заполненных электронных оболочках орбитальные и спиновые магнитные моменты электронов скомпенсированы.

В качестве единицы измерения магнитных моментов электронов и атомных систем, магнетизм которых обусловлен движением электронов, применяется магнетон Бора $\mu_B = e \cdot \hbar / 2m = 9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж·Тл⁻¹, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл –

заряд электрона, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона, $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Планка.

Намагниченность вещества зависит от напряженности намагничивающего поля H , $A \cdot m^{-1}$,

$$I = \alpha \cdot H, \quad A \cdot m^{-1}, \quad (5.3)$$

где α – величина, характеризующая свойство вещества намагничиваться в магнитном поле и называемая магнитной восприимчивостью этого вещества.

Удельная магнитная восприимчивость определяется соотношением

$$\alpha_{уд} = \alpha / \rho, \quad m^3 \cdot K^{-1}, \quad (5.4)$$

где ρ – плотность вещества, $kg \cdot m^{-3}$.

Молярная магнитная восприимчивость определяется соотношением

$$\alpha_m = \alpha \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{\alpha}{\rho} M = \alpha V_m, \quad m^3 \cdot \text{моль}^{-1}, \quad (5.5)$$

где V_m – молярный объем, $m^3 \cdot \text{моль}^{-1}$; M – молярная масса, $kg \cdot \text{моль}^{-1}$.

Напряженность магнитного поля в центре кругового контура с током I , А,

$$H = \frac{I}{2R}, \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (5.6)$$

где R – радиус кольца, м.

Напряженность магнитного поля в центре длинного соленоида

$$H = \frac{I}{l \cdot I}, \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (5.7)$$

где N – число витков соленоида; l – его длина, м; I – сила тока в нем, А.

Напряженность магнитного поля в кольцевом сердечнике

$$H = \frac{N \cdot I}{l_{cp}} = \frac{N \cdot I}{2\pi R_{cp}}, \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}, \quad (5.8)$$

где N – число витков, I – сила тока, А; $l = 2\pi R_{cp}$ – средняя длина магнитного

контура в сердечнике, м; R_{cp} – среднее значение радиуса сердечника, м.

Магнитная индукция

$$B = \mu_0 H + \mu_0 I = \mu_0 (1 + \epsilon) H = \mu_0 \mu H = \mu_a H, \text{ Тл}, \quad (5.9)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, Гн·м⁻¹; μ – относительная магнитная проницаемость; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн·м⁻¹ – магнитная постоянная.

0

Основная кривая намагничивания – это зависимость магнитной индукции B (или намагниченности I) от напряженности поля H , полученная на предварительно размагниченных образцах. Начальная магнитная проницаемость

$$\mu_{нач} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} \quad (5.10)$$

максимальная магнитная проницаемость

$$\mu_{макс} = \frac{B_{макс}}{\mu_0 H_{макс}}. \quad (5.11)$$

0 $\mu_{макс}$

Магнитные потери. Процесс перемангничивания магнитных материалов в переменном поле связан с потерями части мощности магнитного поля. Эту мощность, поглощаемую магнитным материалом единичной массы и рассеиваемую в виде тепла, называют удельными магнитными потерями P . Магнитные потери складываются из потерь на гистерезис и динамических потерь. Динамические потери вызываются прежде всего вихревыми токами и, частично, магнитным последствием (магнитной вязкостью).

Потери на гистерезис. Мощность потерь на гистерезис P_{Γ} , Вт·кг⁻¹, определяется формулой

$$P_{\Gamma} = \eta f B_{\text{макс}}^n, \quad (5.12)$$

где η – коэффициент, зависящий от природы материала; $B_{\text{макс}}$ – максимальная магнитная индукция в течение цикла, Тл; n – показатель степени, имеющий значение в зависимости от $B_{\text{макс}}$ пределах от 1,6 до 2; f – частота, Гц.

Потери на вихревые токи обусловлены электрическими токами, которые индуцирует в материале магнитный поток. Мощность потерь на вихревые токи $P_{\text{вт}}$, Вт·кг⁻¹, в общем виде определяется формулой

$$P_{\text{вт}} = \zeta f^2 B_{\text{макс}}^2, \quad (5.13)$$

где ζ – коэффициент, зависящий от природы магнитного материала (в частности, от его удельного электрического сопротивления), а также его формы. Для листовых образцов магнитного материала

$$P_{\text{вт}} = \frac{1,64h^2 f^2 B_{\text{макс}}^2}{d\rho}, \quad (5.14)$$

где h – толщина листа, м; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; d – плотность материала, кг·м⁻³.

Потери на магнитную вязкость (магнитное последствие) нельзя рассчитать аналитически. Мощность потерь определяется как разность между удельными магнитными потерями P и суммой потерь на гистерезис $P_{\text{г}}$ и вихревые токи $P_{\text{вт}}$

$$P_{\text{мп}} = P - (P_{\text{г}} + P_{\text{вт}}). \quad (5.15)$$

Тангенс угла магнитных потерь $\text{tg}\delta_{\text{м}}$ характеризует динамические

свойства магнитных материалов. При перемагничивании в переменном поле имеет место отставание по фазе магнитной индукции от напряженности магнитного поля. Угол отставания $\delta_{\text{м}}$ называется углом магнитных потерь. В

самых слабых полях в области обратимых процессов перемагничивания магнитная проницаемость постоянна. Петля гистерезиса вырождается в прямую линию. В этом случае при синусоидальном поле индукция будет изменяться синусоидально и совпадать по фазе с напряженностью поля. При увеличении амплитуды напряженности перемагничивающего поля форма петель гистерезиса близка к эллипсу. В этом случае, если напряженность магнитного поля $H = H_m \sin \omega t$, то индукция $B = B_m \sin(\omega t - \delta_{\text{м}})$. На рис. 3.1

представлена эквивалентная последовательная схема замещения и векторная диаграмма тороидальной катушки индуктивности с сердечником из магнитного материала.

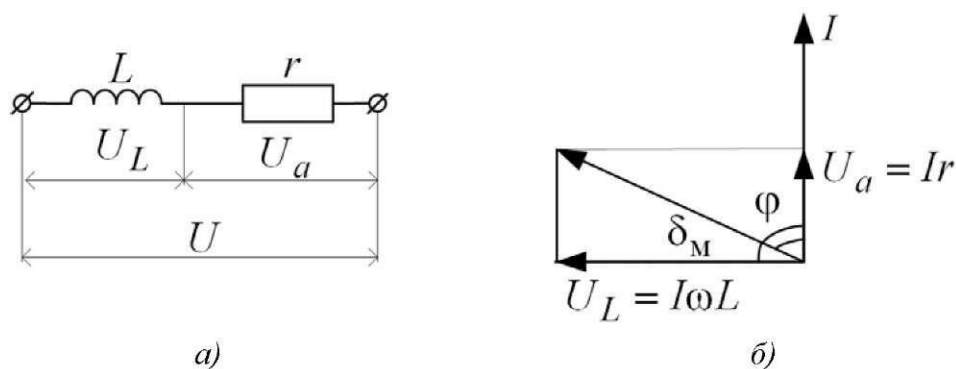


Рис. 3.1. Эквивалентная схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) катушки индуктивности с магнитным сердечником

Активное сопротивление r эквивалентно всем видам магнитных потерь, потерям в обмотке и электрической изоляции. Если пренебречь сопротивлением обмотки катушки и ее собственной емкостью, то из векторной диаграммы

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{r}{\omega L} = \frac{1}{Q}, \quad (5.16)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, с^{-1} ; f – частота, Гц; L – индуктивность катушки, Гн; Q – добротность катушки.

Активная мощность

$$P_a = I^2 \omega L \cdot \operatorname{tg} \delta_m. \quad (5.17)$$

Индукцию, возникающую в магнитном материале под действием магнитного поля, можно представить в виде двух составляющих: одна составляющая $B_{m1} = B_m \cos \delta_m$ совпадает по фазе с напряженностью поля и

связана с обратимыми процессами превращения энергии при перемагничивании; другая отстает на 90° от напряженности поля, связанной с необратимыми потерями энергии, и равна $B_{m2} = B_m \sin \delta_m$.

Комплексная магнитная проницаемость применяется для характеристики магнитных свойств материалов, используемых в цепях переменного тока

$$\mu = \mu' - i\mu', \quad (5.18)$$

где i – мнимая единица;

$$\mu' = \mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{m1}}{H_m} \quad (5.19)$$

– упругая магнитная проницаемость;

$$\mu'' = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{m2}}{H_m} \quad (5.20)$$

– вязкая магнитная проницаемость или проницаемость потерь.

Тангенс угла магнитных потерь

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'}. \quad (5.21)$$

Примеры решения задач

Задача №1. При насыщении магнитная индукция чистого железа $B = 2,2$ Тл. Учитывая, что элементарная ячейка кристаллической решетки железа представляет собой объемно-центрированный куб с ребром $a = 0,286$ нм, рассчитать магнитный момент, приходящийся на один атом железа (в магнетонах Бора).

Решение

При магнитном насыщении ферромагнетиков $H \ll I$, поэтому $I \approx B / \mu_0$.

Число атомов железа в единице объема $N = K/a^3$, где K – кратность элементарной ячейки, то есть число атомов, приходящихся на одну ячейку. В случае объемно-центрированного куба $K = 2$.

Магнитный момент, приходящийся на один атом,

$$M = \frac{I}{N} \approx \frac{Ba^3}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 9,274 \cdot 10^{-24}} = 2,21.$$

Полученный результат показывает, что в кристаллической решетке железа число нескомпенсированных спинов в расчете на один атом меньше, чем в свободном атоме железа, магнитный момент которого $M_{Fe} = 4\mu_B$.

Задача №2. На рис. 3.2 изображена динамическая петля гистерезиса тороидального магнитного сердечника, полученная на частоте 1 МГц. Путем графических построений с последующим расчетом найти тангенс угла магнитных потерь и добротность сердечника. Определить активную мощность, выделяющуюся в сердечнике, используемом в катушке индуктивностью $L = 10$ мГн, если по обмотке катушки проходит ток $I = 1$ мА частотой 1 МГц.

Получите выражение для комплексной магнитной проницаемости материала сердечника, полагая, что его эффективная магнитная проницаемость на частоте 1 МГц равна 200.

Решение

На высоких частотах изменения индукции в ферромагнетике отстают от изменения напряженности магнитного поля на угол δ_m , который называется углом

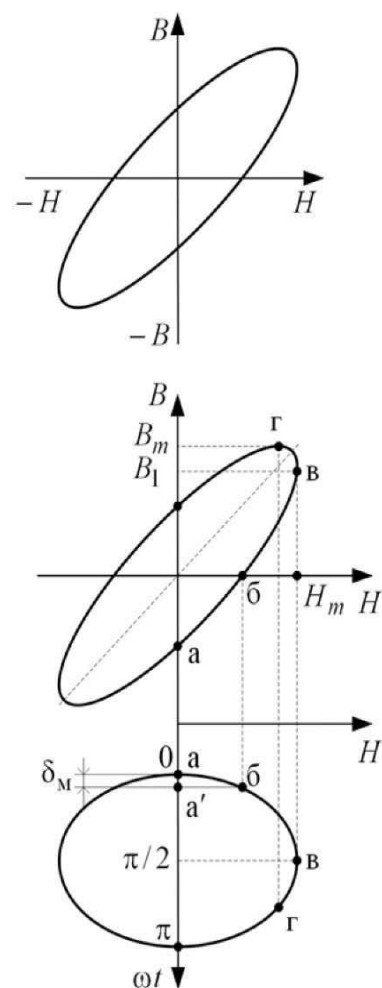


Рис. 3.2. Динамическая петля гистерезиса

магнитных потерь. Этот угол определяется длиной отрезка aa' (см. рис. 3.2) на зависимости $H = H_m \sin \omega t$.

Точка «а» соответствует моменту времени, когда $H = 0$, а точка «а'» – моменту, когда $B = 0$. Из рис. 3.2 следует, что $\delta_m \approx \pi/8$ и $\operatorname{tg} \delta_m = 0,414$.

Добротность сердечника $Q = (\operatorname{tg} \delta_m)^{-1} = 2,41$.

Активная мощность, выделяющаяся в сердечнике

$$P = I^2 \omega L \operatorname{tg} \delta_m = (10^{-3})^2 \cdot 2\pi \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,414 = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вт.}$$

Комплексная магнитная проницаемость $\tilde{\mu} = \mu' - j\mu''$, где $\mu' = \mu$; $\mu'' = \operatorname{tg} \delta_m$, то есть $\tilde{\mu} = 200 - j82,8$.

Задача №3. 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⁻¹ (при неизменной максимальной индукции в сердечнике). Рассчитать магнитные потери на вихревые токи в сердечнике на частоте 2 кГц.

Решение

Суммарные потери за один цикл перемагничивания линейно зависят от частоты:

$$W = P_a \mid f = P_r \mid f + P_t \mid f = \eta B_m^n + \zeta B_m^2 f,$$

где η , n и ζ – коэффициенты, зависящие от свойств материала и формы сердечника. Подставляя исходные данные, запишем для двух частот:

$$\eta B_m^n + \zeta B_m^2 \cdot 10^3 = 2 \mid 10^3;$$

$$\eta B_m^n + \zeta B_m^2 \cdot 2 \cdot 10^3 = 6 \mid (2 \cdot 10^3).$$

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

Тогда $P_t = \zeta B_m^2 f^2 = 10^{-6} \cdot (2 \cdot 10^3)^2 = 4 \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Задача №4. Для α -железа, кристаллизующегося в структуре кубической симметрии, константы магнитной кристаллографической анизотропии имеют следующие значения: $K_1 = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3$; $K_2 = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3$. Показать, что кристаллографические направления типа $[100]$ являются осями легкого намагничивания, а направления семейства $\{111\}$ – осями трудного намагничивания. Определить энергию магнитной кристаллографической анизотропии.

Решение

Для кристаллов кубической симметрии энергия магнитной анизотропии, отнесенная к единице объема ферромагнетика,

$$W = K_0 + K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2,$$

где α_1 , α_2 и α_3 – косинусы углов между направлениями вектора намагниченности и ребрами куба.

При намагничивании вдоль направления $[100]$ направляющие косинусы принимают значения: $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0, \alpha_3 = 0$. Поэтому $W_{100} = K_0$.

Аналогичный результат получим для любого другого направления семейства $\{100\}$.

Если намагничивание производится вдоль кристаллографического направления $[110]$, то $\alpha_1 = \alpha_2 = 1/\sqrt{2}; \alpha_3 = 0$. Отсюда следует, что

$$W_{110} = K_0 + K_1(1^2 + 1^2 + 0) + K_2 \cdot 0 = K_0 + K_1/4.$$

При намагничивании в направлении $[111]$ $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1/\sqrt{3}$. Поэтому

$$W_{111} = K_0 + K_1\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}\right) + K_2 \cdot 0 = K_0 + K_1 + \frac{K_2}{3}.$$

Так как K_1 и K_2 положительны, то из полученных результатов можно сделать вывод о том, что намагничивание в направлении $[111]$ связано с наибольшими энергетическими затратами. Энергию W_K , требуемую для поворота вектора намагниченности от оси легкого намагничивания в направлении оси трудного намагничивания, т. е. энергию анизотропии, можно найти в виде разности:

$$W_K = W_{111} - W_{100} = K_1\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}\right) + K_2 \cdot 0 - K_0 = K_1 + \frac{K_2}{3} = 1,456 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3 = 14,56 \text{ кДж/м}^3.$$

Задача №5. Из экспериментальных данных следует, что при температуре 700°C намагниченность насыщения чистого железа J_{MS} составляет 0,55 намагниченности насыщения J_{M0} при $T = 0 \text{ K}$ и $J_{MS} = 0,296J_{M0}$ при температуре 750°C . Путем экстраполяции экспериментальных данных найдите температуру Кюри для железа.

Решение

Намагниченность насыщения резко падает по мере приближения к точке Кюри Θ_K . В окрестности этой точки выполняется соотношение $y = J_{MS}/J_{M0} = \alpha\sqrt{1 - T/\Theta_K}$, где α – константа для данного материала. Отсюда

следует, что

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{\sqrt{1 - T_1/\Theta_K}}{\sqrt{1 - T_2/\Theta_K}}$$

и

$$\Theta_K = \frac{T_2 y_1^2 - T_1 y_2^2}{y_1^2 - y_2^2} = \frac{1023(0,55)^2 - 973(0,296)^2}{(0,55)^2 - (0,296)^2} = 1042 \text{ K} = 769^\circ\text{C}.$$

Задача №6 В слабых магнитных полях петля гистерезиса приближенно описывается эмпирической формулой Рэлея:

$$B = \mu \left(\mu + \beta H \right) H + \frac{\beta}{\mu} \left(H^2 - H^2 \right),$$

$$0 \left| \begin{matrix} n \\ m \end{matrix} \right|_2^m$$

где знак минус соответствует интервалу возрастания H , а знак плюс – интервалу уменьшения H . Пользуясь этой формулой, построить петлю

гистерезиса и определить потери на гистерезис в кольцевом магнитном сердечнике с площадью поперечного сечения $S = 25 \text{ мм}^2$ и средней длиной магнитного контура $l_{\text{ср}} = 50 \text{ мм}$ при воздействии на него переменного магнитного поля частотой 50 Гц и амплитудой напряженности $H_m = 20 \text{ А/м}$. Начальная магнитная проницаемость материала сердечника $\mu_n = 1000$, эмпирическая постоянная $\beta = 200 \text{ м/А}$.

Решение

Подстановка исходных данных в формулу Рэлея приводит к зависимостям:

при возрастании H

$$B = 1,26 \cdot 10^{-4} H^2 + 6,3 \cdot 10^{-3} H - 5,03 \cdot 10^{-2};$$

при уменьшении //

$$B = 1,26 \cdot 10^{-4} H^2 + 6,3 \cdot 10^{-3} H + 5,03 \cdot 10^{-2}.$$

Результаты расчетов петли гистерезиса по приведенным формулам показаны на рис. 63.

Потери на гистерезис за один цикл перемагничивания, отнесенные к единице объема сердечника, определяются площадью статической петли:

$$\frac{W_r}{V} = \oint B dH = \int_{-H_m}^{H_m} (B_{\uparrow} - B_{\downarrow}) dH = \frac{4}{3} \mu \beta H_m^3,$$

где $B_{\downarrow}$ соответствует уменьшению H , $B_{\uparrow}$ – возрастанию H . На частоте 50 Гц потери на вихревые токи не играют существенной роли, поэтому петлю на рис. 63 можно рассматривать как статическую.

Активная мощность, выделяющаяся в сердечнике за счет потерь на гистерезис при циклическом перемагничивании полем частотой 50 Гц ,

$$P_r = W_r V f = \frac{4}{3} \mu \beta H_m^3 S l_{\text{ср}} f = \frac{4}{3} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \cdot (20)^3 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 50 =$$

$$= 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} = 167 \text{ мкВт}.$$

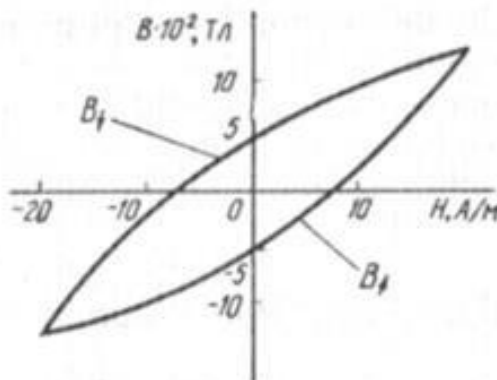


Рис. 63

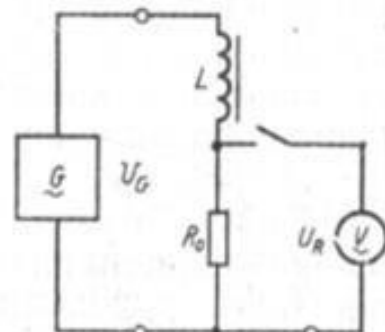


Рис. 64

Задача №7. При испытании магнитного сердечника на частоте $f = 1 \text{ кГц}$ с помощью установки, схема которой представлена на рис. 64, были получены следующие результаты: $U_G = 300 \text{ мВ}$, $U_R = 30 \text{ мВ}$. Вычислить магнитную

проницаемость, индукцию и напряженность магнитного поля в кольцевом сердечнике размерами $R \times r \times h = 30 \times 20 \times 10$ мм, если число витков измерительной обмотки $n = 30$, а сопротивление резистора, ограничивающего ток в измерительном контуре, $R_0 = 10$ Ом.

Решение

По измеренному значению падения напряжения на резисторе R_0 определяем ток в измерительном контуре:

$$I = \frac{U_R}{R_0} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{10} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 3 \text{ мА.}$$

Пренебрегая активным сопротивлением обмотки и потерями в магнитном сердечнике, находим падение напряжения на катушке индуктивности:

$$U_L = \sqrt{U_G^2 - U_R^2} = \sqrt{(300)^2 - (30)^2} = 298,5 \text{ мВ.}$$

Индуктивность катушки с исследуемым сердечником

$$L = \frac{U_L}{\omega I} = \frac{298,5 \cdot 10^{-3}}{(2\pi \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3})} = 15,836 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Учитывая, что потокосцепление $\Psi = nBS = LI$, где S – площадь поперечного сечения сердечника, находим индукцию магнитного поля в сердечнике

$$B = \frac{LI}{nS} = \frac{LI}{n(R-r)h} = \frac{15,836 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{30(30-20) \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 15,836 \cdot 10^{-3} \text{ Тл.}$$

При известном токе в обмотке напряженность магнитного поля в кольцевом сердечнике

$$H = \frac{nI}{l_{\text{ср}}} = \frac{nI}{2\pi r_{\text{ср}}} = \frac{30 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 25 \cdot 10^{-3}} = 0,573 \text{ А/м,}$$

где $l_{\text{ср}}$ – средняя длина магнитного контура в сердечнике. Тогда относительная

магнитная проницаемость материала сердечника

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{15,836 \cdot 10^{-3}}{(4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,573)} = 2,2 \cdot 10^4.$$

Задача №8 Докажите, что потери на перемагничивание, отнесенные к единице объема материала сердечника (удельные потери), могут быть вычислены по формуле $p_m = P_a = \mu_0 \omega H^2 \tan \delta_m$.

Решение

На рис. 66 представлены эквивалентная схема и векторная диаграмма катушки индуктивности с магнитным сердечником. Пренебрегая активным сопротивлением обмотки, для активной мощности,

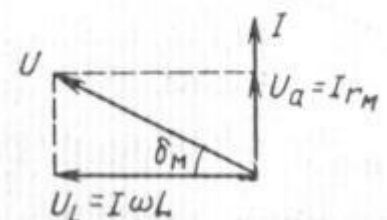
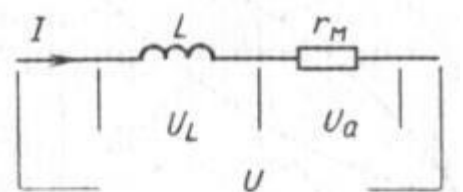


Рис. 66

выделяющейся в катушке индуктивности из-за

потерь, в сердечнике, получаем $P_a = r_m I^2 = I^2 \omega L \operatorname{tg} \delta$..

При заданном токе в обмотке напряженность магнитного поля в кольцевом сердечнике $H = In / l_{cp}$, где l_{cp} – средняя длина магнитного контура

в сердечнике. Индуктивность катушки определяется выражением $L = \mu_0 \mu n^2 S / l_{cp}$, где μ – магнитная проницаемость кольцевого сердечника.

Окончательно имеем

$$P_a = \frac{H^2 l_{cp}^2}{n^2} \omega \frac{\mu_0 \mu n^2 S}{l_{cp}} \operatorname{tg} \delta = H^2 \mu_0 \mu \omega V \operatorname{tg} \delta ,$$

где $V = l_{cp} S$ – объем магнитного сердечника.

Задача №9. Определить удельные магнитные потери на вихревые токи в сердечнике трансформатора, набранном из листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм, если на сердечник воздействует изменяющийся по синусоидальному закону магнитный поток с частотой 50 Гц и максимальной индукцией 0,5 Тл, обусловленный прохождением переменного тока i по обмотке. Удельное сопротивление стали r принять равным 0,5 мкОм·м.

Решение

Вихревые токи $i_{вт}$ возникают в плоскости, расположенной перпендикулярно вектору магнитной индукции B . В сборном сердечнике трансформатора тонкий плоский лист длиной l , высотой b и толщиной h (рис. 68) пронизывается переменным магнитным потоком, направленным вдоль плоскости листа. В этом случае большие стороны контуров вихревых токов параллельны сторонам сечения листа. Выделим в теле листа полый цилиндр с основанием, ограниченным двумя контурами вихревого тока. Большие стороны этих контуров отстоят от вертикальной оси сечения листа соответственно на x и $x + dx$. Так как $h \ll b$, то можно считать, что длина большой стороны контура вихревого тока равна высоте листа b . Тогда магнитный поток, пронизывающий полость цилиндра (рис. 68), $\Phi_x = 2xbB$. Действующее значение ЭДС, индуцируемой переменным потоком в стенке цилиндра, $U_x = \omega \Phi_x = 4\pi f x b B = 4\pi f x b B_m / \sqrt{2}$.

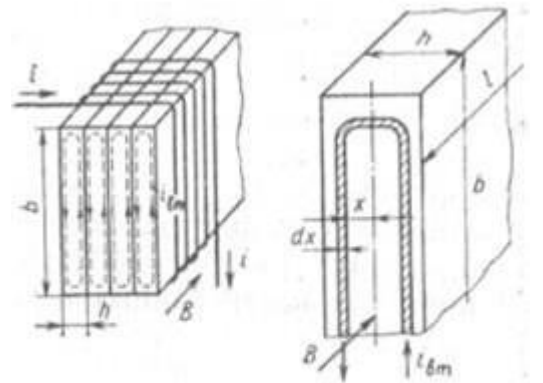


Рис. 68

Потери на вихревые токи в цилиндре $dP_{вт} = U_x^2 d\sigma_x$, где $d\sigma_x$ – активная проводимость выделенного цилиндра.

Учитывая, что поперечное сечение цилиндра для вихревого тока равно ldx , для проводимости цилиндра получим $d\sigma_x = ldx (2bp)$. Отсюда следует, что

$$dP_{\text{вт}} = \frac{U^2 l}{2b\rho} dx = \frac{4\pi^2 f x^2 b l B^2}{\rho} dx.$$

Мощность $P_{\text{т}}$, выделяемую за счет протекания вихревых токов во всем листе, найдем как сумму элементарных мощностей, создаваемых всеми контурами вихревых токов. Интегрируя, получим

$$P_{\text{вт}} = \frac{4\pi^2 f b l B^2}{\rho} \int_0^h x^2 dx = \frac{\pi^2 B^2 h^3 b l f}{6 \rho} = 1,643 f B_m^2 h^2 V |\rho|,$$

где $V = hbl$ – объем листа.

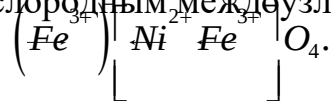
Таким образом, удельные потери на вихревые токи в сердечнике трансформатора

$$p = 1,643 B_m^2 f h^2 |\rho| = \frac{1,643 \cdot 0,25 \cdot 50 \cdot (3,5 \cdot 10^{-4})^2}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 5 \text{ Вт/м}^3.$$

Задача №10. Определить индукцию насыщения вблизи температуры 0 К для никелевого феррита NiFe_2O_4 , кристаллизующегося в структуре обращенной шпинели с периодом решетки 0,834 нм. Магнитные моменты катионов Fe^{3+} и Ni^{2+} принять равными соответственно $5\mu_B$ и $2\mu_B$.

Решение

Феррит никеля характеризуется следующим распределением катионов по тетра- и октаэдрическим кислородным междоузлиям:



В состав элементарной кубической ячейки входит восемь структурных единиц NiFe_2O_4 , причем магнитные моменты катионов, находящихся в различных кислородных междоузлиях, антипараллельны. Поэтому намагниченность насыщения феррита

$$J = \frac{M}{V} = \frac{8(M_{\text{Ni}^{2+}} + M_{\text{Fe}^{3+}} - M_{\text{Fe}^{3+}})}{a^3} = \frac{16\mu_B}{a^3}.$$

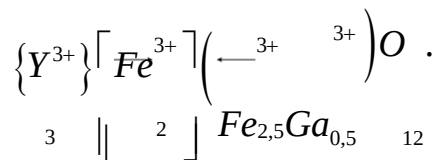
Отсюда индукция насыщения

$$B_s = \mu_0 I_s = \frac{16\mu_0\mu_B}{a^3} = \frac{16 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 9,274 \cdot 10^{-24}}{(0,834 \cdot 10^{-9})^3} = 0,32 \text{ Тл}.$$

Задача №11. Вычислить намагниченность насыщения смешанного феррита состава $\text{Y}_3\text{Fe}_{4,5}\text{Ga}_{0,5}\text{O}_{12}$ вблизи абсолютного нуля, если известно, что галлий занимает в кристаллической решетке тетраэдрические кислородные междоузлия. Как изменится температура Кюри при добавлении галлия к иттриевому феррогранату?

Решение

Распределение катионов по кислородным междоузлиям в феррите данного состава характеризуется схемой



Магнитный момент катионов Y^{3+} и Ga^{3+} равен нулю. Суммарная намагниченность проявляется как разность намагниченностей подрешеток А и В. Магнитный момент в расчете на одну структурную единицу

$$M_s = M_A - M_B = 2,5M_{Fe^{3+}} - 2M_{Fe^{3+}} = 0,5 \cdot 5\mu_B = 2,5\mu_B.$$

Намагниченность насыщения $J_{s0} = M_s K / a^3$, где K – кратность элементарной ячейки (для граната $K = 8$). Период решетки всех феррогранатов близок 1,24 нм. Поэтому

$$J_{s0} = \frac{2,5\mu_B \cdot 8}{a^3} = \frac{2,5 \cdot 9,274 \cdot 10^{-24} \cdot 8}{(1,24)^3 \cdot 10^{-27}} = 0,975 \cdot 10^5 \text{ А/м.}$$

Разбавление подрешетки А немагнитными ионами приводит к ослаблению косвенного обменного взаимодействия типа А – О – В, что снижает устойчивость магнитной упорядоченности к тепловому воздействию. Поэтому при введении галлия в решетку иттриевого феррограната температура Кюри уменьшается.

Задача №12. Рассчитать, в каком соотношении по массе необходимо смешать оксиды иттрия и железа, чтобы при спекании получить иттриевый феррогранат стехиометрического состава.

Решение

Химический состав феррограната можно представить в виде $2 \cdot Y_3Fe_5O_{12} = 3 \cdot Y_2O_3 \cdot 5 \cdot Fe_2O_3$. Отсюда получаем

$$\frac{m_{Y_2O_3}}{2 \cdot 3} \Bigg| \frac{m_{Fe_2O_3}}{2 \cdot 3} = \frac{3M_{Y_2O_3}}{2 \cdot 3} \Bigg| \frac{5M_{Fe_2O_3}}{2 \cdot 3},$$

где M – молярная масса соответствующих оксидов $M_{Y_2O_3} = 226$; $M_{Fe_2O_3} = 160$).

$$\text{Таким образом, } \frac{m_{Y_2O_3}}{2 \cdot 3} \Bigg| \frac{m_{Fe_2O_3}}{2 \cdot 3} = 0,6 \cdot \frac{226}{160} = 0,847.$$

Задача №13. Пористость ферритовых стержней круглого сечения диаметром $D_\phi = 10$ мм составляет 3 %. Стержни изготовлены по керамической технологии путем обжига предварительно спрессованных заготовок. Каким должен быть диаметр заготовок D_3 , если их пористость составляет 27 %?. Определить относительное уменьшение длины стержня при обжиге.

Решение

Полагая, что общее количество материала в заготовке и в готовом феррите остается неизменным, можем записать $V_3 (1 - 0,27) = V_\phi (1 - 0,03)$, где V_3 и V_ϕ – объем заготовки и готового стержня после обжига. Считая, что $V_3 = KD_3^3$ и $V_\phi = KD_\phi^3$, где K – коэффициент пропорциональности, получаем

$$D_3 = D_\phi \sqrt[3]{(1 - 0,03) / (1 - 0,27)} = 11 \text{ мм.}$$

Относительное уменьшение длины стержня при обжиге

$$\Delta l / l = (D_3 - D_\Phi) / D_3 \approx 9,1\%.$$

Задача №14. Найти индуктивность соленоида, имеющего 200 витков, намотанных на диэлектрическое основание, длиной $l = 50$ мм. Площадь поперечного сечения основания $S = 50$ мм². Как изменится индуктивность катушки, если в нее введен цилиндрический ферритовый сердечник, имеющий магнитную проницаемость $\mu = 400$, определенную с учетом размагничивающего действия воздушного зазора?

Решение

Индуктивность соленоида, длина которого достаточно велика по сравнению с диаметром.

$$L_0 = \mu_0 \frac{n^2 S}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (200)^2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-3}} = 50,2 \text{ мГн.}$$

При введении магнитного сердечника индуктивность катушки возрастает пропорционально магнитной проницаемости сердечника:

$$L_1 = \mu_0 \mu \frac{n^2 S}{l} = \mu \cdot 50,2 \cdot 10^{-6} = 400 \cdot 50,2 \cdot 10^{-6} = 20 \text{ мГн.}$$

Задача №15. 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

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

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

$$B = B_0 + B_i = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot J = \mu_0 \cdot (H + J) = 4\pi \cdot 10^{-7} (100 - 9,5 \cdot 10^{-4}) = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Поскольку медь диамагнетик, векторы B и J антипараллельны.

Задача №16. Магнитная восприимчивость никеля при температурах 400 и 800 °С равна соответственно $1,25 \cdot 10^{-3}$ и $1,14 \cdot 10^{-4}$. Определить температуру Кюри и магнитную восприимчивость никеля при температуре $T = 600$ °С.

Решение

Поскольку, как следует из условия задачи, магнитная восприимчивость падает с увеличением температуры, точка Кюри лежит ниже 400 °С. Известно, что при $T > T_C$, χ_m подчиняется закону Кюри-Вейсса

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

где C – постоянная, зависящая от природы материала.

Для нахождения C решим систему уравнений

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

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

$$\chi_{T_1} T_1 - \chi_{T_2} T_2 = T_C (\chi_{T_1} - \chi_{T_2}) \text{ и}$$

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

Постоянная Кюри-Вейса

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

Тогда при $T = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$

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

Задача №17. 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 μ_n .

Решение

Определим индуктивность катушки с сердечником

$$L = \frac{\mu_0 \mu \cdot n^2 \cdot S}{l_{cp}},$$

где μ_0 и μ – магнитная постоянная и магнитная проницаемость феррита; n – число витков; S – площадь поперечного сечения сердечника; l_{cp} – средняя линия сердечника.

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

Тогда магнитные потери

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

Задача №18. Кольцевой ферритовый сердечник со средним диаметром $d_{cp} = 25$ 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 $B_0 = 0,1$ Тл. Определить магнитную

проницаемость феррита.

Решение

В соответствие с законом о полной магнитодвижущей силе

$$I \cdot n = H_{\phi} \cdot l_{\phi} + H_3 \cdot l_3,$$

где H_{ϕ} и H_3 – напряженность магнитного поля в феррите и воздушном зазоре соответственно; l_{ϕ} – средняя длина контура-линии магнитной индукции в сердечнике; l_3 – длина зазора.

Поскольку линии магнитной индукции непрерывны, то магнитная индукция в сердечнике и зазоре $B_{\phi} = B_3$. Учитывая, что

$$B_{\phi} = \mu_0 \mu \cdot H_{\phi} \cdot l_{\phi}, \text{ а } B_3 = \mu_0 \cdot H_3,$$

$$\text{получаем } I \cdot n = B_3 \cdot l + \frac{B_3 \cdot l_3}{\mu_0 \cdot \mu}.$$

$$\text{Отсюда магнитная проницаемость феррита} \quad \mu = \frac{B \cdot l}{0,1 \cdot (\pi \cdot 25 \cdot 10^{-3} - 10^{-3})}$$

$$\mu = \frac{B \cdot l}{I \cdot n - \frac{B \cdot l_3}{\mu_0}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot 0,17 - 0,1 \cdot 10^{-3}}{0,1 \cdot (\pi \cdot 25 \cdot 10^{-3} - 10^{-3})} = 1140.$$

Задача №19. Кольцевой магнитный сердечник со средним диаметром 40 мм изготовлен из магнитомягкого феррита, кривая намагничивания которого (сплошная линия 1) показана на рис. 72. В сердечнике имеется воздушный зазор $l_0 = 1$ мм. Число витков обмотки сердечника $n = 500$. Найти напряженность магнитного поля в воздушном зазоре при токе в катушке $I = 0,3$ А. Как изменится напряженность поля в зазоре, если при прочих неизменных условиях он будет увеличен вдвое?

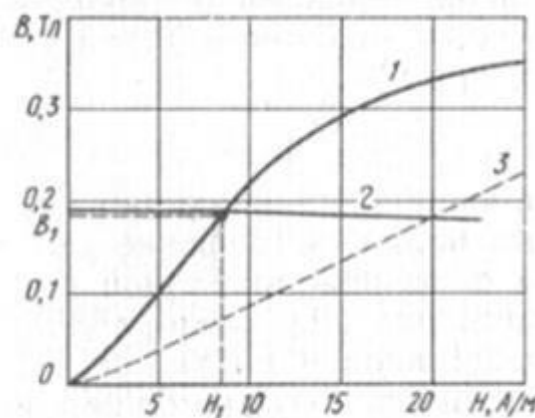


Рис. 72

Решение

Вследствие непрерывности магнитного потока индукция одинакова в сердечнике и зазоре: $B = B_0 = \mu_0 H_0$. Отсюда с учетом закона полного тока (см. решение задачи 5.4.8) получаем

$$B = \frac{\mu_0 n I}{l_0 + \frac{l_0}{\mu}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot 0,3}{10^{-3} + \frac{4\pi \cdot 10^{-7} (\pi \cdot 40 \cdot 10^{-3} - 10^{-3})}{\mu}} H =$$

$$= 18,85 \cdot 10^{-2} - 1,565 \cdot 10^{-4} H.$$

Полученная зависимость показана на рис. 72 в виде прямой линии 2. На пересечении ее с кривой намагничивания материала (1) магнитная индукция равна B_1 , а напряженность поля в сердечнике H_1 . Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре

$$H_0 = B_1 \cdot \mu_0 = 18,7 \cdot 10^{-2} \cdot (4\pi \cdot 10^{-7}) = 1,49 \cdot 10^{-5} \text{ А/м.}$$

С увеличением зазора магнитная индукция, а значит и напряженность

поля в зазоре, уменьшаются. Аналогичный расчет для $l_0 = 2$ мм дает $H_0 = 0,75 \cdot 10^5$ А/м, т. е. напряженность поля в воздушном зазоре снижается в два раза.

Задача №20. Катушка индуктивности содержит $n = 200$ витков медного изолированного провода, который намотан виток к витку на поверхности диэлектрического цилиндра диаметром $D = 1$ см. Через катушку проходит постоянный ток $I = 0,9$ А и переменный ток $i = 0,1$ А частотой $f = 2$ МГц. Определить: минимальный диаметр провода, из которого может быть изготовлена катушка, если допустимая плотность тока в обмотке $j = 2$ А/мм²; мощность, выделяющуюся при этом в обмотке; минимальную толщину слоя диэлектрической лаковой изоляции, провода, если электрическая прочность пленки лака $E_{\text{пр}} = 3000$ В/мм. При расчете поверхностным эффектом и собственной емкостью катушки пренебречь, принять запас по электрической прочности лаковой изоляции $K = 10$. Как изменится напряженность электрического поля в изоляции провода, если катушку такой же индуктивности изготовить с магнитным сердечником, расположенным внутри диэлектрического цилиндра того же диаметра?

Решение

Диаметр провода катушки

$$d = \sqrt{\frac{4(I+i)}{\pi j}} = \sqrt{\frac{4(0,9+0,1)}{2\pi}} = 0,8 \text{ мм.}$$

Мощность, выделяющаяся в обмотке, определяется активным сопротивлением обмотки $R_{\text{об}} = 4\rho_{\text{Cu}} D n / d^2 = 0,21$ Ом и составляет

$$P = (I+i)^2 R_{\text{об}} = 0,21 \text{ Вт.}$$

Индуктивность катушки $L = \mu_0 \mu n^2 \pi D^2 l / (4l)$, где $l = nd$ — длина катушки. При $\mu = 1$ получаем

$$L = \frac{\mu_0 n \pi D^2}{4d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \cdot (10^{-2})^2}{4 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}} = 24,66 \text{ мкГн.}$$

Индуктивное сопротивление катушки $X_L = 2\pi f L = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 24,66 \cdot 10^{-6} = 309$ Ом $\gg R_{\text{об}}$, поэтому толщина лаковой изоляции провода определяется разностью потенциалов между соседними витками, обусловленной переменным током, проходящим по катушке:

$$\Delta u = \frac{i X_L}{n} = \frac{0,1 \cdot 309}{200} = 0,154 \text{ В.}$$

Толщина изолирующей лаковой пленки на проводе

$$h_{\text{л}} = \frac{1}{K} \frac{\Delta u \sqrt{2}}{E_{\text{пр}}} = 0,364 \text{ мкм.}$$

$$2 E_{\text{пр}}$$

При использовании магнитного сердечника напряженность электрического поля в изоляции провода возрастет, так как та же

индуктивность будет получена при меньшем числе витков, а падение переменного напряжения на катушке останется таким же.

Задача №21. Оцените максимально возможную плотность записи информации (бит/см²) в устройстве на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД) на пленке феррограната толщиной $h = 12$ мкм, если минимальный диаметр доменов $d_{\min} = 3$ мкм. В процессе управления перемещением ЦМД их диаметр может изменяться в три раза. Для исключения взаимного влияния соседних ЦМД расстояние между ними должно быть не менее $4d$.

Чему равен магнитный момент ЦМД минимального и максимального размеров, если индукция насыщения феррограната $B_s = 45$ мТл?

Решение

Максимально возможная плотность записи информации $N_{\max}$ связана с диаметром домена d :

$$N_{\max} = \frac{1}{(4d)^2} = \left(4 \cdot 3 \cdot 10^{-6}\right)^{-2} = 6,94 \cdot 10^9 \text{ бит} \cdot \text{м}^{-2} = 6,94 \cdot 10^5 \text{ бит/см}^2.$$

Намагниченность насыщения феррита J_s связана с индукцией насыщения: $J_s = B_s / \mu_0 = 45 \cdot 10^{-3} / (4\pi \cdot 10^{-7}) = 3,58 \cdot 10^4$ А/м. Из определения намагниченности следует, что магнитный момент M домена объемом $V = \pi d^2 h / 4$ может быть представлен в виде $M = J_s \pi d^2 h / 4$. Отсюда

$$M_{\min} = 3,58 \cdot 10^4 \pi \cdot (3 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 12 \cdot 10^{-6} / 4 = 2,53 \cdot 10^{-7} \text{ А} \cdot \text{м}^2; M_{\max} = 9M_{\min} = 2,28 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{м}^2,$$

при минимальном диаметре доменов $d_{\min} = 3$ мкм и минимальном расстоянии между центрами соседних ЦМД $L_{\min} = 4d$, когда исключается их взаимное влияние.

Задача №22. Для регистрации ЦМД в устройстве, описанном в задаче 18, используется датчики Холла на основе пленки антимолибдита индия толщиной $\delta = 1$ мкм, нанесенной непосредственно на поверхность пленки феррограната. Датчик имеет крестообразную форму (рис. 78), 1, 2 –

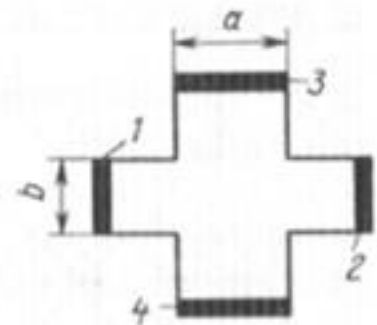


Рис. 78

токовые электроды, 3, 4 – холловские электроды; $a = 2,6$ мкм; $b = 2$ мкм. Какой ток должен проходить по датчику, чтобы сигнал регистрации ЦМД был равен 0,1 мВ? При расчете рассеянием магнитного потока, создаваемого доменом, пренебречь. Для InSb при комнатной температуре коэффициент Холла $R_H = 4 \cdot 10^{-4}$ м³/Кл.

Решение

Так как рабочая часть датчика Холла площадью $a \cdot b = 2,6 \cdot 2$ мкм меньше, чем площадь ЦМД минимальных размеров, можно полагать, что индукция магнитного поля в датчике равна индукции насыщения пленки феррограната. Тогда ЭДС Холла

$$U_H = R_H \frac{IB}{\delta} = 0,1 \text{ мВ.}$$

Отсюда

$$I = \frac{U_H \delta}{R_H B} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{400 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot 10^{-3}} = 5,56 \text{ мкА.}$$

Задача №23. Из сплава ЮНД8 изготовлен постоянный магнит в форме разомкнутого тороида со средним диаметром $D = 100$ мм иззором $l_0 = 25$ мм. Кривая размагничивания сплава показана на рис.

79. Определить магнитную индукцию и магнитную энергию в воздушном зазоре, если площадь поперечного сечения магнита $S_M = 500 \text{ мм}^2$.

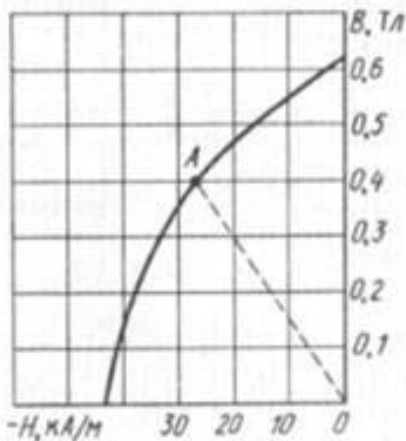


Рис. 79

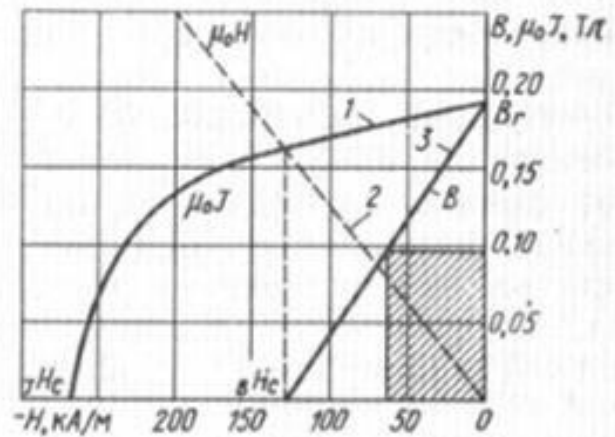


Рис. 80

Решение

В соответствии с законом полного тока имеем $H_M l_M + H_0 l_0 = 0$; где H_M и H_0 – напряженность магнитного поля внутри магнита и в воздушном зазоре соответственно; $l_M = (\pi D - l_0)$ – средняя длина магнита.

Учитывая, что $B = \mu_0 H_0$, имеем

$$B = -\frac{\mu_0 l_M}{l_0} H_M = -\frac{\mu_0 (\pi D - l_0)}{l_0} H_M = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} (\pi \cdot 100 - 25) \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} H_M =$$

$$= -1,5 \cdot 10^{-5} H_M$$

Полученная прямолинейная зависимость показана на рис. 79 штриховой линией. Пересечение ее с кривой размагничивания определяет положение рабочей точки A магнита. Из рис. 79 следует, что $B = 0,4 \text{ Тл}$.

Магнитная энергия в воздушном зазоре

$$W_0 = \frac{B H_0}{2} V_0 = \frac{B^2 S l_0}{2 \mu_0} = \frac{(0,4)^2 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 0,8 \text{ Дж.}$$

Задача №24. На рис. 80 показана кривая размагничивания изотропных бариевых магнитов марки 1БИ, выраженная через

намагниченность материала J (кривая 1). Постройте кривую размагничивания $B(H)$ и определите, во сколько раз различаются коэрцитивные силы по индукции и намагниченности. Вычислите максимальную удельную энергию магнита.

Решение

Магнитная индукция связана с намагниченностью выражением $B = \mu_0 J + \mu_0 H$ причем магнитная индукция внутреннего размагничивающего поля $\mu_0 H$ направлена противоположно вектору остаточной намагниченности. Магнитная индукция обращается в нуль, когда $\mu_0 J = -\mu_0 H$. Из рис. 80 следует, что $B H_c = 128 \text{ кА/м}$, т. е. коэрцитивная сила по индукции в 2,06 раза меньше коэрцитивной силы по намагниченности $J H_c$. При $H = B H_c$ намагниченность положительна и численно равна напряженности размагничивающего поля. Для устранения этой намагниченности необходимо приложить дополнительное поле, т. е. всегда $J H_c > B H_c$. Для случая, когда участок кривой размагничивания $\mu_0 J(H)$, прилегающий к B_r линеен (см. рис. 80), кривая размагничивания $B(H)$ трансформируется в прямую линию. Для рассматриваемого материала эту прямолинейную зависимость можно выразить уравнением $B = 0,19 - 1,485 \cdot 10^{-6} H$.

Удельная энергия магнита

$$W = \frac{BH}{2} = 0,095H - \frac{1,485}{2} \cdot 10^{-6} H^2.$$

Дифференцируя это выражение и приравнявая его нулю: $\frac{dW}{dH} = 0,095 - 1,485 \cdot 10^{-6} H' = 0$, находим значение напряженности магнитного поля, при котором энергия максимальна: $H' = 64 \cdot 10^3 \text{ А/м}$.

Отсюда максимальная удельная энергия магнита, численно характеризуемая площадью заштрихованного прямоугольника $W_{\max} = (0,19 - 1,485 \cdot 10^{-6} \cdot 64 \cdot 10^3) \cdot 64 \cdot 10^3 / 2 = 3,04 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$.

Задача №25. По обмотке электромагнита, имеющей 100 витков, проходит ток $I = 0,1 \text{ А}$. Определить напряженность магнитного поля в зазоре $d = 1 \text{ мм}$, если сечение сердечника одинаково на всех участках, магнитная проницаемость материала $\mu = 200$. Форма сердечника показана на рис.83, где $l = 50 \text{ мм}$; $t = 20 \text{ мм}$.

Решение

Обозначим магнитные потоки на участках ab , bc и cd разветвленной магнитной цепи через Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 соответственно (рис. 83). Из непрерывности магнитных потоков следует

$$B_2 = B_1 + B_3, \quad (1)$$

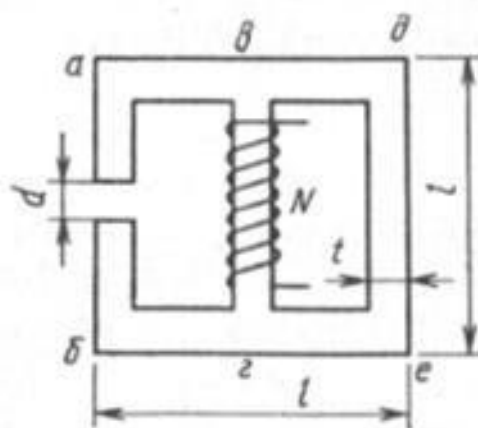


Рис. 83

где $B_{1,2,3} = \Phi_{1,2,3} / S_{1,2,3}$.

В соответствии с законом полного тока имеем:

$$\frac{B_1}{\mu_0 \mu} (2l - 2t - d) + \frac{B_1}{\mu_0} d + \frac{B_2}{\mu_0 \mu} (l - t) = nI, \quad (2)$$

$$\frac{\mu_0 \mu}{B_1} (2l - 2t - d) + \frac{\mu_0}{B_1} d = \frac{\mu_0 \mu}{B_3} (2l - 2t). \quad (3)$$

Выражая B_2 и B_3 через B_1 из уравнений (2) и (3), после подстановки в (1) получаем

$$B_1 \cdot 8l [1 - t | l + 3d (\mu - 1) | (8l)] = 2\mu_0 \mu nI.$$

Учитывая, что $B_1 = \mu_0 H_1$, имеем

$$H_1 = \frac{\mu nI}{4l [1 - t | l + 3d (\mu - 1) | (8l)]} = \frac{200 \cdot 100 \cdot 0,1}{4 \cdot 5 \cdot 10^{-2} [1 - 1 | 5 + 3 \cdot 10^{-3} (200 - 1) | (8 \cdot 5 \cdot 10^{-2})]} = 8724 \text{ А / м.}$$

Задача №26. Для магнита из феррита бария, имеющего коэрцитивную силу $H_{c1} = 240$ кА/м и остаточную индукцию $B_{r1} = 0,35$ Тл, получен наибольший запас магнитной энергии $W_{\max} = 10,4$ кДж/м³. Чему равен наибольший запас магнитной энергии $W_{\max 2}$ для магнита из материала на основе редкоземельных металлов состава $Sm_{0,5}Pr_{0,5}Co_{0,5}$, для которого $H_{c1} = 700$ кА/м и $B_{r2} = 0,93$ Тл, если коэффициенты выпуклости кривых размагничивания этих двух магнитов считать одинаковыми?

Решение

Пол коэффициентом выпуклости η_v кривой размагничивания магнита понимают отношение $(BH)_{\max} / B_r H_c$, где $(BH)_{\max}$ – энергетическое произведение, пропорциональное наибольшему запасу магнитной энергии. При $\eta_{v1} = \eta_{v2}$

$$\frac{(BH)_{\max 1}}{B_{r1} H_{c1}} = \frac{(BH)_{\max 2}}{B_{r2} H_{c2}}; \quad \frac{W_{\max 1}}{B_{r1} H_{c1}} = \frac{W_{\max 2}}{B_{r2} H_{c2}}.$$

$$\frac{B_{r1} H_{c1}}{B_{r2} H_{c2}} = \frac{B_{r1} H_{c1}}{B_{r2} H_{c2}}.$$

Отсюда для материала на основе редкоземельных металлов

$$W_{\max 2} = W_{\max 1} \frac{B_{r2} H_{c2}}{B_{r1} H_{c1}} = 10,4 \frac{0,93 \cdot 700 \cdot 10^3}{0,35 \cdot 240 \cdot 10^3} = 80,6 \text{ кДж / м}^3$$

Задачи

5.1. Диамагнитная восприимчивость меди $k_m = -9,5 \cdot 10^{-6}$. Определите намагниченность и магнитную индукцию в медном проводе при воздействии на него однородного магнитного поля напряженностью $1000 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$. Укажите, как ориентированы векторы намагниченности и магнитной индукции относительно друг друга.

5.2. Магнитная индукция насыщения металлического никеля, имеющего плотность $8960 \text{ кг}\cdot\text{см}^{-3}$, равна $0,65 \text{ Тл}$. Определить магнитный момент, приходящийся на один атом никеля (в магнетонах Бора).

5.3. В однородное магнитное поле индукцией B_0 перпендикулярно магнитному потоку помещена плоскопараллельная пластина из однородного изотропного ферромагнетика с магнитной проницаемостью μ . Определить магнитную индукцию B_1 и напряженность магнитного поля H_1 внутри ферромагнетика.

5.4. При напряженности магнитного поля $H = 10^4 \text{ А}\cdot\text{м}^{-1}$ магнитная индукция в висмуте $B = 12,564 \text{ мТл}$. Определить магнитную восприимчивость k_m вещества. Какой вывод можно сделать о природе намагниченности?

5.5. В сердечнике трансформатора удельные магнитные потери на гистерезис и на вихревые токи при частоте 2 кГц равны и составляют $2 \text{ Вт}\cdot\text{кг}^{-1}$. Определить суммарные удельные магнитные потери в сердечнике при частоте 400 Гц , если максимальная магнитная индукция на нем та же, что и на частоте 2 кГц .

5.6. На частоте 50 Гц удельные потери на вихревые токи в сердечнике из электротехнической стали при индукции магнитного поля B , равной $1,2 \text{ Тл}$, составляют $6,5 \text{ Вт}\cdot\text{кг}^{-1}$. Определить потери на вихревые токи в сердечнике на частоте 400 Гц при магнитной индукции $0,5 \text{ Тл}$, если масса сердечника $m = 0,5 \text{ кг}$.

5.7. Определить магнитные потери в сердечнике $K40\times 20\times 7,5$ из феррита марки 2000 НМ на частоте $0,1 \text{ МГц}$ при пропускании через намагничивающую обмотку тока 40 мА . Обмотка состоит из 100 витков, добротность сердечника в данных условиях равна 10 . Магнитную проницаемость сердечника при рабочей напряженности поля считать равной

5.8. Найти удельные магнитные потери в ферритовом сердечнике марки 2000 НН, перемагничиваемом на частоте $0,1 \text{ МГц}$ магнитным полем напряженностью $H_m = 4 \text{ А}\cdot\text{м}^{-1}$, если в данных условиях $\text{tg}\delta_m = 0,2$, магнитная проницаемость $\mu = 2500$.

5.9. Кольцевой ферритовый сердечник массой $m = 0,1 \text{ кг}$ перемагничивается переменным магнитным полем напряженностью $H_m = 1 \text{ кА}\cdot\text{м}^{-1}$ частотой $f = 10^4 \text{ Гц}$. Определить мощность, выделяемую в сердечнике, если магнитная проницаемость материала $\mu = 1000$; $\text{tg}\delta_m = 2\cdot 10^{-2}$; плотность феррита $d = 4,5 \text{ Мг}\cdot\text{м}^{-3}$.

5.10. Кольцевой магнитопровод имеет площадь поперечного сечения $S = 100 \text{ мм}^2$ и среднюю длину магнитного контура $l_{cp} = 0,1 \text{ м}$. На сердечник намотана обмотка с числом витков $n = 100$. Определить магнитный поток через

сердечник при токе в обмотке $I = 1$ А, если магнитная проницаемость материала сердечника $\mu = 2000$.

5.11. Определить индуктивность катушки с кольцевым магнитным сердечником размерами $R \times r \times h = 30 \times 20 \times 10$ мм и обмоткой, состоящей из 200 витков. Сердечник изготовлен из высоконикелевого пермаллоя с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 50000$ (при рабочей напряженности магнитного поля).

5.12. Катушка с ферритовым тороидальным сердечником диаметром 10 мм имеет индуктивность 0,12 Гн и содержит 1000 витков. Определить ток в катушке, при котором магнитная индукция в сердечнике равна 0,1 Тл.

5.13. Определить магнитную индукцию ферромагнитного сердечника, помещенного внутрь соленоида длиной $l = 20$ см с числом витков $n = 800$, если по обмотке проходит ток 0,2 А, а эффективная магнитная проницаемость сердечника $\mu = 200$.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
**«МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ
ТЕХНИКИ»**
для студентов направления
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленность (Профиль)
Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь 2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	с
Введение.....	4
Лабораторная работа №1 Исследование вентильных свойств p - n -перехода	5
Лабораторная работа №2 Исследование температурной зависимости электросопротивления p - n -перехода.....	14
Лабораторная работа №3 Исследование выпрямительных диодов	24
Лабораторная работа №4 Исследование диодов при различных схемах соединения ...	28
Лабораторная работа №5 Исследование схем выпрямления	32
Лабораторная работа №6 Исследование стабилитронов	37
Лабораторная работа №7 Исследование варикапов	45
Лабораторная работа №8 Исследование диодов Шоттки	48
Лабораторная работа №9 Исследование биполярных транзисторов в схеме с общим эмиттером	51
Лабораторная работа №10 Исследование биполярных транзисторов в схеме с общей базой	57
Лабораторная работа №11 Исследования биполярного транзистора в активном режиме	62
Лабораторная работа № 12 Исследование схем смещения положения рабочей точки .	72
Лабораторная работа № 13 Исследования схем температурной стабилизации положения рабочей точки	77
Лабораторная работа №14 Исследование полевых транзисторов с управляющим p - n - переходом	83
Лабораторная работа №15 Исследование МОП транзисторов	90
Лабораторная работа №16 Исследование фотоэлектрических приборов	94
Лабораторная работа №17 Исследование светодиодов	102
Литература.....	106

Введение

Лабораторные работы — существенный элемент учебного процесса в вузе, в ходе которого обучаемые фактически впервые сталкиваются с самостоятельной практической деятельностью в конкретной области. Лабораторные работы являются как бы средним звеном между углубленной теоретической работой студентов на лекциях и применением ими знаний на практике. Эти занятия удачно сочетают элементы теоретического исследования и практической работы.

Выполняя лабораторные работы, обучаемые лучше усваивают программный материал, так как многие расчеты и формулы, казавшиеся отвлеченными, становятся вполне конкретными, происходит соприкосновение теории с практикой, что в целом содействует уяснению сложных вопросов науки и становлению обучаемых как специалистов.

Лабораторные работы активизируют самостоятельную работу обучаемых над изучаемым курсом. Заметим, что наиболее интенсивная и ритмичная работа в течение семестра проводится обучаемыми по тем дисциплинам, по которым имеются лабораторные занятия.

В настоящее время считается общепризнанным, что лабораторный практикум должен носить творческий, исследовательский, а не созерцательный, репродуктивный характер. Следовательно, лабораторные занятия должны быть школой практического опыта, школой творческих навыков, эффективного использования науки в избранной профессии. Наряду с этим лабораторный практикум должен быть школой воспитания творчества, настойчивости в достижении поставленной научной цели.

Лабораторные работы — один из видов самостоятельной практической работы обучаемых, в которых путем проведения экспериментов происходят **углубление** и закрепление теоретических знаний и навыков обучаемых в интересах их профессиональной подготовки.

1. Тема: Исследование вентильных свойств p - n -перехода

2. Цели работы:

- экспериментальное исследование параметров и характеристик p - n -перехода;
- приобретение практических навыков работы с электронно-вычислительной техникой.

3. Исходные данные:

- модель p - n -перехода реализована в среде программирования Electronics Workbench.

4. Правила работы в лаборатории:

Общие требования безопасности

Студенты допускаются к самостоятельной работе на оборудовании после проведения с ними вводного инструктажа на рабочем месте. Получение инструктажа подтверждается личной подписью студента в журнале учета инструктажей по технике безопасности.

Проведение лабораторных работ допускается на исправном оборудовании. Металлические части оборудования, которые могут оказаться под напряжением, должны быть заземлены.

Требования безопасности перед началом работ

Запрещается: переодеваться; пользоваться огнем; курить; принимать пищу в лаборатории.

Убедиться в целостности электрических розеток и разъемов.

Включение компьютера производить только после получения допуска по выполняемой работе и разрешения преподавателя или ассистента.

Требования безопасности во время работы

Выполняя лабораторную работу, студенты обязаны использовать только вычислительную технику и периферийное оборудование относящееся к данному рабочему месту.

Требования безопасности по окончании работы

По команде преподавателя учащиеся обязаны выключить компьютер и составляющие вычислительного комплекса.

Рабочее место привести в порядок.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

Если в процессе работы появилась неисправность (запах горелой изоляции, дым, искрение и т.п.) необходимо немедленно отключить питание и доложить преподавателю.

В случае возникновения пожара необходимо:

- отключить питание на вводном автомате электропитания;
- сообщить преподавателю или ассистенту;

-приступить к тушению, используя имеющиеся в лаборатории огнетушители.

5. Аппаратное обеспечение:

Класс персональных ЭВМ не ниже Pentium-2, классная доска, мел.

6. Программное обеспечение:

Среда программирования Electronics Workbench, Mathcad, программные модули лабораторной работы.

7. Теория:

Зависимость величины тока через переход от приложенного напряжения отражает его вольтамперная характеристика, рис.1.

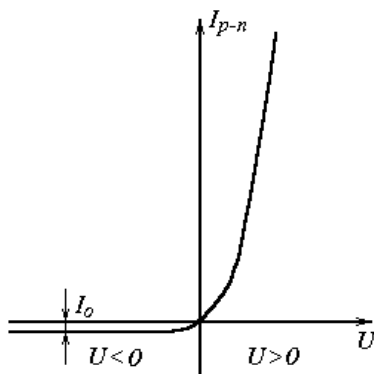


Рис.1 - ВАХ p - n перехода

Теоретически доказано, что ВАХ p - n перехода описывается выражением:

$$I_{p-n} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$I_{p-n} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U}{\phi_T}} - 1 \right) \quad (1.a)$$

где $\phi_T = k \cdot T = 0,025$ В – температурный потенциал при комнатной температуре ($+18^\circ \text{C} = 291$ К);

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

U - напряжение прикладываемое к переходу;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К или $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана;

T – термодинамическая температура;

I_0 – тепловой ток, который зависит от температуры и определяется свойствами полупроводникового материала, из которого изготовлен переход.

В реальных p - n переходах выражение (1) претерпевает изменения:

$$I_{p-n} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U}{\phi_T \cdot \gamma}} - 1 \right) + U \cdot G \quad (2)$$

где γ – коэффициент инжекции, в зависимости от типа материала $\gamma \in [1 \div 2]$;

G – проводимость утечки, определяется поверхностным состоянием p - n перехода.

Типовыми значениями указанных параметров являются:

Таблица 1

Тип материала	I_0 [t=18°C; T=291K], А	γ	G, См
Ge	$1 \cdot 10^{-6}$	1,7	$1 \cdot 10^{-9}$
Si	$1 \cdot 10^{-9}$	1,7	$1 \cdot 10^{-9}$
AsGa	$1 \cdot 10^{-11}$	1,9	$1 \cdot 10^{-9}$

Поскольку прямой ток p - n перехода $I_{пр} \approx (10^3 \dots 10^5) \cdot I_0$, то можно говорить о практически односторонней проводимости p - n перехода, что хорошо видно из вольт-амперной характеристики p - n перехода.

Прямая ветвь ВАХ. При напряжениях $U > 0$ малейшее изменение напряжения вызывает существенное изменение тока.

Различают два режима работы перехода — нормальный, когда ток порядка миллиампера, и микрорежим, когда ток порядка микроампера. В зависимости от диапазона токов прямые напряжения несколько различаются, но в пределах диапазона их можно считать постоянными и рассматривать как своего рода параметр открытого перехода.

U^* называют напряжением открытого перехода. При комнатной температуре:

- в нормальном режиме $U^*(AsGa) = 1$ В, $U^*(Si) = 0,7$ В, $U^*(Ge) = 0,5$ В;
- в микрорежиме $U^*(AsGa) = 0,85$ В, $U^*(Si) = 0,5$ В, $U^*(Ge) = 0,3$ В.

Обратная ветвь ВАХ.

Реальный обратный ток перехода несколько превышает величину I_0 , предсказываемую выражением (1). Причиной этого является, прежде всего, поверхностный ток утечки и генерация электронно-дырочных пар в области обратносмещенного перехода. Составляющую обратного тока, обусловленную генерацией, называют *током термогенерации*.

Процессы генерации и рекомбинации носителей происходят во всех частях кристалла — как в нейтральных слоях *n* и *p*, так и в области перехода. В равновесном состоянии скорости генерации и рекомбинации везде одинаковы, поэтому направленных потоков носителей нет. Когда к переходу приложено обратное напряжение, область перехода дополнительно обедняется носителями. Поэтому рекомбинация здесь замедляется и процесс генерации оказывается неуравновешенным. Избыточные генерируемые носители уносятся электрическим полем в нейтральные слои: электроны в *n*-слой, дырки в *p*-слой. Эти потоки и образуют ток термогенерации I_G .

Неконтролируемое возрастание тока термогенерации приводит к пробое *p-n*-перехода. В силу этого, вводится понятие обратного максимально допустимого напряжения на *p-n*-переходе (3)

$$U_{обр} = 0,8 \cdot U_{проб} \quad (3)$$

где $U_{проб}$ - напряжение теплового или электрического пробоя определяемое материалом и конструктивными особенностями *p-n*-перехода.

Вентильные свойства *p-n*-перехода оцениваются коэффициентом выпрямления (4)

$$K_B = I_{np} / I_{обр} \text{ при } U = \pm 1,2 \cdot U^* \text{ В.} \quad (4)$$

где U^* - напряжение открытого перехода при комнатной температуре в нормальном режиме.

8. Литература:

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб.пособие для вузов.2-е изд., перераб. и доп. М: Лаб. баз. зн. 2001
2. Жеребцов И.П. Основы электроники.- 5-е изд., перераб. и доп. Л.:Энергоатом-издат. 1989.
4. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение. М.: Академия, 2004.
5. С. Зи Физика полупроводниковых приборов, ч1 М.: Мир, 1984.
6. Викулин И.М., Стафеев И.М. Физика полупроводниковых приборов М.: Сов. радио, 1980.
7. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники М.: Сов. радио, 1971.
8. Пасынков В.В. и др. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов.— 3-е изд., перераб. и доп. М: Высш. школа, 1981

9. Контрольные вопросы:

1. Каким выражением описывается ВАХ *p-n*-перехода.

2. В чем проявляются вентильные свойства р-п-перехода.
3. Как зависит вид ВАХ р-п-перехода от типа материала.
4. Какие параметры материала определяют вид ВАХ р-п-перехода.
5. Каковы причины обуславливающие пробой р-п-перехода.

10. Методические рекомендации по проведению исследований:

10.1. Снятие прямой ветви ВАХ р-п-перехода

1). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diodes», открыть папку «Ge_2910K_вар», загрузить файл «Ge_2910K_прям_№(1÷10)». Номер варианта уточнить у преподавателя. При запросе, рис.2, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model».

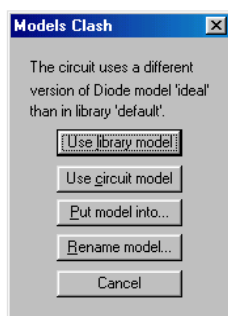


Рис.2

На экране монитора появится схема.

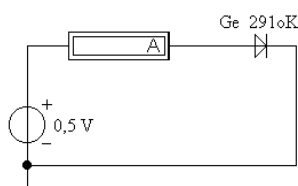


Рис.3.

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе Ge.

2). Установить значение ЭДС источника равным $1,2 \cdot U^*$ В. Активировать схему. Снять показания амперметра, занести их в таблицу №2.

Табл.№2

Ge	$U_{пр}, МВ$								
	$I_{пр}, мА$								
	$U_{пр}, МВ$								

Si	$I_{пр}, \text{мА}$								
AsGa	$U_{пр}, \text{мВ}$								
	$I_{пр}, \text{мА}$								

3). Постепенно, с произвольным шагом, снижая напряжение источника ЭДС, производить измерение тока р-п-перехода с последующей записью его величины в таблицу №2. Измерения производить (не менее 8 раз) до достижения тока порядка 0,5 мА.

4). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diodes», открыть папку «Si_291oK_вар», загрузить файл «Si_291oK_прям_№(1÷10)». Номер варианта уточнить у преподавателя. При запросе, рис.4, «наступите» мышкой на клавишу «Нет».

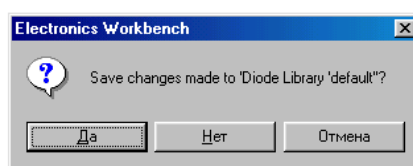


Рис.4

При запросе, рис.2, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model». На экране монитора появится схема.

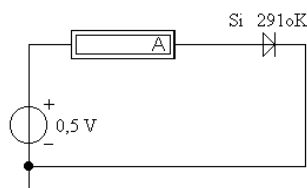


Рис.5.

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе Si.

5). Выполнить указания пунктов 2), 3).

6). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diodes», открыть папку «AsGa_291oK_вар», загрузить файл «Si_291oK_прям_№(1÷10)». Номер варианта уточнить у преподавателя. При запросе, рис.4, «наступите» мышкой на клавишу «Нет». При запросе, рис.2, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model». На экране монитора появится схема.

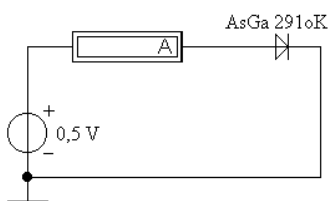


Рис.6.

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе AsGa.

5). Выполнить указания пунктов 2), 3).

10.2. Снятие обратной ветви ВАХ р-п-перехода

1). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diodes», открыть папку «Ge_291oK_вар», загрузить файл «Ge_291oK_обрат». При запросе, рис.2, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model». На экране монитора появится схема.

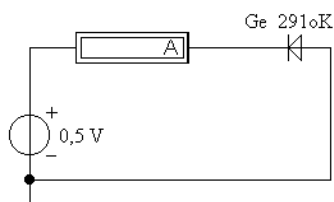


Рис.7.

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе Ge.

2). Произвести измерение тока диода (с произвольным шагом) в интервале $[0 \div 1,2 \cdot U^*]$ (не менее 3 измерений) и в интервале $[100 \div 100,05]$ В с шагом 0,01 В. Результаты измерений занести в таблицу №3.

Табл.№3

Ge	$U_{обр}, В$						
	$I_{обр}, мкА$						
Si	$U_{обр}, В$						
	$I_{обр}, мкА$						
AsGa	$U_{обр}, В$						
	$I_{обр}, мкА$						

3). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diodes», открыть папку «Si_291oK_вар», загрузить файл «Si_291oK_обрат». При запросе, рис.2, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model». На экране монитора появится схема.

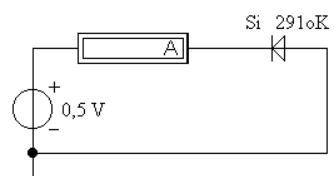


Рис.8.

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе Si.

4). Выполнить указания пункта 2).

5). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diodes», открыть папку «AsGa_291oK_вар», загрузить файл «AsGa_291oK_обрат». При запросе, рис.2, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model». На экране монитора появится схема.

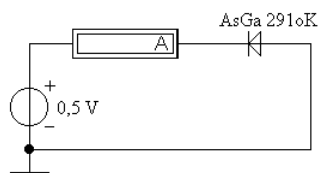


Рис.9.

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе AsGa.

6). Выполнить указания пункта 2).

10.3. Анализ ВАХ и расчет параметров p-n-перехода

1). По полученным данным, табл.2,3, постройте графики функций: $I = f(U)$, подобные рис.1.

2). Руководствуясь выражениями (3), (4) и ВАХ, для всех типов материала, рассчитайте:

- коэффициент выпрямления (при $U = \pm 1,2 \cdot U^*$ В);
- обратное максимально допустимое напряжение.

Данные, используемые в ходе расчетов, показать на ВАХ и занести в таблицу №4 в строку «экспериментальные». Результаты вычислений занести в таблицу №4 в строку «экспериментальные».

Табл.№4

Материал	Данные	U , В	$I_{обр}$, мкА	$I_{пр}$, мА	K_v	$U_{обр}$, В
Ge	расчетные					----
	эксперимент.					
Si	расчетные					----
	эксперимент.					
AsGa	расчетные					----
	эксперимент.					

3). Руководствуясь выражениями (2), (3), (4) и данными таблицы №1 рассчитайте:

- прямой ток p-n-перехода при $U = 1,2 \cdot U^*$ В;
- обратный ток p-n-перехода при $U = -1,2 \cdot U^*$ В;
- коэффициент выпрямления (при $U = \pm 1,2 \cdot U^*$ В).

Результаты вычислений занести в таблицу №4 в строку «расчетные».

4). Сделайте выводы:

- о вентильных свойствах p - n -перехода и зависимости его параметров от типа материала;
- о сходимости расчетных и экспериментальных данных результатов исследования.

11. Содержание отчета о лабораторной работе:

в отчете должны быть отражены название, цель лабораторной работы, пункты исследований, таблицы с экспериментальными и расчетными данными, графики, необходимые математические выражения, выводы по работе.

1. Тема: Исследование температурной зависимости электросопротивления p - n -перехода

2. Цель работы:

- экспериментальное исследование параметров и характеристик p - n -перехода;
- приобретение практических навыков работы с электронно-вычислительной техникой.

3. Исходные данные:

- модель p - n -перехода реализована в среде программирования Electronics Workbench.

4. Правила работы в лаборатории:

Общие требования безопасности

Студенты допускаются к самостоятельной работе на оборудовании после проведения с ними вводного инструктажа на рабочем месте. Получение инструктажа подтверждается личной подписью студента в журнале учета инструктажей по технике безопасности.

Проведение лабораторных работ допускается на исправном оборудовании. Металлические части оборудования, которые могут оказаться под напряжением, должны быть заземлены.

Требования безопасности перед началом работ

Запрещается: переодеваться; пользоваться огнем; курить; принимать пищу в лаборатории.

Убедиться в целостности электрических розеток и разъемов.

Включение компьютера производить только после получения допуска по выполняемой работе и разрешения преподавателя или ассистента.

Требования безопасности во время работы

Выполняя лабораторную работу, студенты обязаны использовать только вычислительную технику и периферийное оборудование относящееся к данному рабочему месту.

Требования безопасности по окончании работы

По команде преподавателя учащиеся обязаны выключить компьютер и составляющие вычислительного комплекса.

Рабочее место привести в порядок.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

Если в процессе работы появилась неисправность (запах горелой изоляции, дым, искрение и т.п.) необходимо немедленно отключить питание и доложить преподавателю.

В случае возникновения пожара необходимо:

- отключить питание на вводном автомате электропитания;
- сообщить преподавателю или ассистенту;
- приступить к тушению, используя имеющиеся в лаборатории огнетушители.

5. Аппаратное обеспечение:

класс персональных ЭВМ, классная доска, мел.

6. Программное обеспечение:

среда программирования Electronics Workbench, Mathcad, программные модули лабораторной работы.

7. Теория:

Зависимость величины тока через переход от приложенного напряжения при различных температурах и типах материала отражают вольтамперные характеристики, рис.1.

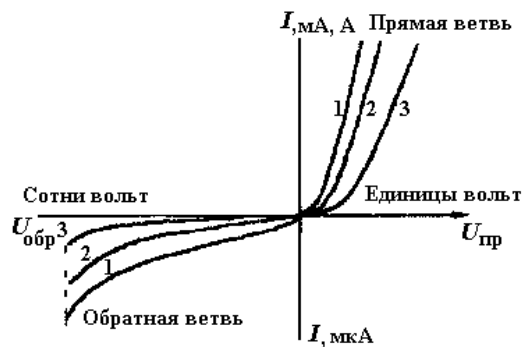


Рис.1

Приведенные кривые соответствуют:

- 1). 1 - T1; 2 - T2; 3 - T3, причем $T1 > T2 > T3$ для одного типа материала;
- 2). 1- Ge; 2 - Si; 3 – AsGa.

В общем случае, для описания ВАХ используют выражение (1)

$$I_{p-n} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U}{\phi_T \cdot \gamma}} - 1 \right) + U \cdot G \quad (1)$$

где $\phi_T = k \cdot T$ – температурный потенциал;

U - напряжение прикладываемое к переходу;

$k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана;

T – термодинамическая температура;

γ – коэффициент инжекции, в зависимости от типа материала $\gamma \in [1 \div 2]$;

G – проводимость утечки, определяется поверхностным состоянием p-n перехода;

I_0 – тепловой ток, который зависит от температуры и определяется свойствами полупроводникового материала, из которого изготовлен переход.

Типовыми значениями указанных параметров являются:

Табл.№1

Тип материала	I_0 , А [t=-20°C; T=253K]	I_0 , А [t=18°C; T=291K]	I_0 , А [t=80°C; T=353K]	γ	G, См
Ge	$1,384 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$3,287 \cdot 10^{-4}$	1,7	$1 \cdot 10^{-9}$
Si	$3,577 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1,714 \cdot 10^{-5}$	1,7	$1 \cdot 10^{-9}$
AsGa	$1,437 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$2,463 \cdot 10^{-6}$	1,9	$1 \cdot 10^{-9}$

Тепловой ток I_0 определяется соотношением:

$$I_0 = S \cdot (q \cdot p_{n0} \cdot D_p / L_p + q \cdot n_{p0} \cdot D_n / L_n)$$

S – площадь перехода;

$D_{p,n}$ – коэффициент диффузии неосновных носителей заряда, соответственно дырок в p-области перехода и электронов в p-области;

$L_{p,n}$ – диффузионная длина неосновных носителей заряда;

p_{n0} и n_{p0} – концентрации неосновных носителей заряда.

Концентрации неосновных носителей определяются из закона термодинамического равновесия.

Для полупроводников p-типа $p_p \cdot n_p = n_i^2$

Для полупроводников n-типа $n_n \cdot p_n = n_i^2$

Величина n_i является одной из важнейших характеристик полупроводникового материала, она определяет концентрацию свободных носителей заряда (электронов и дырок) в собственном (беспримесном) полупроводнике. Для n_i характерна сильно выраженная температурная зависимость, которая определяется соотношением:

$$n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot \exp(-\Delta W / k \cdot T)$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны полупроводника, принимающая значения:

$$\Delta W_{Ge} = 0,66 \text{ эВ}; \quad \Delta W_{Si} = 1,12 \text{ эВ}; \quad \Delta W_{AsGa} = 1,43 \text{ эВ}.$$

$N_{c,v}$ – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне полупроводника соответственно.

В общем случае, p-n-переход характеризует:

1). Статическое сопротивление (сопротивление p - n -перехода постоянному току).

$$R_{cm} = \frac{U}{I} \quad (2)$$

2). Дифференциальное сопротивление (сопротивление p - n -перехода переменному току).

$$R_{diff} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (3)$$

3). Коэффициент выпрямления

$$K_B = R_{обр} / R_{пр}, \text{ при } U = \pm 1,2 \cdot U^* \text{ В.} \quad (4)$$

где U^* - напряжение открытого перехода при комнатной температуре в нормальном режиме, для кремния $U^* = 0,75 \text{ В}$.

Типовая зависимость электросопротивления p - n -перехода от температуры приведена на рисунке 2.

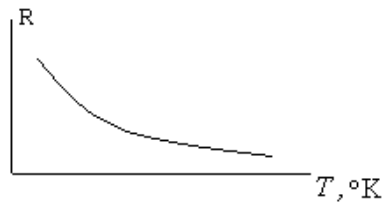


Рис.2

Типовая зависимость электросопротивления p - n -перехода от ширины запрещенной зоны (типа материала) приведена на рисунке 3.

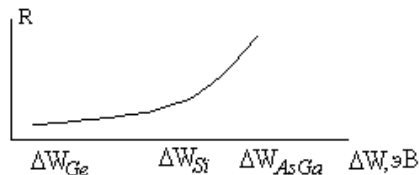


Рис.3

Типовая зависимость коэффициента выпрямления p - n -перехода от ширины запрещенной зоны (типа материала) приведена на рисунке 4.

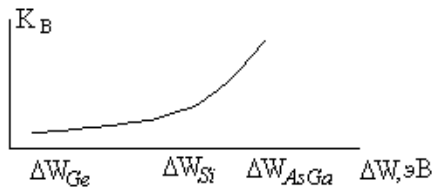


Рис.4

8. Литература:

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб.пособие для вузов.2-е изд., перераб. и доп. М: Лаб. баз. зн. 2001
2. Жеребцов И.П. Основы электроники.- 5-е изд., перераб. и доп. Л.:Энергоатом-издат. 1989.
4. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение. М.: Академия, 2004.
5. С. Зи Физика полупроводниковых приборов, ч1 М.: Мир, 1984.

6. Викулин И.М., Стафеев И.М. Физика полупроводниковых приборов М.: Сов. радио, 1980.
7. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники М.: Сов. радио, 1971.
8. Пасынков В.В. и др. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов.— 3-е изд., перераб. и доп. М: Высш. школа, 1981

9. Контрольные вопросы:

1. Каким выражением описывается ВАХ p - n -перехода.
2. В чем проявляются вентильные свойства p - n -перехода.
3. Как зависит вид ВАХ p - n -перехода от типа материала.
4. Какие параметры материала определяют вид ВАХ p - n -перехода.
5. Какова зависимость электросопротивления p - n -перехода от температуры.
6. Какова зависимость электросопротивления p - n -перехода от ширины запрещенной зоны материала.
7. Какова зависимость коэффициента выпрямления p - n -перехода от ширины запрещенной зоны материала.

10. Методические рекомендации по проведению исследований:

Исследование температурной зависимости электросопротивления p - n -перехода проведем на примере анализа ВАХ кремния !!!

10.1. Снятие прямой ветви ВАХ p - n -перехода

1). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diodes», открыть папку «Si_253oK_вар», загрузить файл «Si_253oK_прям_№(1÷10)». Номер варианта уточнить у преподавателя.

2). При запросе, рис.5, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model».

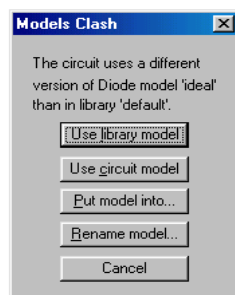


Рис.5

На экране монитора появится схема.

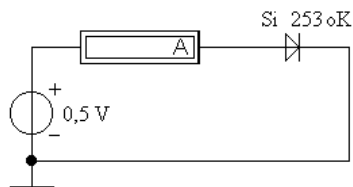


Рис.6

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе Si.

3). Установить значение ЭДС источника равным $1,2 \cdot U^*$ В. Активировать схему. Снять показания амперметра, занести данные в таблицу №2.

Табл.№2

$t = -20^{\circ}\text{C};$ $T = 253\text{K}$	$U_{\text{пр}}, \text{ мВ}$										
	$\Delta U_{\text{пр}}, \text{ мВ}$										
	$I_{\text{пр}}, \text{ мА}$										
	$\Delta I_{\text{пр}}, \text{ мА}$										
	$R_{\text{ст}}, \text{ Ом}$										
	$R_{\text{дин}}, \text{ Ом}$										
$t = 18^{\circ}\text{C};$ $T = 291\text{K}$	$U_{\text{пр}}, \text{ мВ}$										
	$\Delta U_{\text{пр}}, \text{ мВ}$										
	$I_{\text{пр}}, \text{ мА}$										
	$\Delta I_{\text{пр}}, \text{ мА}$										
	$R_{\text{ст}}, \text{ Ом}$										
	$R_{\text{дин}}, \text{ Ом}$										
$t = 80^{\circ}\text{C};$ $T = 353\text{K}$	$U_{\text{пр}}, \text{ мВ}$										
	$\Delta U_{\text{пр}}, \text{ мВ}$										
	$I_{\text{пр}}, \text{ мА}$										
	$\Delta I_{\text{пр}}, \text{ мА}$										
	$R_{\text{ст}}, \text{ Ом}$										
	$R_{\text{дин}}, \text{ Ом}$										

4). Постепенно, с произвольным шагом, снижая напряжение источника ЭДС, производить измерение тока р-п-перехода с последующей записью его величины в таблицу №2. Измерения производить (не менее 8 раз) до достижения тока порядка 0,5 мА.

5). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diodes», открыть папку «Si_291oK_вар», загрузить файл «Si_291oK_прям_№(1÷10)».

6). Номер варианта уточнить у преподавателя. При запросе, рис.7, «наступите» мышкой на клавишу «Нет».

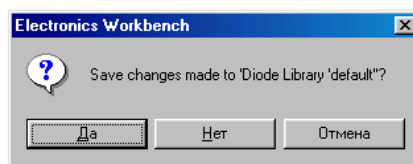


Рис.7

При запросе, рис.5, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model».

7). На экране монитора появится схема.

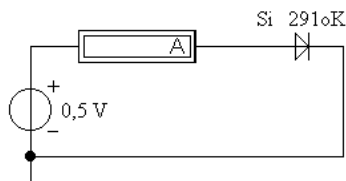


Рис.8

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе Si.

8). Выполнить требования пунктов 3), 4).

9). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diodes», открыть папку «Si_3530K_вар», загрузить файл «Si_3530K_прям_№(1 ÷ 10)».

10). Выполнить требования пункта 6).

11). На экране монитора появится схема.

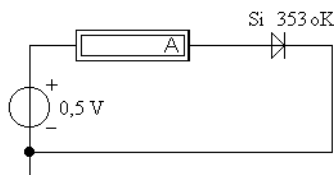


Рис.9

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе Si.

12). Выполнить требования пунктов 3), 4).

10.2. Снятие обратной ветви ВАХ p-n-перехода

1). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diodes», открыть папку «Si_2530K_вар», загрузить файл «Si_2530K_обрат». При запросе, рис.5, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model». На экране монитора появится схема.

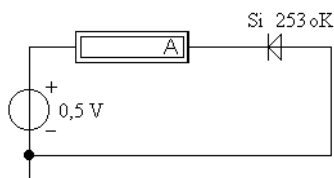


Рис.10.

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе Si.

2). Произвести измерение тока диода (с произвольным шагом) в интервале $[0 \div 1,2 \cdot U^*]$ (не менее 5 измерений). Результаты измерений занести в таблицу №3.

Табл.№3

t = - 20°C; T =253K	U _{обр} , В											
	Δ U _{обр} , мВ											
	I _{обр} , мА											
	Δ I _{обр} , мА											
	R _{ст} , Ом											
	R _{дин} , Ом											
t = 18°C; T =291K	U _{обр} , В											
	Δ U _{обр} , мВ											
	I _{обр} , мА											
	Δ I _{обр} , мА											
	R _{ст} , Ом											
	R _{дин} , Ом											
t = 80°C; T =353K	U _{обр} , В											
	Δ U _{обр} , мВ											
	I _{обр} , мА											
	Δ I _{обр} , мА											
	R _{ст} , Ом											
	R _{дин} , Ом											

3). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diods», открыть папку «Si_291oK_вар», загрузить файл «Si_291oK_обрат». При запросе, рис.7, «наступите» мышкой на клавишу «Нет». При запросе, рис.5, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model». На экране монитора появится схема.

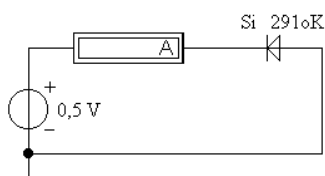


Рис.11

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе Si.

4). Выполнить указания пункта 2).

5). Из среды программирования Workbench 5.12, войти в каталог «Diods», открыть папку «Si_353oK_вар», загрузить файл «Si_353oK_обрат». При запросе, рис.7, «наступите» мышкой на клавишу «Нет». При запросе, рис.5, «наступите» мышкой на клавишу «Use circuit model». На экране монитора появится схема.

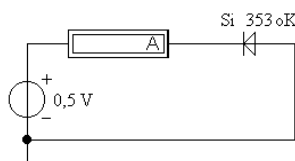


Рис.12

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, полупроводниковый диод на основе Si.

6). Выполнить указания пункта 2).

10.3. Анализ ВАХ и расчет параметров p-n-перехода

1). По полученным данным, табл.2, постройте графики функций: $I = f(U)$, подобные рис.1.

2). Руководствуясь выражениями (2), (3) и ВАХ, для всех температур, рассчитайте:

- статическое сопротивление (сопротивление p-n-перехода постоянному току);
- дифференциальное сопротивление (сопротивление p-n-перехода переменному току).

Данные, используемые в ходе расчетов, показать на ВАХ, результаты расчетов занести в таблицу №2.

3). Руководствуясь выражением (1), (4) и данными таблицы №1, рассчитайте коэффициент выпрямления p-n-перехода (при $U = \pm 1,2 \cdot U^*$ В) для Ge, Si, AsGa при $t=18^\circ\text{C}; T=291^\circ\text{K}$. Результаты вычислений занести в таблицу №3.

Табл.№3

Материал	ΔW , эВ	U^* , В	$I_{пр}$, мА	$R_{пр}$, Ом	$I_{обр}$, мкА	$R_{обр}$, МОм	K_B
Ge							
Si							
AsGa							

4). По данным таблицы №2 постройте графики функций $R_{cm} = f(T)$, $R_{дин} = f(T)$ подобные рис.2.

5). По данным таблицы №3 постройте графики функций: $R_{cm} = f(\Delta W)$, $R_{дин} = f(\Delta W)$ подобные рис.3; $K_B = f(\Delta W)$ подобный рис.4.

6). Сделайте выводы:

- о температурной зависимости электросопротивления p - n -перехода;
- о зависимости электросопротивления p - n -перехода от ширины запрещенной зоны (типа материала);
- о вентильных свойствах p - n -перехода (коэффициента выпрямления) от типа материала (ширины запрещенной зоны).

11. Содержание отчета о лабораторной работе:

в отчете должны быть отражены название, цель лабораторной работы, пункты исследований, таблицы с экспериментальными и расчетными данными, графики, необходимые математические выражения, выводы по работе.

Лабораторная работа №3

Исследование выпрямительных диодов

1 Цель работы:

Экспериментальное исследование параметров и характеристик полупроводниковых диодов.

2 Задание на исследование:

1. Исследовать вольтамперную характеристику и рассчитать параметры полупроводникового выпрямительного диода.
2. Исследовать вольтамперную характеристику и рассчитать параметры полупроводникового стабилитрона.

3 Краткие сведения из теории

Полупроводниковыми диодами называют электропреобразовательные приборы с одним электрическим переходом, имеющие два вывода.

Основной характеристикой полупроводникового диода является вольтамперная, представляющая собой зависимость тока протекающего через диод, от величины и полярности приложенного к нему напряжения.

Вольтамперная характеристика диода имеет две ветви. Ветвь расположенная в первом квадранте, соответствует прямому включению диода, а расположенная в третьем квадранте - обратному.

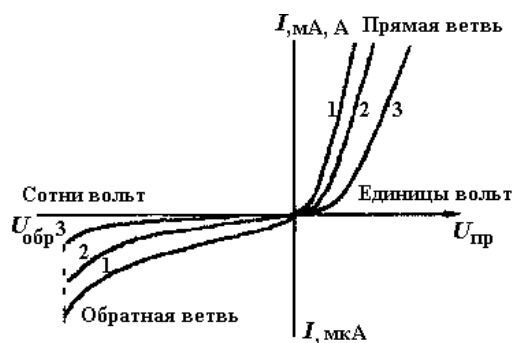


Рисунок 1 - Вольтамперная характеристика выпрямительного диода:
1 - при повышенной температуре; 2 - при нормальной температуре;
3 - при пониженной температуре

Основными параметрами диодов является

- 1). Дифференциальное сопротивление (сопротивление диода переменному току

$$R_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1)$$

- 2). Статическое сопротивление диода постоянному току

$$R_{np} = \frac{U_{np}}{I_{np}} ; \quad R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}} \quad (2)$$

3). Коэффициент выпрямления $K_B = I_{np} / I_{обр}$ при $U = \pm 1$ В. (3)

4). Обратное максимально допустимое напряжение $U_{обр} = 0,8 \cdot U_{проб}$ (4)

где $U_{проб}$ - напряжение теплового или электрического пробоя (от десятков до тысяч вольт).

Когда обратное напряжение диода достигает определенного критического значения, ток диода начинает резко возрастать. Это явление называют пробоем диода.

4 Порядок проведения исследований

4.1 Исследование вольтамперной характеристики и расчет параметров полупроводникового выпрямительного диода

4.1.1 Исследование прямой ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода

Собрать схему рисунок 2

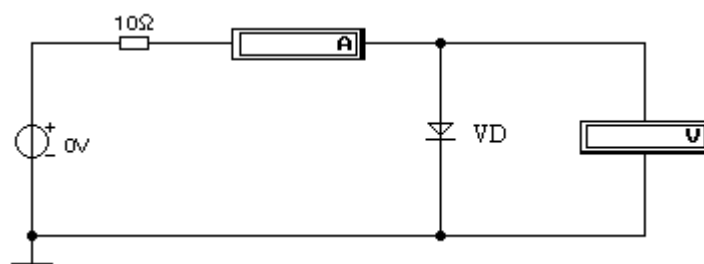


Рисунок 2

Схема содержит: источник ЭДС; резистор $R = 10$ Ом; амперметр; полупроводниковый диод; вольтметр.

Таблица 1- Тип исследуемого диода

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7	8
диод	1N3492	1N34923	1N3881	1N3889	1N3899	1N3903	1N4001	1N4002
Вариант №	9	10	11	12	13	14	15	16
диод	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	1N4148	1N4723	1N4724
Вариант №	17	18	19	20	21	22	23	24
диод	1N4933	1N4937	1N5400	1N5402	1N5404	1N4149	1N4150	1N4151
Вариант №	25	26	27	28	29	30	31	32
диод	1N4152	1N4153	1N4305	1N4446	1N4447	1N4448	1N914	1N914A
Вариант №	33	34	35	36	37	38	39	40
диод	1N914B	1N916	1N916A	1N916B	1N3899	1N4937	1N5402	1N4002

Установить требуемый тип диода.

Последовательно установить значения ЭДС источника равными: 5В; 4В; 3В; 2В; 1-0.4 В (через 0.1 В); 0 В.

Активизировать схему.

Показания измерительных приборов занести в таблицу 1.

Таблица 1

U _{пр} , мВ																
I _{пр} , мА																

По полученным данным, таблица 1 постройте график функции $I_{np} = f(U_{np})$.

4.1.2 Исследование обратной ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода

Собрать схему рисунок 3

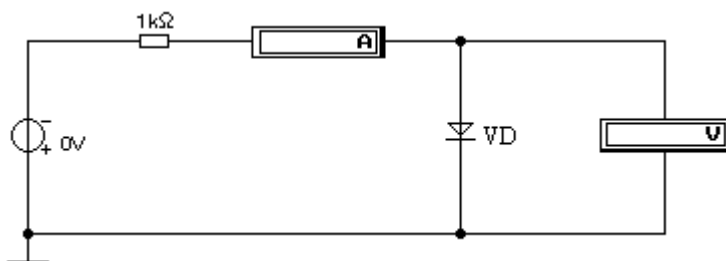


Рисунок 3

Схема содержит: источник ЭДС; резистор $R = 1 \text{ кОм}$; амперметр; полупроводниковый диод; вольтметр.

Последовательно установить значения ЭДС источника равными: 0 В; 10 В; 80 В; 98 В; 100 В; 101 В; 102 В.

Активизировать схему.

Показания измерительных приборов занести в таблицу 2.

Таблица 2

U _{обр} , В							
I _{обр} , мкА							

4.1.3 Анализ вольтамперной характеристики и расчет параметров полупроводникового выпрямительного диода

По полученным данным таблица 2, постройте график функции $I_{обр} = f(U_{обр})$.

Руководствуясь выражениями (1), (2), (3), (4) и вольтамперной характеристикой рассчитайте: дифференциальное сопротивление (изгиб прямой ветви вольтамперной характеристики);

статическое сопротивление (прямое, обратное при $U = \pm 0,75 \text{ В}$);

коэффициент выпрямления (при $U = \pm 0,75 \text{ В}$);

обратное максимально допустимое напряжение.

Данные для расчетов показать на вольтамперной характеристике.

Результаты вычислений занести в таблицу 3.

Таблица 3

$R_{\text{диф}}$, Ом	$R_{\text{ст.пр}}$, Ом	$R_{\text{ст.обр}}$, кОм	K_v	$U_{\text{обр}}$

Сделать выводы.

5 Контрольные вопросы

1. Поясните причины нелинейности вольтамперной характеристики выпрямительного полупроводникового диода.
2. Поясните причины нелинейности вольтамперной характеристики полупроводникового стабилитрона.
3. Дать определение и пояснить порядок расчета параметров выпрямительных диодов:
 - дифференциальное сопротивление
 - статическое сопротивление;
 - коэффициент выпрямления;
 - обратное максимально допустимое напряжение.
4. Дать определение и пояснить порядок расчета параметров полупроводникового стабилитрона
 - минимальный ток стабилизации;
 - максимальный ток стабилизации;
 - минимальное напряжение стабилизации;
 - максимальное напряжение стабилизации;
 - дифференциальное сопротивление в режиме стабилизации.

Система обозначений полупроводниковых диодов.

Лабораторная работа №4

Исследование диодов при различных схемах соединения

Цель: исследование вольтамперных характеристик при последовательном, параллельном и смешанном соединении полупроводниковых приборов

1 Задание на исследование

1. Для каждого элемента и участка цепи снять вольтамперную характеристику и построить их графики.
2. Для участка цепи рассчитать и построить эквивалентную вольтамперную характеристику.
3. По заданному значению напряжения (тока) определить ток (напряжение) в схеме.
4. Сравнить результаты расчета и эксперимента. Сделать выводы.

2 Краткие сведения из теории

При графическом методе расчета электрических цепей вольтамперные характеристики нелинейных элементов должны быть заданы (например, в табличной форме или получены при экспериментальном исследовании).

Метод сложения вольтамперных характеристик

а) последовательное соединение

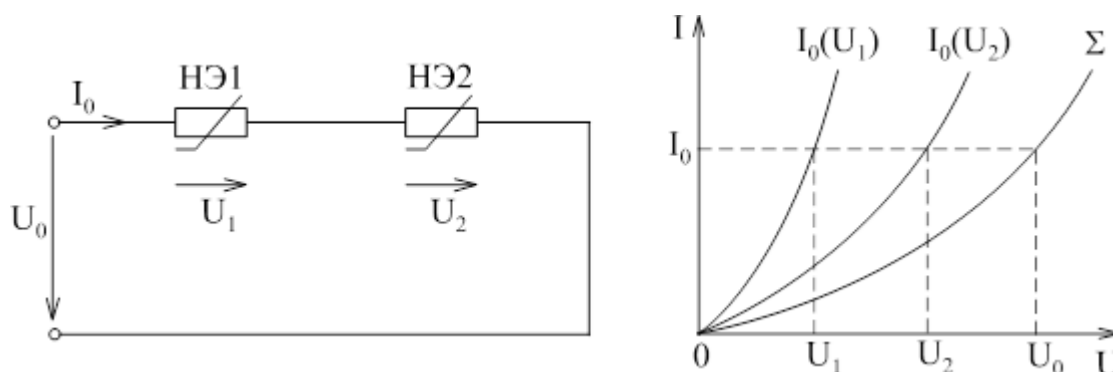


Рисунок 1

Поскольку при последовательном соединении элементов общее напряжение цепи равно сумме напряжений на элементах, эквивалентная (общая) вольтамперная характеристика может быть получена суммированием вольтамперных характеристик элементов по оси напряжений. Тогда, при заданном U_0 легко определить ток I_0 и напряжения U_1 и U_2 .

б) параллельное соединение

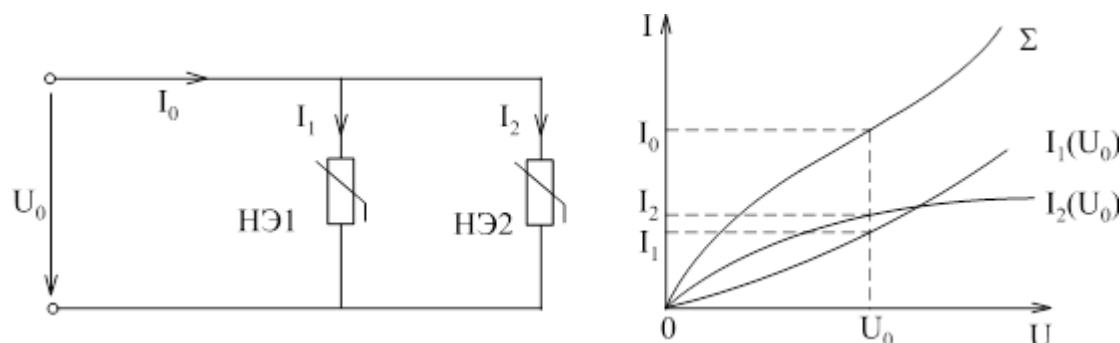


Рисунок 2

При параллельном соединении эквивалентная вольтамперная характеристика цепи получается суммированием вольтамперных характеристик элементов по оси токов.

в) смешанное соединение

При смешанном соединении построение вольтамперной характеристики цепи можно произвести поэтапно, используя правила для последовательного и параллельного соединений.

Метод нагрузочной характеристики

Рассмотрим этот метод на примере последовательного соединения нелинейного элемента НЭ1 и линейного R (рис.3).

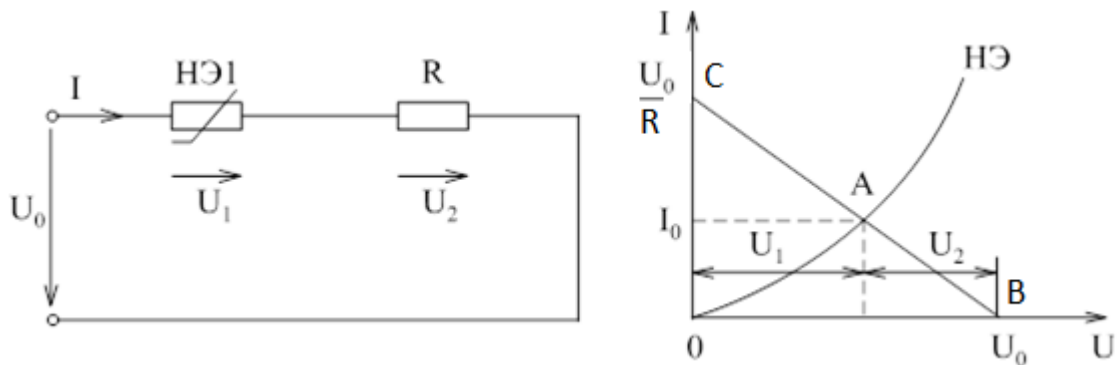


Рисунок 3

Характеристику нелинейного элемента $I=f(U_1)$ строят обычным образом. Нагрузочная характеристика линейного элемента, представляющая собой прямую линию, может быть построена по двум точкам. Если $I=0$, то характеристике $I=f(U_2)$ принадлежит точка "B", если $U_1=0$, то характеристика $I=f(U_2)$ пересекает ось ординат в точке "C", определяемой соотношением $I = U_0/R$. Точка пересечения двух графиков дает решение задачи.

3 Порядок проведения исследований

Собрать в среде **Electronics Workbench** (или **Multisim**) схему (рисунки 4, 5, 6, 7).

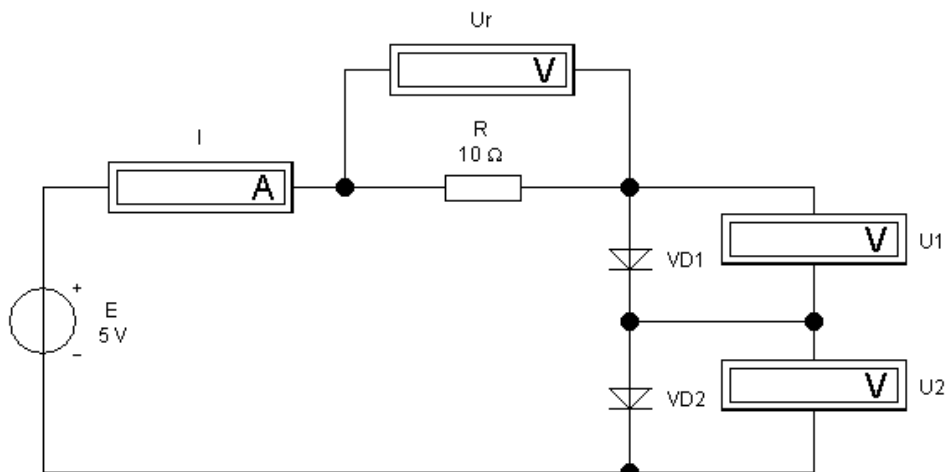


Рисунок 4 - Последовательное соединение

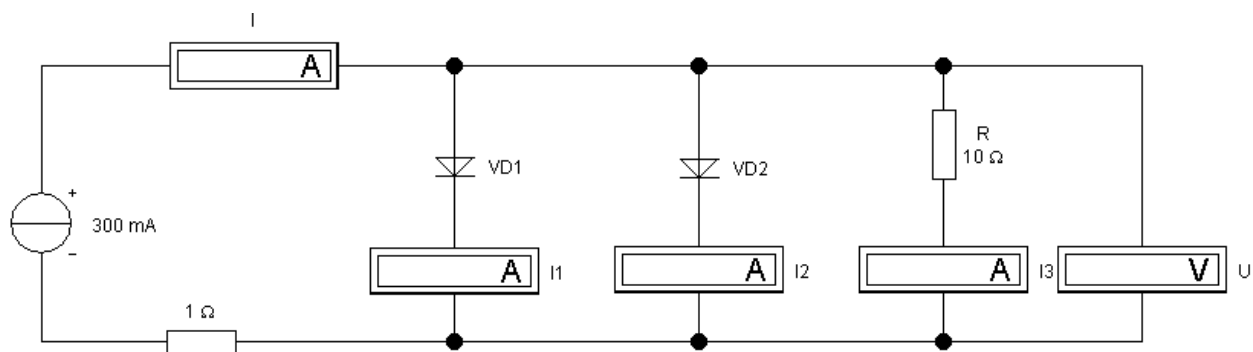


Рисунок 5 - Параллельное соединение

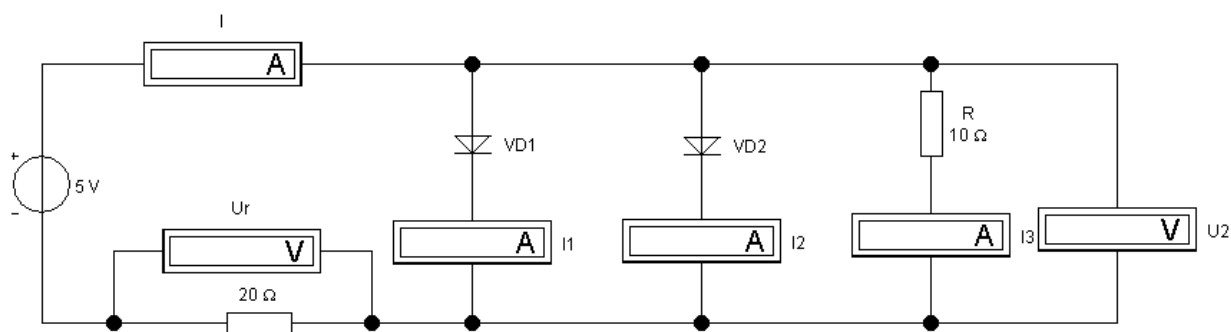


Рисунок 6 - Смешанное соединение 1

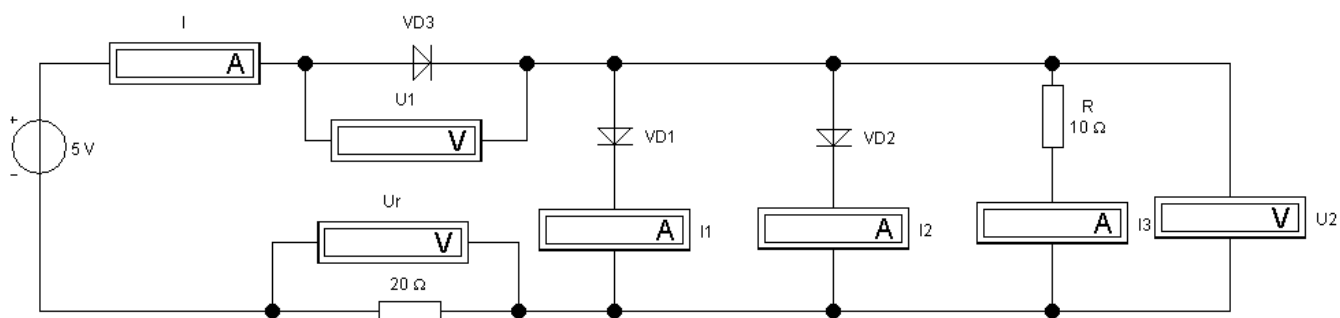


Рисунок 7 - Смешанное соединение 2

Схемы содержат: источник напряжения (или тока); резистор $R = 10 \text{ Ом}$; амперметры; полупроводниковые диоды; вольтметры.

Таблица 1- Тип диода

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7	8
диод	1N3064	1N3208	1N3491	1N3492	1N3493	1N3494	1N3901	1N3902
Вариант №	9	10	11	12	13	14	15	16
диод	1N3903	1N3909	1N3910	1N3911	1N3912	1N3913	1N4150	1N4305
Вариант №	17	18	19	20	21	22	23	24
диод	1N4446	1N4447	1N4933	1N4934	1N4935	1N4936	1N4937	1N4938
Вариант №	25	26	27	28	29	30	31	32
диод	1N5391	1N5400	1N4305	1N4446	1N4447	1N4448	1N914	1N914A
Вариант №	33	34	35	36	37	38	39	40
диод	1N914B	1N916	1N916A	1N916B	1N3899	1N4937	1N5402	1N4002

Установить требуемый тип диода.

Последовательно установить значения напряжение (или тока) источника (шаг изменения выбрать самостоятельно) от 0 В до значения при котором ток в диодах достигнет максимально допустимого (см. справочные данные на соответствующие диоды). Активизировать схему. Показания измерительных приборов занести в таблицу 1.

Таблица 1

E, В											
I, мА											
U_r , В											
U_1 , мВ											
U_2 , мВ											

По полученным данным таблицы 1 постройте графики вольтамперных характеристик отдельных элементов и всей цепи.

При исследовании остальных схем (рисунки 5-7) результаты представить в таблицах, подобных таблице 1

4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение вольтамперной характеристики элементов цепи.
2. Чем отличаются ВАХ линейных и нелинейных элементов электрических цепей?
3. Дайте определение статического и динамического (дифференциального) сопротивлений.
4. Поясните порядок графического расчёта неразветвленной нелинейной цепи постоянного тока.
5. Поясните порядок графо - аналитического расчёта неразветвленной нелинейной цепи постоянного тока.
6. Поясните порядок графического расчёта разветвлённой нелинейной цепи постоянного тока.

Лабораторная работа №5
Исследование схем выпрямления

Цель работы:

1. Экспериментальное исследование однофазных схем выпрямления.
2. Экспериментальное исследование трехфазных схем выпрямления.

Задание на подготовку к лабораторной работе:

- ознакомиться с руководством к лабораторной работе;

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источник переменного напряжения, резистор, конденсатор, осциллограф, и вольтметры. Осциллограф используется для определения вольтамперных характеристик и временных диаграмм токов и напряжений.

Задание на исследование:

1. Исследовать однополупериодный выпрямитель.
2. Исследовать мостовой выпрямитель.
3. Исследовать трехфазные схемы выпрямления.

Порядок проведения исследований

а) Исследование однополупериодного выпрямителя.

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 1).

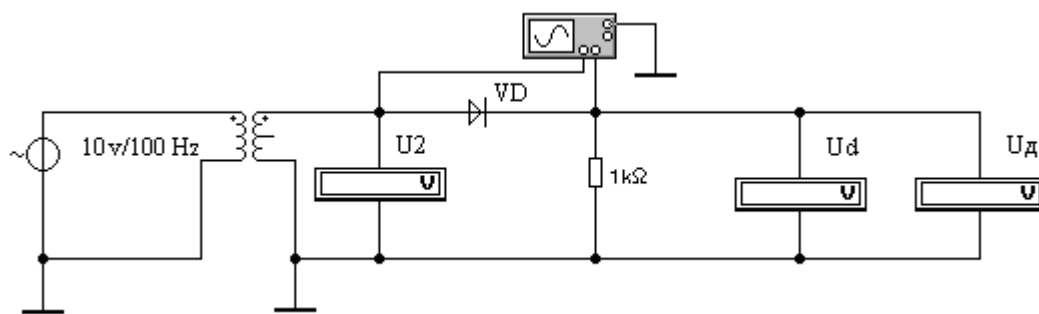


Рисунок 1 - Схема исследования однополупериодного выпрямителя

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R , значение ЭДС источника E и частоты f . Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить цвет канала красный. Вольтметры U_2 и U_d перевести в режим измерения переменного тока.

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
E, В	50	60	70	80	90	10	11	40	55	65	75
R, кОм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2
f, Гц	100	120	150	200	300	400	500	600	700	800	900
№ варианта	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
E, В	53	64	77	88	95	100	85	45	56	66	78
R, кОм	6	7	8	9	6	4	5	6	8	3	5
f, Гц	300	400	500	600	700	800	150	200	300	400	500
№ варианта	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
E, В	7.2	8.5	4.8	5.9	6.3	5.4	6.7	7.6	8.2	9.3	5.8
R, кОм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2
f, Гц	600	700	800	600	200	100	300	500	400	700	900

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания вольтметров занести в таблицу результатов исследований. Рассчитать коэффициент пульсаций $K_p = \frac{U_d}{U_{\text{д}}}$

4. С помощью осциллографа определить временные диаграммы напряжений на входе и выходе схемы выпрямления. Осциллограммы представить в отчете.

5. В схеме подсоединить конденсатор С параллельно резистору R. Установить емкость конденсатора $C = 1 \text{ мкФ}$, выполнить п.п. 3-4.

6. Рассчитать коэффициент сглаживания фильтра $q = K_p / K_{\text{пс}}$

7. Установить емкость конденсатора $C = 50 \text{ мкФ}$, выполнить п.п. 3-4,6.

8. По результатам исследований сделать выводы.

б) Исследование двухполупериодного (мостового) выпрямителя

1.Собрать схему электрической цепи (рисунок 2).

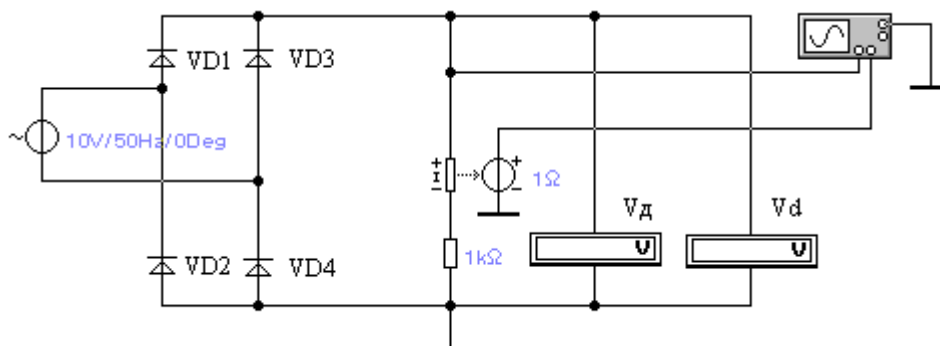


Рисунок 2 - Схема исследования мостового выпрямителя

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R , значение ЭДС источника E и частоты f . Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить желательный цвет канала (например, красный). Вольтметры U_d перевести в режим измерения переменного тока.

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания вольтметров занести в таблицу результатов исследований. Рассчитать коэффициент пульсаций $K_p = \frac{U_d}{U_d}$

4. С помощью осциллографа определить временные диаграммы напряжений на входе и выходе схемы выпрямления. Осциллограммы представить в отчете.

5. В схеме подсоединить конденсатор C параллельно резистору R . Установить емкость конденсатора $C=1$ мкФ, выполнить п.п. 3-4.

6. Рассчитать коэффициент сглаживания фильтра $q = K_p / K_{пс}$

7. Установить емкость конденсатора $C=50$ мкФ, выполнить п.п. 3-4, 6

8. По результатам исследований сделать выводы.

в) Исследование трехфазной однополупериодной схемы выпрямления

1. Собрать схему электрической цепи рисунок 3.

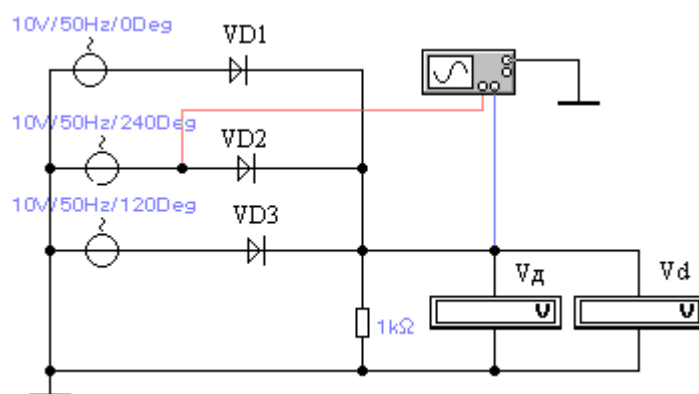


Рисунок 3 - Схема исследования трехфазной однополупериодной схемы выпрямления

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R , значение ЭДС источника и частоты f . Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить цвет канала красный. Вольтметр U_d перевести в режим измерения переменного тока.

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». Показания вольтметров занести в таблицу результатов исследований. Рассчитать коэффициент пульсаций $K_p = \frac{U_d}{U_d}$

4. С помощью осциллографа определить временные диаграммы напряжений на входе и выходе схемы выпрямления. Осциллограммы представить в отчете.

5. В схеме подсоединить конденсатор С параллельно резистору R. Установить емкость конденсатора $C=1$ мкФ, выполнить п.п. 3-4.

6. Рассчитать коэффициент сглаживания фильтра $q=K_p/K_{пс}$

7. Установить емкость конденсатора $C=50$ мкФ, выполнить п.п. 3-4,6.

8. По результатам исследований сделать выводы.

г) Исследование трехфазной двухполупериодной схемы выпрямления

1.Собрать схему электрической цепи (рисунок 4).

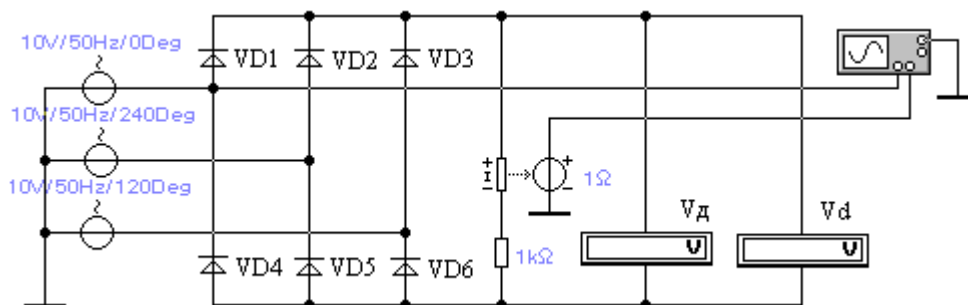


Рисунок 4 - Схема исследования трехфазной двухполупериодной схемы выпрямления

2.Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R, значение ЭДС источника E и частоты f. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить красный цвет. Вольтметр U_d перевести в режим измерения переменного тока.

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». Показания вольтметров занести в таблицу результатов исследований. Рассчитать коэффициент пульсаций $K_p = \frac{U_d}{U_d}$

4. С помощью осциллографа определить временные диаграммы напряжений на входе и выходе схемы выпрямления. Осциллограммы представить в отчете.

5. В схеме подсоединить конденсатор С параллельно резистору R. Установить емкость конденсатора $C=10$ мкФ, выполнить п.п. 3-4.

6. Рассчитать коэффициент сглаживания фильтра $q=K_p/K_{пс}$

7. Установить емкость конденсатора $C=50$ мкФ, выполнить п.п. 3-4,6.

8. По результатам исследований сделать выводы.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- схемы исследований;
- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;
- временные диаграммы напряжений
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы однополупериодной схемы выпрямления
2. Назовите основные параметры и характеристики однополупериодной схемы выпрямления
3. Поясните принцип работы двухполупериодной схемы выпрямления со средней точкой
4. Назовите основные параметры и характеристики двухполупериодной схемы выпрямления со средней точкой
5. Поясните принцип работы мостовой схемы выпрямления
6. Назовите основные параметры и характеристики мостовой схемы выпрямления
7. Поясните принцип работы трехфазной мостовой схемы выпрямления
8. Назовите основные параметры и характеристики трехфазной мостовой схемы выпрямления
9. Поясните принцип работы емкостного сглаживающего фильтра
10. Поясните принцип работы индуктивного сглаживающего фильтра

Лабораторная работа №6

Исследование стабилитронов

1 Цель работы:

Экспериментальное исследование характеристик и параметров стабилитронов.

2 Задание на исследование:

1. Исследовать вольтамперную характеристику и рассчитать параметры полупроводникового стабилитрона.

3 Краткие сведения из теории

Стабилитрон – это сильно легированный кремниевый диод, на котором напряжение сохраняется с определённой точностью при изменении протекающего через него тока в заданном диапазоне. Стабилитроны в основном используют в параметрических стабилизаторах напряжения (рис. 1, а), в которых максимальное напряжение на нагрузке U_n ограничено некоторой заданной величиной.

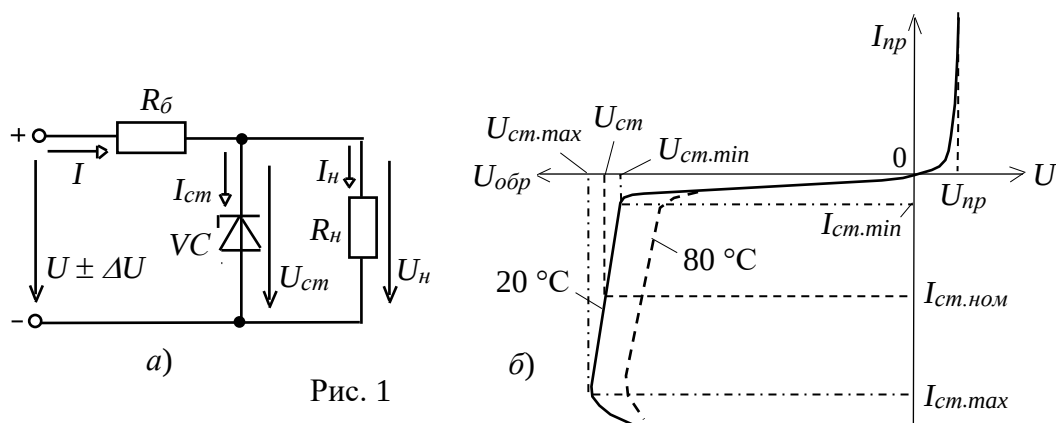


Рис. 1

Рабочим участком ВАХ стабилитрона VC является участок обратной её ветви, соответствующий области обратного электрического пробоя p - n -перехода (рис. 1, б) и ограниченный минимальным $I_{cm.min}$ и максимальным $I_{cm.max}$ значениями тока.

При работе в этой области обратное напряжение на стабилитроне U_{cm} незначительно изменяется при относительно больших изменениях тока стабилитрона I_{cm} . Поэтому при изменении входного напряжения

$$U \pm \Delta U = \pm U_{\delta} + U_{cm}$$

изменяется в основном напряжение $\pm U_{\delta} = R_{\delta} I$ на балластном резисторе R_{δ} , где входной ток

$$I = I_{cm} + I_n \text{ (см. рис. 1, а).}$$

При прямом включении стабилитрон VC может рассматриваться как обычный диод, однако в связи с повышенной концентрацией примесей напряжение $U_{np} \approx 0,3 \dots 0,4$ В мало изменяется при значительных изменениях прямого тока I_{np} (см. рис. 1, б). Прибор, в котором используется прямая ветвь в схемах стабилизации напряжения, называют *стабистором*.

Основными параметрами стабилитрона являются:

- $U_{cm} = 3 \dots 180$ В – напряжение на стабилитроне;

- $R_{\partial} = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta I_{cm}} = \frac{U_{cm.max} - U_{cm.min}}{I_{cm.max} - I_{cm.min}}$ – динамическое сопротивление на участке

стабилизации;

- $I_{cm.min}$ и $I_{cm.max}$ – минимальный и максимальный токи стабилизации (номинальный ток $I_{cm.ном} = (I_{cm.max} + I_{cm.min}) / 2$ от 5 мА до 5 А);

- $TKH\% = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta T} 100 = 0,3 \dots 0,4$ %/град – температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации, характеризующий относительное изменение напряжения стабилизации, вызванное изменением температуры на 1 °С при постоянном токе, протекающем через стабилитрон.

Примеры маркировки отечественных стабилитронов:

КС168А ($U_{cm} = 6,8$ В); Д814В ($U_{cm} = 9 \dots 10$ В; $I_{cm} = 3 \dots 30$ мА).

4 Порядок проведения исследований

Исследование проводится в среде NI Multisim 12

4.1 Исследование прямой ветви вольтамперной характеристики полупроводникового стабилитрона

Собрать схему рисунок 2.

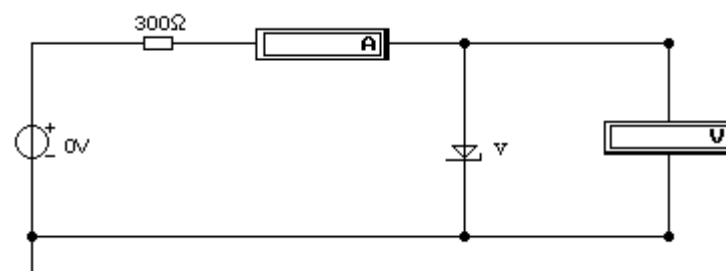


Рисунок 2

Схема содержит: источник ЭДС; резистор $R = 300$ Ом; амперметр; полупроводниковый стабилитрон; вольтметр.

Таблица 1 - Тип исследуемого стабилитрона

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7	8
стабилитрон	1N4461 1N4481	1N4462 1N4482	1N4463 1N4483	1N4464 1N4484	1N4465 1N4485	1N4466 1N4486	1N4467 1N4487	1N4468 1N4488
Вариант №	9	10	11	12	13	14	15	16
стабилитрон	1N4469 1N4488	1N4470 1N4490	1N4471 1N4491	1N4472 1N4492	1N4473 1N4493	1N4474 1N4494	1N4475 1N4495	1N4476 1N4496

Установить согласно варианту тип стабилитрона (таблица 1).

Последовательно установить значения ЭДС источника равными: 1В-0В (через 0.1 В).

Активизировать схему.

Показания измерительных приборов занести в таблицу 2.

Таблица 2

U _{пр} , мВ										
I _{пр} , мА										

4. 2 Исследование обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона

Собрать схему рисунок 3

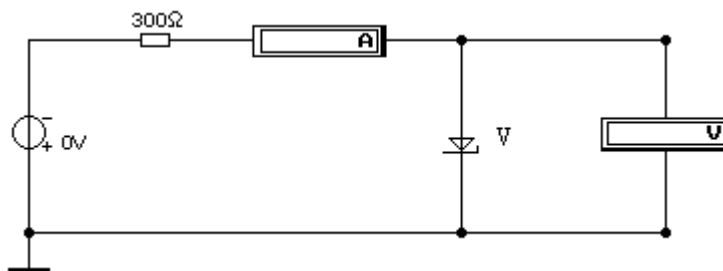


Рисунок 3

Схема содержит: источник ЭДС; резистор $R = 300 \text{ Ом}$; амперметр; полупроводниковый стабилитрон; вольтметр.

Последовательно установить значения ЭДС источника равными: 0 В- 1.1U_{ст} (U_z для заданного типа прибора см. параметры состав модели) В.

Шаг изменения напряжения выбрать исходя из значения U_{ст}

Активизировать схему.

Показания измерительных приборов занести в таблицу 3.

Таблица 3

U _{обр} , мВ								
I _{обр} , мА								

4. 3 Исследование вольтамперной характеристики стабилитрона

с помощью характериографа XIV1

В библиотеке **Instruments** среды MS12 имеется построитель ВАХ диодов и транзисторов (**IV ANALYZER**). Подключив с помощью переключателя **A** соответствующие выводы диода **VD**

или стабилитрона **VC** к входам прибора **XIV1** (рис. 4) и задав предельные значения входного напряжения в закладке, открываемой командой **Sim. Param** (Simulate Parameters), нужно запустить программу моделирования ВАХ, щелкнув мышью на кнопке  среды MS12.

В качестве примера на рис. 4 представлен рабочий участок ВАХ стабилитрона **VC** типа **1N4747A** с напряжением пробоя $U_{cm..min} = -20$ В и заданными пределами напряжения: **Start:**

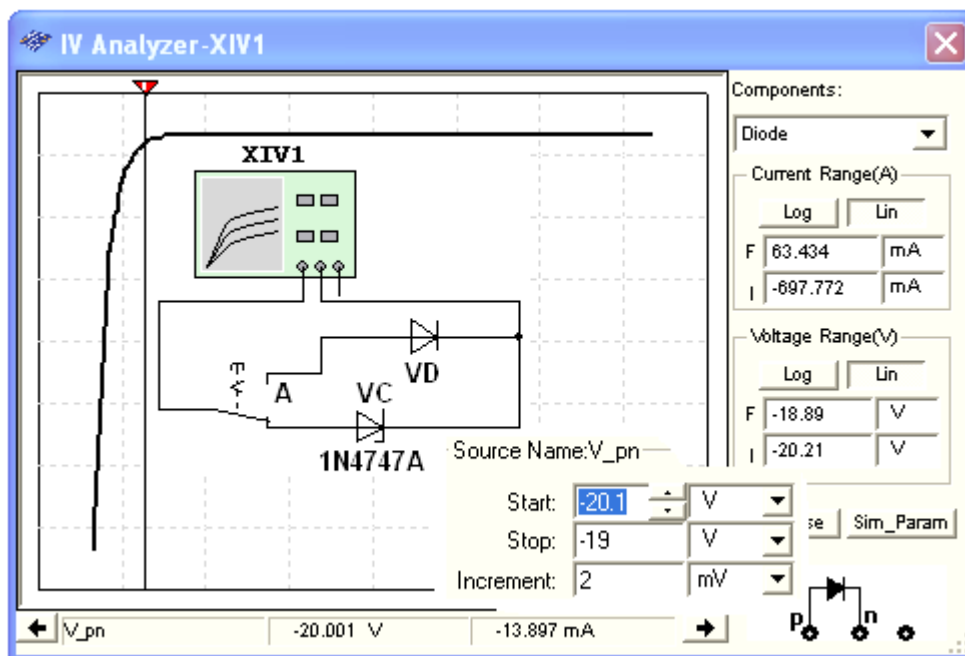


Рис. 4

$U = -20,1$ В; **Stop:** $U = -19$ В; **Increment** = 2 мВ. Установленные пределы при моделировании автоматически увеличиваются. Изменяя пределы напряжения, можно смоделировать и исследовать отдельные участки ВАХ диодов и стабилитронов. Координаты точек ВАХ удобно определять с помощью визирной линии, перемещая её в горизонтальном направлении.

Координаты точки пересечения ВАХ стабилитрона визирной линией выводятся в нижней строке окна прибора **XIV1** (см. рис. 5): напряжение на стабилитроне $U_{cm} = -20$ В и ток $I_{cm} \approx -14$ мА.

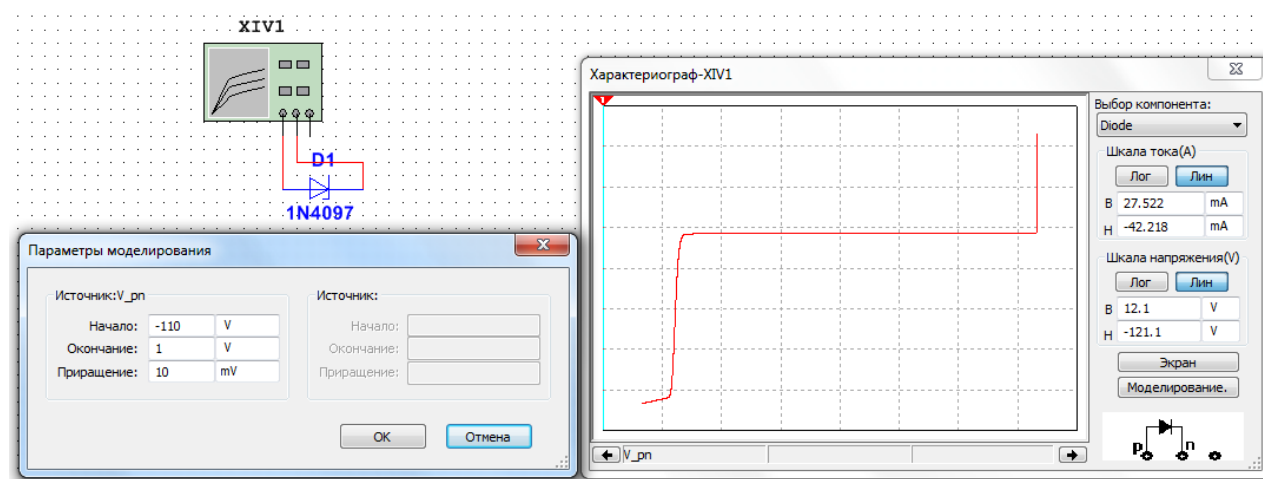


Рисунок 5

Собрать схему испытания стабилитрона (рис. 6, а). Согласно варианту задания (см. табл. 1) выбрать в библиотеке **Zener** тип стабилитрона **VC**, рассчитать и установить параметры элементов схемы. С этой целью:

– после двойного щелчка мышью на изображении стабилитрона **VC** в открывшемся окне щёлкнуть мышью на кнопке команды **Replace** (Заменить), затем последовательно на кнопках команд или заставок **Diodes/Zener/ 1N47..A/Detail Report**, где **1N47..A** тип стабилитрона (рис. 7). Выписать из отмеченных эллипсами закладок значения напряжения пробоя (**Vz**) стабилитрона и тока (**Iz**), например для типа **1N4747A** $U_{cm.min} = 20$ В и ток $I_{cm.min} = 12,5$ мА, и занести их в табл. 4;

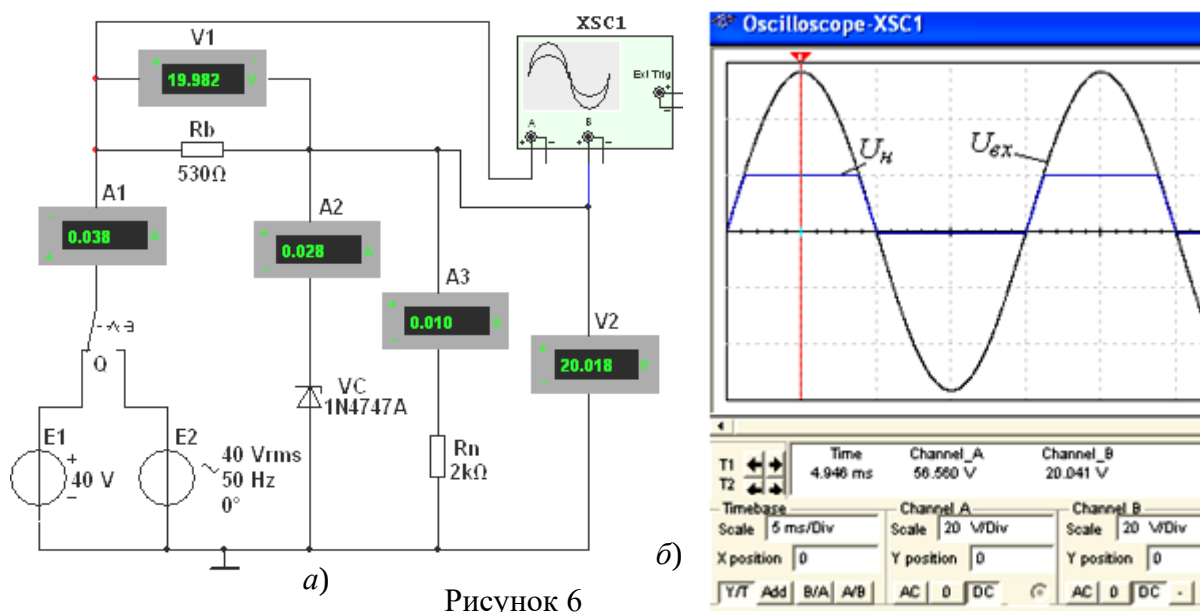


Рисунок 6

– последовательно щелкая мышью на элементах схемы, установить в открывающихся окнах параметры (**Value**) остальных элементов схемы (рис. 6): ЭДС источника $E_1 = E_2 = |2U_{cm.ном}| \approx 40$ В, где $U_{cm.ном} \approx 1,001U_{cm.min}$; сопротивление балластного резистора

$$R_b \approx U_{cm.ном} / I_{cm.ном} = 20,02 / (37,5 \cdot 10^{-3}) \approx 530 \text{ Ом, где } I_{cm.ном} \approx 3I_{cm.min}. \text{ Принять}$$

сопротивление нагрузки $R_n = 2$ кОм;

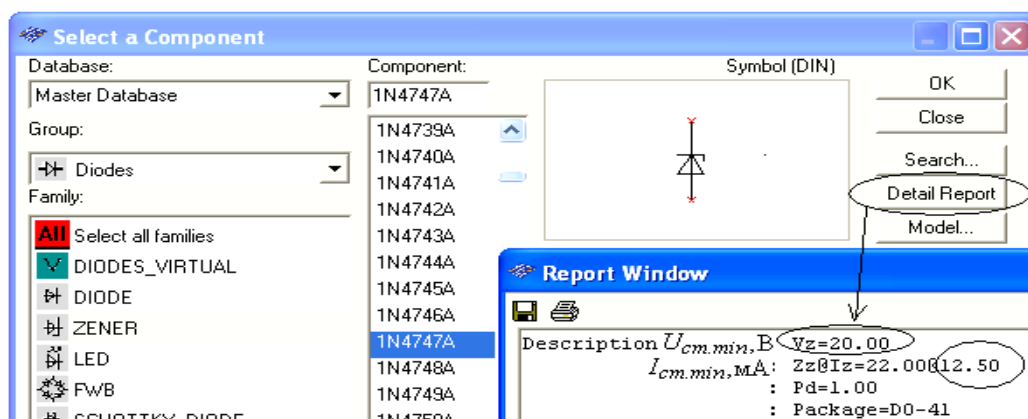


Рисунок 7

– **запустить** программу MS12. **Скопировать** изображение схемы (рис. 6, а) на страницу отчёта;

– изменяя входное напряжение $U_{вх}$ на 10 % (от 0,95 до 1,05 E_1), **занести** показания приборов **V2** и **A2** в табл. 4 и **определить**:

– изменение напряжения на нагрузке (в процентах) по формуле

$$\Delta U\% = \frac{U_{ст2} - U_{ст1}}{U_{ст.ном}} 100,$$

где $U_{ст.ном} = (U_{ст2} + U_{ст1})/2$;

– динамическое сопротивление стабилитрона

$$R_{ст.дин} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} = \frac{U_{ст2} - U_{ст1}}{I_{ст2} - I_{ст1}}.$$

Рассчитанные значения $\Delta U\%$ и $R_{ст.дин}$ **занести** в табл. 4;

Т а б л и ц а 4

Варианты	Тип стабилитрона	$U_{ст.мин}$ В	$I_{ст.мин}$ мА	$U_{ст.ном}$ В	$U_{вх} =$ = 0,95 E_1 , В		$U_{вх} =$ = 1,05 E_1 , В	
					$U_{ст1}$, В	$I_{ст1}$, мА	$U_{ст2}$, В	$I_{ст2}$, мА
1...30	1N4731A	...	...	...	...	...	...	...
	1N4760A				...	...	...	...
$N = \dots$	1N47...A				$\Delta U_{ст}, \%$		$R_{ст.дин}, \text{Ом}$	
					...		...	

– **установить** переключатель **Q** в правое положение, **запустить** программу, **установить** визирную линию на экране осциллографа **XSC1** приблизительно на максимальное значение положительной полуволны синусоидального напряжения (см. рис. 7, б) и **убедиться**, что напряжение на нагрузке ограничено по амплитуде уровнем напряжения $U_{ст.ном}$.

4. 4 Анализ вольтамперной характеристики и расчет параметров полупроводникового стабилитрона

По полученным данным, таблицы 2,3 постройте графики функций $I_{np} = f(U_{np})$;

$I_{обр} = f(U_{обр})$. Сравнить с графиком, полученным с помощью характериографа XIV1.

На основе анализа полученной вольтамперной характеристики определите значения: $I_{ст.мин}$; $I_{ст.маx}$; $U_{ст.мин}$; $U_{ст.маx}$.

Руководствуясь выражением (1), рассчитайте дифференциальное сопротивление стабилитрона в режиме стабилизации.

Данные для расчетов показать на вольтамперной характеристике. Результаты вычислений занести в таблицу 5.

Таблица 5

$R_{\text{диф}}$, Ом	$I_{\text{ст. min}}$, мА	$I_{\text{ст. max}}$, мА	$U_{\text{ст. min}}$, В	$U_{\text{ст. max}}$, В

Сделать выводы.

5 Контрольные вопросы

1. Поясните причины нелинейности вольтамперной характеристики р-п-перехода.
2. Дать определение и пояснить порядок расчета параметров
 - минимальный ток стабилизации;
 - максимальный ток стабилизации;
 - минимальное напряжение стабилизации;
 - максимальное напряжение стабилизации;
 - дифференциальное сопротивление в режиме стабилизации.

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Укажите, какой **формулой** описывается ВАХ р-п-перехода?

$$\begin{array}{ccccccc}
 U = RI & I = GU & I = I_0(e^{U/\varphi_T} - 1) & I = \alpha U^{3/2} \\
 \bigcirc & \bigcirc & \bigcirc & \bigcirc
 \end{array}$$

($\varphi_T \approx 25$ мВ – температурный потенциал электрона при температуре $t = 20$ °С)

2. Назовите типы **пробоев** р-п-перехода и дайте их краткую характеристику.

3. Укажите, какой **участок** ВАХ стабилитрона является рабочим?

Прямой Обратный Вся ВАХ ☐ Участок с отрицательным
☐ ☐ ☐ дифференциальным сопротивлением

4. Известны параметры стабилитрона: $U_{\text{ст. ном}} = 30$ В; $I_{\text{ст. min}} = 10$ мА; $I_{\text{ст. max}} = \quad = 50$ мА;
 $I_{\text{ст. ном}} = (I_{\text{ст. max}} + I_{\text{ст. min}})/2 = (50 + 10)/2 = 30$ мА. Укажите, чему равно **динамическое сопротивление стабилитрона** в окрестности рабочей точки (считая рабочий участок ВАХ стабилитрона линейным), если напряжение на стабилитроне на рабочем участке не должно изменяться более 0,1 %?

0,3 Ом 0,5 Ом 0,75 Ом 1,0 Ом 1,25 Ом
☐ ☐ ☐ ☐ ☐

5. Для параметрического стабилизатора справедливо соотношение

$$\Delta U_{\text{ст}} / \Delta U_{\text{вх}} = R_{\text{ст. дин}} / (R_{\text{б}} + R_{\text{ст. дин}}).$$

Откуда следует, что сопротивление балластного резистора

$$R_{\bar{\sigma}} = (\Delta U_{\text{вх}} / \Delta U_{\text{ст}} - 1) R_{\text{ст.дин}}.$$

Укажите, чему равно **сопротивление балластного резистора** в схеме стабилизации напряжения, если напряжение на её входе $U_{\text{вх}}$, равное 60 В, изменяется на $\pm 10\%$, а изменение напряжения на стабилитроне не превышает $\pm 0,1\%$? Номинальное напряжение стабилитрона $U_{\text{ст.ном}} = 30$ В, а его динамическое сопротивление $R_{\text{ст.дин}} = 1$ Ом.

≈ 200 Ом 300 Ом ≈ 500 Ом 750 Ом $\approx 1,0$ кОм

☐

☐

☐

☐

☐

6. Укажите **соотношение** между статическим $R_{\text{ст.стат}}$ и динамическим $R_{\text{ст.дин}}$ сопротивлениями на рабочем участке ВАХ типовых кремниевых стабилитронов.

$$R_{\text{ст.стат}} = R_{\text{ст.дин}}$$

$$R_{\text{ст.стат}} < R_{\text{ст.дин}}$$

$$R_{\text{ст.стат}} > R_{\text{ст.дин}}$$

☐

☐

☐

Лабораторная работа №7

Исследование варикапов

1 Цель работы:

Экспериментальное исследование барьерной емкости варикапа.

2 Задание на исследование:

Исследовать вольт-фарадную характеристику и рассчитать параметры варикапа.

3 Краткие сведения из теории

Барьерная емкость р-п-перехода проявляется при приложении к р-п-переходу изменяющегося во времени напряжения. При этом через р-п-переход проходит ток. Та доля тока, которая не связана с движением носителей заряда через р-п-переход, и определяет барьерную емкость. Барьерная емкость связана с прохождением токов смещения. Для одномерного плоского р-п-перехода ток (плотность тока) смещения, одинаковый во всех его сечениях,

$$i = S \cdot J_{см} = S \cdot \frac{d(\epsilon \epsilon_0 E)}{dt}, \quad (1)$$

где S — площадь р-п-перехода.

Для резкого р-п-перехода,

$$C_{бар} = S \cdot \sqrt{\frac{q \epsilon \epsilon_0 \cdot N_{A.p} \cdot N_{Д.п}}{2(N_{A.p} + N_{Д.п}) \cdot (\phi_{кон} - U)}} \quad (2)$$

Для резкого несимметричного р-п-перехода

$$C_{бар} = S \sqrt{\frac{q \epsilon \epsilon_0 N}{2(\phi_{кон} - U)}}, \quad (3)$$

где N — концентрация примесей в слаболегированной области.

Для плавного р-п-перехода с линейным распределением концентрации примесей

$$C_{бар} = S \cdot \sqrt[3]{\frac{(\epsilon \cdot \epsilon_0)^2 \cdot q \cdot a}{12 \cdot (\phi_{кон} - U)}}, \quad (4)$$

где a — градиент концентрации заряда

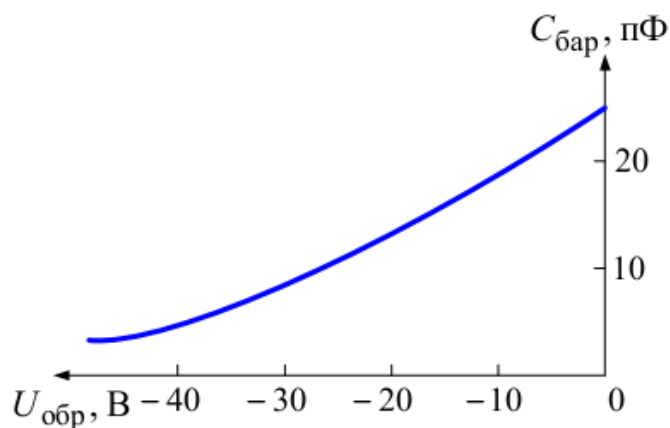


Рисунок 1 - Вольт-фарадная характеристика р-п-перехода

4 Порядок проведения исследований

Исследование проводится в среде NI Multisim 12 (или NI Multisim 11)

Собрать схему рисунок 2.

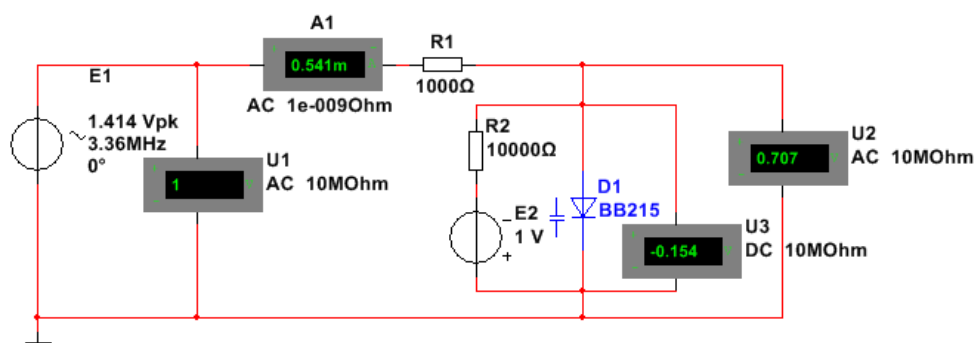


Рисунок 2

Схема содержит: источник ЭДС переменного тока (E1), источник ЭДС постоянного тока (E2), амперметр A1, резисторы R1 и R2, варикап; вольтметры (U1 и U2 в режиме AC; U3 в режиме DC).

Таблица 1 - Тип исследуемого варикапа

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7	8
варикап	BB112 BB909A	BB119 BB909B	BB130 BB910	BB215 BB910	BB219 BB911	BB240 BBY31	BB241 BBY40	BB249 BBY42
Вариант №	9	10	11	12	13	14	15	16
варикап	BB417 BBY62	BB512 MA321	BB515 MA329	BB619 MA331	BB620 MA333	BB629 MA334	BB809 MA335	BB811 MA337

Установить согласно варианту тип прибора (таблица 1).

Установить значения ЭДС источника постоянного тока (E2) равным 0.1 В.

Установить значения ЭДС источника переменного тока (E1) равным 1.414 В.

Изменяя частоту источника переменного тока (1 МГц...10 МГц), получить показания вольтметра (U2), подсоединенного к варикапу, равным 0.707 В.

Рассчитать величину барьерной емкости

$$C_{\text{бар}} = \frac{1}{2\pi f R_1}$$

Установить значения ЭДС источника постоянного тока (E2) равным 1;2;3;4; 5;..10 В. Изменяя частоту источника переменного тока (1 МГц...10 МГц), получить показания вольтметра (U2), равным 0.707 В. Рассчитать величину барьерной емкости. Результаты расчета занести в таблицу 2.

Таблица 2

U _з , В															
f, МГц															
C _{бар} , пФ															

Построить график вольт - фарадной характеристики.

Рассчитайте статические и дифференциальные значения барьерной емкости.

Данные для расчетов показать на вольт-фарадной характеристике.

Сделать выводы.

5 Контрольные вопросы

3. Поясните причины нелинейности вольт-фарадной характеристики перехода.
4. Поясните причины образования диффузионной емкости.
5. Поясните причины образования барьерной емкости.
6. Дать определение и пояснить порядок расчета параметров
 - статическое значения барьерной емкости,
 - дифференциальное значения барьерной емкости.

Лабораторная работа №8
Исследование диодов Шоттки

1 Цель работы:

Экспериментальное исследование электрического перехода металл - полупроводник.

2 Задание на исследование:

Исследовать вольтамперную характеристику и рассчитать параметры диода Шоттки.

3 Краткие сведения из теории

Основной характеристикой полупроводниковых приборов является вольтамперная характеристика, представляющая собой зависимость тока протекающего через переход, от величины и полярности приложенного к нему напряжения.

Вольтамперная характеристика имеет две ветви. Ветвь, расположенная в первом квадранте, соответствует прямому включению перехода, а расположенная в третьем квадранте - обратному.

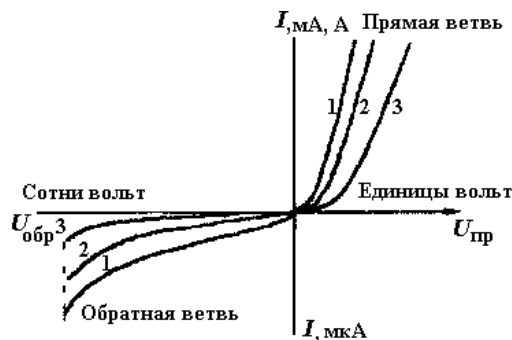


Рисунок 1 - Вольтамперная характеристика перехода металл - полупроводник
Основными параметрами является

1). Дифференциальное сопротивление (сопротивление переменному току

$$R_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1)$$

2). Статическое сопротивление диода постоянному току

$$R_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}} ; \quad R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}} \quad (2)$$

3). Обратное максимально допустимое напряжение $U_{обр} = 0,8 \cdot U_{проб}$ (3)

где $U_{проб}$ - напряжение теплового или электрического пробоя (от десятков до тысяч вольт).

4 Порядок проведения исследований

Исследование проводится в среде NI Multisim 12

4.1 Исследование прямой ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода Шоттки

Собрать схему рисунок 2.

Схема содержит: источник ЭДС, амперметр, диод Шоттки; вольтметр.

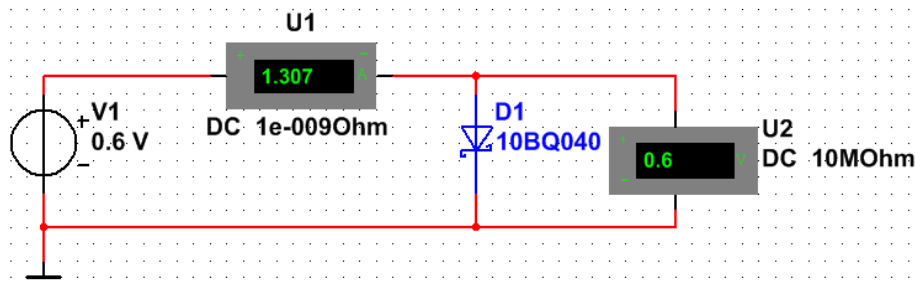


Рисунок 2

Таблица 1 - Тип исследуемого диода Шоттки

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7	8
диод	1BQ015 1N5824	10BQ040 1N5825	10TQ045 1N5826	12CTQ045 1N5827	12TQ045 1N5828	18TQ045 1N5829	1N5817G 1N5830	1N5818G 1N5831
Вариант №	9	10	11	12	13	14	15	16
диод	1N5819G 1N5832	1N5819G 1N5833	1N5820 1N5834	1N5821 1N5817RLG	1N5821G 1N5818RLG	1N5822 1N5819RLG	1N5822G 1N5820RLG	1N5823 1N5821RLG

Установить согласно варианту тип диода (таблица 1).

Последовательно установить значения ЭДС источника равными: 0.6,0.58,...,0В (через 0.02 В).

Активизировать схему.

Показания измерительных приборов занести в таблицу 2.

Таблица 2

$U_{пр}$, мВ										
$I_{пр}$, мА										

4. 2 Исследование обратной ветви вольтамперной характеристики диода Шоттки

Собрать схему рисунок 3

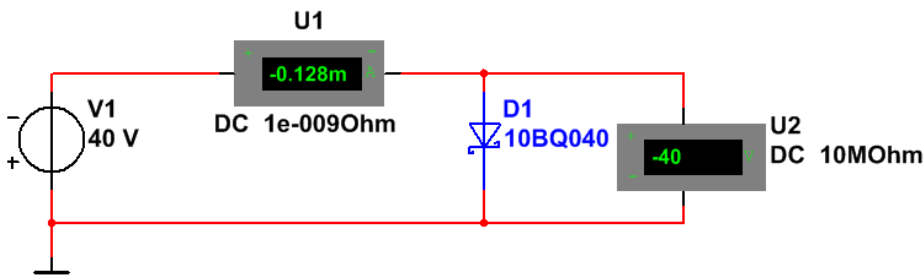


Рисунок 3

Схема содержит: источник ЭДС; амперметр; диод Шоттки; вольтметр.

Последовательно установить значения ЭДС источника равными: 0,...1.1 $U_{проб}$ ($U_{проб}$ = VB для заданного типа прибора см. параметры состав модели) В.

Шаг изменения напряжения выбрать исходя из значения $U_{проб}$

Активизировать схему.

Показания измерительных приборов занести в таблицу 3.

Таблица 3

U _{обр} , мВ								
I _{обр} , мА								

4. 3 Исследование вольтамперной характеристики диода Шоттки с помощью характериографа XIV1

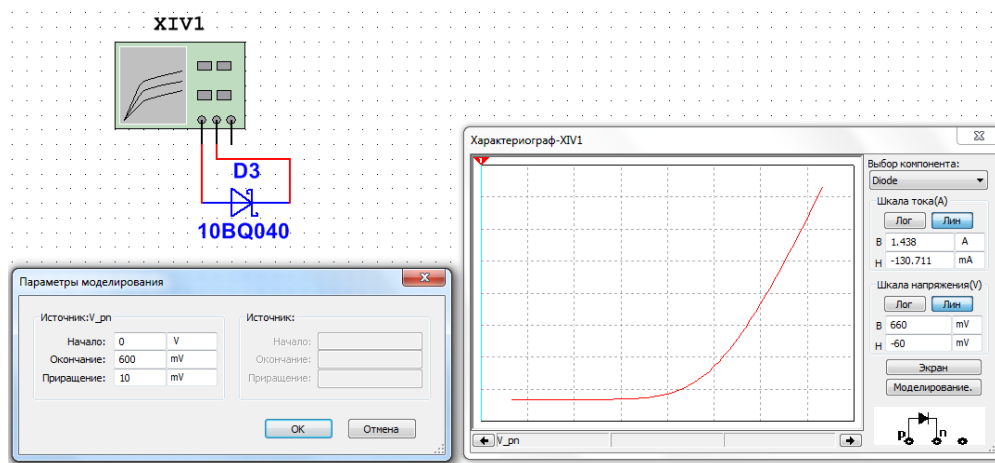


Рисунок 4

4. 4 Анализ вольтамперной характеристики и расчет параметров диода Шоттки

По полученным данным, таблицы 2,3 постройте графики функций $I_{np} = f(U_{np})$; $I_{обр} = f(U_{обр})$. Сравнить с графиком, полученным с помощью характериографа XIV1.

Руководствуясь выражением (1), (2), (3), рассчитайте статические и дифференциальные сопротивления диода Шоттки.

Данные для расчетов показать на вольтамперной характеристике. Результаты вычислений занести в таблицу 4.

Таблица 4

R _{диф. пр} , Ом	R _{диф. обр} , Ом	R _{ст. пр} , Ом	R _{ст. обр} , Ом	U _{ст.мах} , В

Сделать выводы.

5 Контрольные вопросы

1. Поясните причины нелинейности вольтамперной характеристики диода Шоттки.
2. Дать определение и пояснить порядок расчета параметров:
 - статическое сопротивление,
 - дифференциальное сопротивление.

Лабораторная работа №9

Исследование биполярных транзисторов в схеме с общим эмиттером

1 Цель работы

Экспериментальное исследование параметров и характеристик биполярного транзистора.

2 Задание на исследование

Исследовать вольтамперные характеристики и рассчитать параметры биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

3 Краткие сведения из теории

Транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы с одним или несколькими электрическими переходами предназначенные для усиления мощности и имеющие три вывода или больше.

Основу биполярного транзистора (БТ) составляет трехслойная полупроводниковая структура с чередующимся типом проводимостей областей, созданная в едином кристалле и образующая два электрически взаимодействующих электронно-дырочных перехода (рисунок 1).

Схемы включения БТ транзистора показаны на рисунке 2.

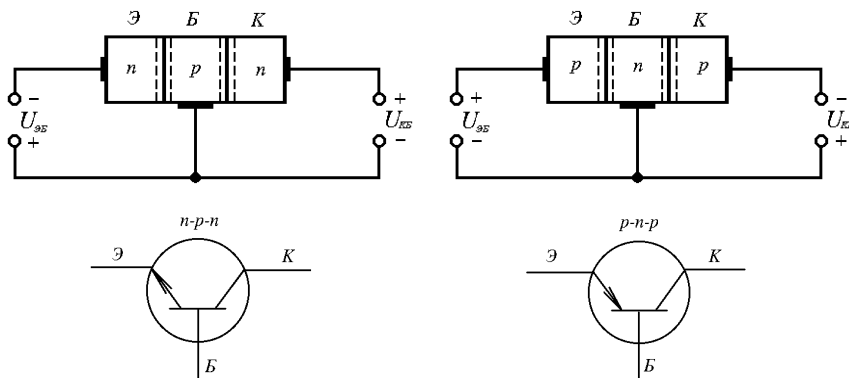


Рисунок 1 - Структура и условно-графическое обозначение БТ

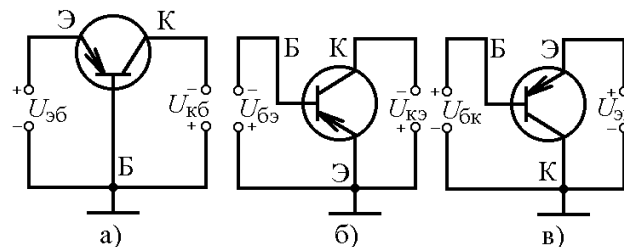


Рисунок 2 - Схемы включения биполярного транзистора:

а - с общей базой (ОБ); б - с общим эмиттером (ОЭ);

в - с общим коллектором (ОК)

В зависимости от схемы включения, биполярные транзисторы характеризуются

следующим набором семейств статических характеристик, рисунок 3.

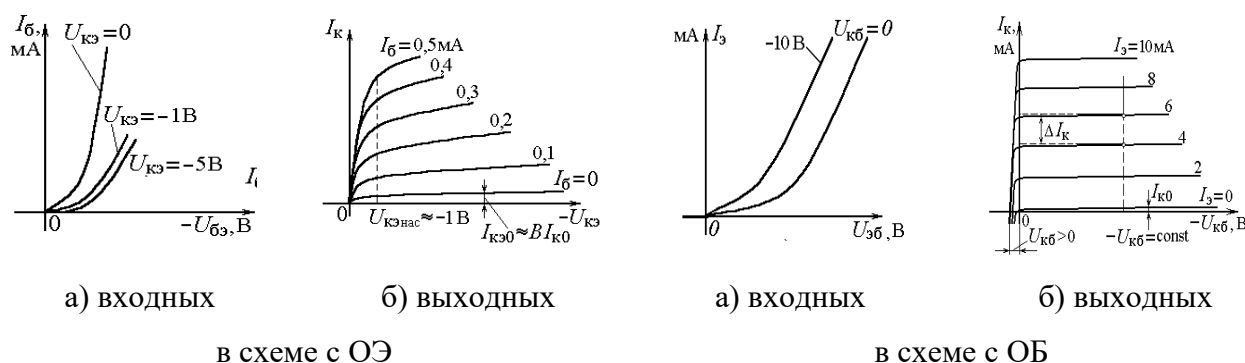


Рисунок 3 - Семейства статических характеристик биполярного транзистора

Рассматривая биполярный транзистор в качестве четырехполюсника, его можно характеризовать системой h - параметров:

$$\Delta U_1 = h_{11} \Delta I_1 + h_{12} \Delta U_2;$$

$$\Delta I_2 = h_{21} \Delta I_1 + h_{22} \Delta U_2.$$

Для схемы с ОЭ h -параметры запишутся:

$$h_{11Э} \approx \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ}=const} \quad \text{- входное сопротивление} \quad (1)$$

$$h_{12Э} \approx \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B=const} \quad \text{- коэффициент обратной связи по напряжению}; \quad (2)$$

$$h_{21Э} \approx \beta = - \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ}=const} \quad \text{- коэффициент передачи по току}; \quad (3)$$

$$h_{22Э} \approx \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B=const} \quad \text{- выходная проводимость} \quad (4)$$

4 Порядок проведения исследований

4.1 Исследование характеристик и расчет параметров биполярного транзистора

4.1.1 Исследование входной характеристики биполярного транзистора

➤ Собрать схему (рисунок 4).

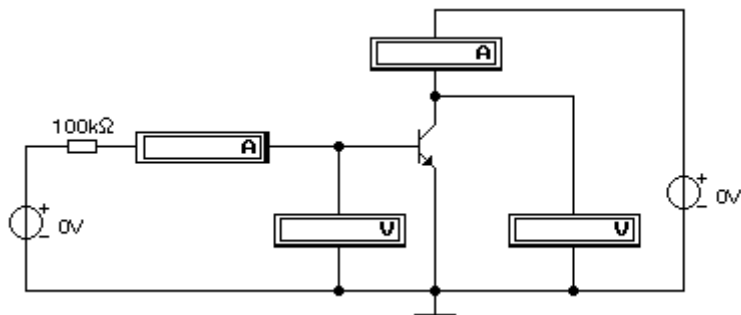


Рисунок 4

Схема содержит: источники ЭДС; резистор $R = 100 \text{ кОм}$; амперметры; вольтметры; биполярный транзистор.

Тип транзистора определяется номером варианта (таблица 1).

Таблица 1- Тип исследуемого биполярного транзистора

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7	8
транзистор	2N2218	2N2222	2N2369	2N3055	2N3391	2N3707	2N3903	2N3904
Вариант №	9	10	11	12	13	14	15	16
транзистор	2N3947	2N4014	2N4124	2N4401	2N4410	2N4967	2N5089	2N5179
Вариант №	17	18	19	20	21	22	23	24
транзистор	2N5223	2N5550	2N5551	2N5364	2N6058	2N3011	2N3020	2N3053
Вариант №	25	26	27	28	29	30	31	32
транзистор	2N3117	2N3246	2N3252	2N3253	2N3299	2N3300	2N3301	2N3302
Вариант №	33	34	35	36	37	38	39	40
транзистор	2N3390	2N3392	2N3393	2N3394	2N3395	2N3396	2N3397	2N3398

- Установить требуемый тип транзистора.
- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи базы равным: 0,5 В; 1 В; 3 В; 5,5 В; 7 В; 9,5 В, при ЭДС источника цепи коллектора равным 0 В.
- Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи базы) занести в таблицу 2.

Таблица 2 - Входная вольтамперная характеристика при $U_{кэ} = 0 \text{ В}$

$U_{бэ}, \text{ мВ}$						
$I_{б}, \text{ мА}$						

- Установить значение ЭДС источника цепи коллектора равным 10 В.
- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи базы равным: 0,5 В; 1 В; 3 В; 5,5 В; 7 В; 9,5 В.

- Активизировать схему. Показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи базы) занести в таблицу 3.

Таблица 3 - Входная вольтамперная характеристика при $U_{кэ} = 10 \text{ В}$

$U_{бэ}, \text{ мВ}$						
$I_б, \text{ мА}$						

4.1.2. Анализ семейства входных статических характеристик биполярного транзистора

По полученным данным таблиц 2 и 3, постройте графики функции $I_э = f(U_{бэ})$ для двух значений $U_{кэ}$.

Руководствуясь выражениями (1), (2) и ВАХ рассчитайте входное сопротивление и коэффициент обратной связи по напряжению биполярного транзистора (параметры $h_{11э}$, $h_{12э}$). Данные, используемые для расчетов, показать на вольтамперной характеристике. Результаты вычислений занести в таблицу 4.

Таблица 4

$h_{11э}, \text{ Ом}$	$h_{12э}$

Сделать выводы.

4.1.3 Исследование выходной характеристики биполярного транзистора

- Собрать схему (рисунок 5).

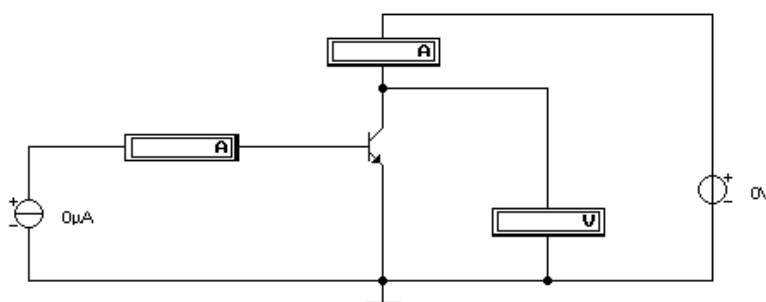


Рисунок 5

Схема содержит: источник тока, источник ЭДС; амперметры; вольтметр; биполярный транзистор.

Тип транзистора определяется номером варианта (таблица 1).

- Установить требуемый тип биполярного транзистора.
- Установить ток базы (20% от максимального значения тока $I_{б \text{ max}}$).

- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи коллектора равным: 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 1,5 В; 3 В; 5 В; 8 В; 10 В. Активизировать схему.
- Снять показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи коллектора), занести их в таблицу 5.

Таблица 5 - Выходная вольтамперная характеристика при $I_b = 20\% I_{b \max}$

$U_{кэ}, В$								
$I_k, мА$								

- Установить ток базы равным 70% от максимального. Последовательно установить значения ЭДС источника цепи базы равным: 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 1,5 В; 3 В; 5 В; 8 В; 10 В.
- Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи коллектора) занести в таблицу 6.

Таблица 6 - Выходная вольтамперная характеристика при $I_b = 70\% I_{b \max}$

$U_{кэ}, В$								
$I_k, мА$								

4.1.4 Анализ семейства выходных статических характеристик биполярного транзистора

По полученным данным, таблицы 5,6, постройте графики функции $I_k = f(U_{кэ})$ для двух значений I_b , подобные кривым рисунк 1,б.

Руководствуясь выражениями (3), (4) и вольтамперной характеристикой рассчитайте коэффициент передачи по току и выходную проводимость БТ (параметры $h_{21э}$, $h_{22э}$).

Данные, используемые для расчетов показать на вольтамперной характеристике. Результаты вычислений занести в таблицу 7.

Таблица 7

$h_{21э}$	$h_{22э}, См$

Сделать выводы.

5 Контрольные вопросы

1. Дайте определение БПТ.
2. Изобразите структуру БПТ и дайте определения эмиттера, базы, коллектора, эмиттерного и коллекторного переходов.
3. Перечислите и поясните режимы работы БПТ.

4. Перечислите и изобразите схемы включения БПТ.
5. Начертите следующие схемы включения БПТ и покажите цепи протекания токов:
 - транзистор п-р-п, СОЭ, РН;
 - транзистор п-р-п, СОЭ, РО;
 - транзистор р-п-р, СОЭ, АРн.
6. Напишите уравнения токов коллектора для БПТ, включенных по схемам с ОЭ и поясните их.
7. Чем определяются усилительные свойства БПТ?
8. Дайте определение эффекта модуляции ширины базы и назовите последствия проявления этого эффекта.
9. Дайте определения входным статическим характеристикам БПТ в СОЭ, начертите их и поясните причины сдвига их при увеличении $|U_{\text{вых}}|$
10. Дайте определения выходным статическим характеристикам БПТ в СОЭ, начертите их с указанием режимов.
11. Поясните физический смысл h -параметров биполярного транзистора
12. Поясните методику расчета h -параметров биполярного транзистора

Лабораторная работа №10

Исследование биполярных транзисторов в схеме с общей базой

1. Цель работы

Экспериментальное исследование параметров и характеристик биполярного транзистора.

2. Задание на исследование:

Исследовать вольтамперные характеристики и рассчитать параметры биполярного транзистора в схеме с общей базой.

3. Краткие сведения из теории

Транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы с одним или несколькими электрическими переходами предназначенные для усиления мощности и имеющие три вывода или больше.

Основу биполярного транзистора (БТ) составляет трехслойная полупроводниковая структура с чередующимся типом проводимостей областей, созданная в едином кристалле и образующая два электрически взаимодействующих электронно-дырочных перехода.

Схемы включения БТ транзистора показаны на рис.2.

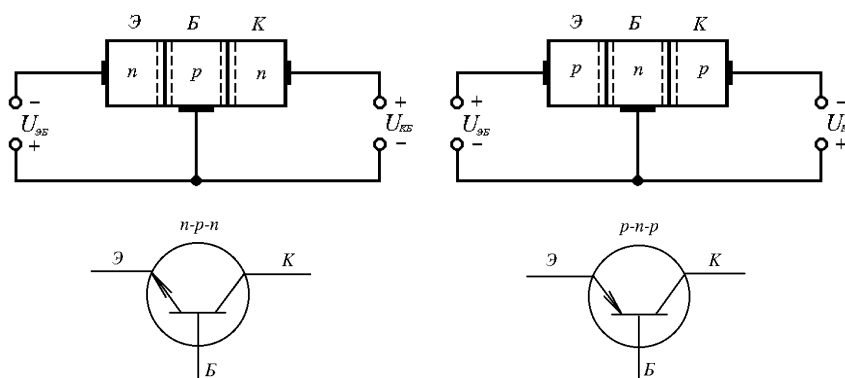


Рисунок 1 - Структура и УГО БТ

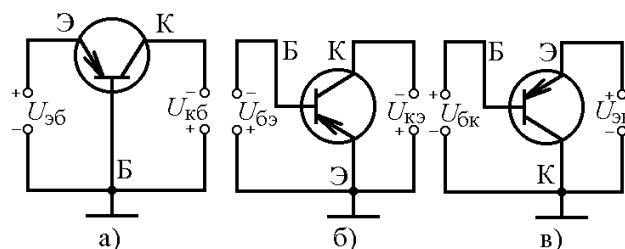


Рисунок 2 - Схемы включения биполярного транзистора:

а - с общей базой (ОБ); б - с общим эмиттером (ОЭ);

в - с общим коллектором (ОК).

В зависимости от схемы включения, биполярные транзисторы характеризуются следующим набором семейств статических характеристик, рис.3.

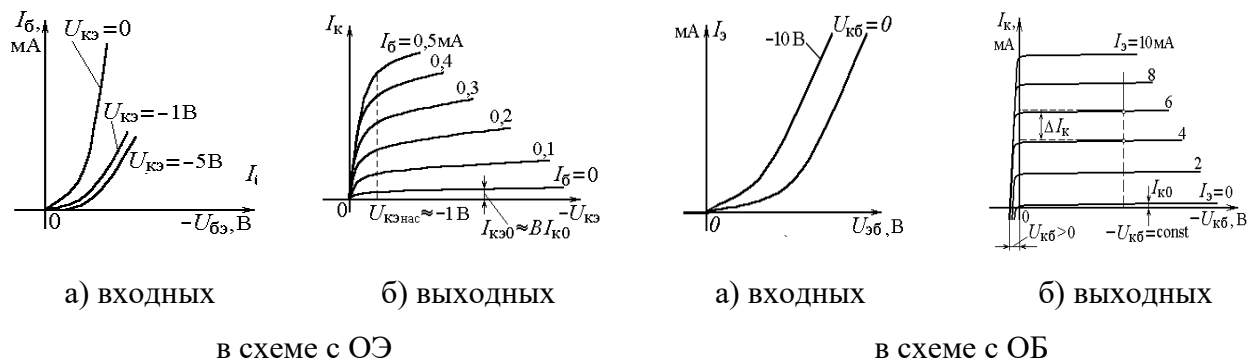


Рисунок 3 - Семейства статических характеристик биполярного транзистора

Как четырехполюсник, биполярные транзисторы характеризуются системой h - параметров:

$$\Delta U_1 = h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2;$$

$$\Delta I_2 = h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2.$$

Для схемы с ОЭ h -параметры запишутся:

$$h_{11Э} \approx \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б} \right|_{U_{КЭ}=const} \quad \text{- входное сопротивление} \quad (1)$$

$$h_{12Э} \approx \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_Б=const} \quad \text{- коэффициент обратной связи по напряжению}; \quad (2)$$

$$h_{21Э} \approx \beta = - \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б} \right|_{U_{КЭ}=const} \quad \text{- коэффициент передачи по току}; \quad (3)$$

$$h_{22Э} \approx \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_Б=const} \quad \text{- выходная проводимость} \quad (4)$$

4.Порядок проведения исследований

4.1.Исследование ВАХ и расчет параметров биполярного транзистора

4.1.1. Снятие входной характеристики биполярного транзистора

➤ Собрать схему (рисунок 4).

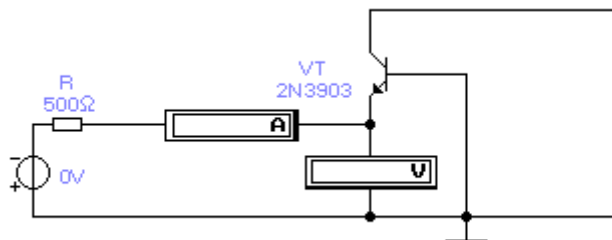


Рисунок 4

Схема содержит: источники ЭДС; резистор $R = 100 \text{ кОм}$; амперметры; вольтметры; биполярный транзистор.

Тип транзистора определяется номером варианта (таблица 1).

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7
Тип БТ	2N3904	2N3932	2N3933	2N3942	2N3947	2N3903	2N3904

- Установить требуемый тип БТ.
- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи эмиттера равным: 0, 0,5 В; 1 В; 3 В; 5,5 В; 7 В; 9,5 В, при ЭДС источника цепи коллектора равным 0 В.
- Активизировать схему.
- Снять показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи базы), занести их в таблицу 2.

Таблица 2 - Значения входной ВАХ при $U_{кб} = 0$ В

$U_{бэ}$, мВ						
$I_э$, мА						

- Установить значение ЭДС источника цепи коллектора равным 10 В.
- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи эмиттера равным: 0, 0,5 В; 1 В; 3 В; 5,5 В; 7 В; 9,5 В.
- Активизировать схему.
- Снять показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи базы), занести их в таблицу 3.

Таблица 3 - Значения входной вольтамперной характеристики при $U_{кб} = 10$ В

$U_{бэ}$, мВ						
$I_э$, мА						

4.1.2. Анализ семейства входных статических характеристик биполярного транзистора

По полученным данным, табл.2,3, постройте графики функции $I_э = f(U_{бэ})$ для двух значений $U_{кб}$, подобные кривым рис.3,а. При изображении ВАХ учесть тип структуры БТ (п-р-п), кривые рис.3 даны для БТ структуры *p-n-p*.

Руководствуясь выражениями (1), (2) и ВАХ рассчитайте входное сопротивление и коэффициент обратной связи по напряжению биполярного транзистора (параметры $h_{11б}$, $h_{12б}$). Данные, используемые для расчетов показать на ВАХ. Результаты вычислений занести в таблицу 4.

Таблица 4

$h_{11б}$, Ом	$h_{12б}$

Сделать выводы.

4.1.3. Снятие выходной характеристики биполярного транзистора

- Собрать схему (рисунок 5).

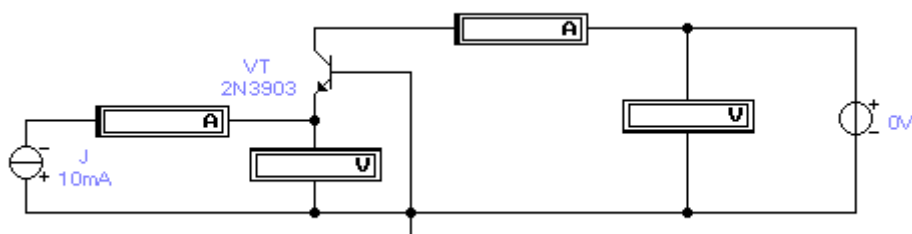


Рисунок 5

Схема содержит: источник тока, источник ЭДС; амперметры; вольтметр; биполярный транзистор.

Тип транзистора определяется номером варианта (таблица 1).

- Установить требуемый тип биполярного транзистора.
- Установить ток эмиттера (20% от максимального значение).
- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи коллектора равным: 0 В, 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 1,5 В, 3 В; 5 В; 8 В, 10 В. Активизировать схему.
- Снять показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи коллектора), занести их в таблицу 5.

Таблица 5 - Значения выходной ВАХ при $I_E = 20\%$ от максимального

$U_{кб}, В$								
$I_k, мА$								

- Установить ток эмиттера равным 70% от максимального. Последовательно установить значения ЭДС источника цепи базы равным: 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 1,5 В, 3 В; 5 В; 8 В, 10 В.
- Активизировать схему.
- Снять показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи коллектора), занести их в таблицу №6.

Таблица 6 - Значения выходной ВАХ при $I_E = 70\%$ от максимального

$U_{кб}, В$								
$I_k, мА$								

4.1.4. Анализ семейства выходных статических характеристик биполярного транзистора

По полученным данным, табл.5,6, постройте графики функции $I_k = f(U_{кб})$ для двух значений $I_э$, подобные кривым рис.3,б.

Руководствуясь выражениями (3), (4) и ВАХ рассчитайте коэффициент передачи по току и выходную проводимость БТ (параметры $h_{21б}$, $h_{22б}$).

Данные, используемые для расчетов показать на ВАХ. Результаты вычислений занести в таблицу 7.

Таблица 7

$h_{21б}$	$h_{22б}$, См

Сделать выводы.

5. Контрольные вопросы

1. Начертите следующие схемы включения БПТ и покажите цепи протекания токов:
-транзистор р-п-р, СОБ, РО;
-транзистор р-п-р, СОБ, АРН;
2. Напишите уравнения токов коллектора для БПТ, включенных по схемам с ОБ и поясните их.
3. Чем определяются усилительные свойства БПТ?
4. Дайте определения входным статическим характеристикам БПТ в СОБ, начертите их и поясните причины сдвига их при увеличении $|U_{вых}|$
5. Дайте определения выходным статическим характеристикам БПТ в СОБ, начертите их с указанием режимов.
6. Почему наклон выходной характеристики БПТ в СОЭ больше, чем в СОБ?
7. Поясните устройство и принцип действия биполярного транзистора в СОБ.
8. Поясните физический смысл h-параметров биполярного транзистора в СОБ.
9. Поясните методику расчета h-параметров биполярного транзистора в СОБ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Снятие и анализ входных и выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером и определение по ним его h -параметров; исследование выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком и построение его сток-затворной характеристики.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Транзистор – это полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов в широком диапазоне частот (от постоянного тока до десяти гигагерц) и мощности (от десятков милливатт до сотен ватт).

Различают биполярные транзисторы, в которых используются кристаллы n - и p -типа, и полевые (униполярные) транзисторы, изготовленные на кристалле германия или кремния с одним типом проводимости.

1. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Биполярные транзисторы – это полупроводниковые приборы, выполненные на кристаллах со структурой p - n - p -типа (*а*) или n - p - n -типа (*б*) с тремя выводами, связанными с тремя слоями (областями): коллектор (K), база (B) и эмиттер ($\mathcal{E}$) (рис. 1, *а* и *б*). Ток в таком транзисторе определяется движением зарядов двух типов: электронов и дырок. Отсюда его название – *биполярный транзистор*.

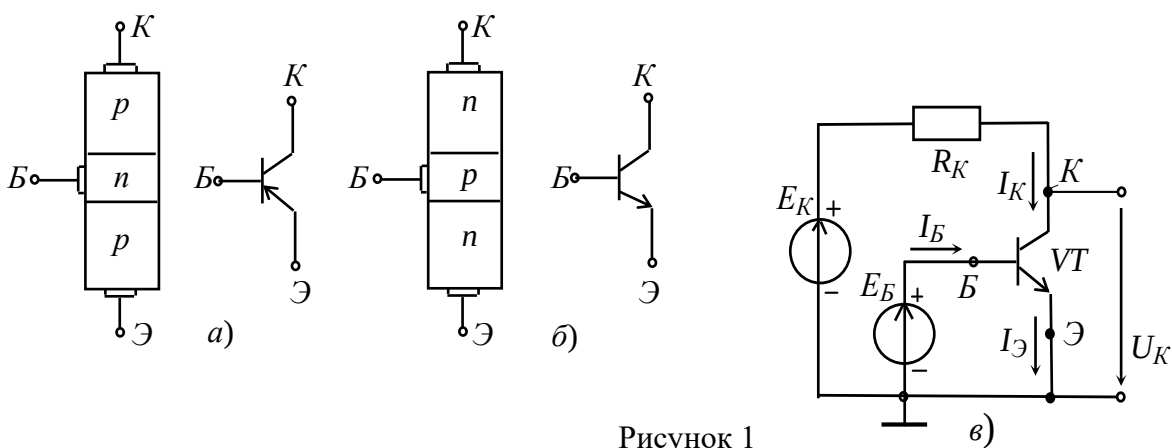


Рисунок 1

Физические процессы в транзисторах p - n - p -типа и n - p - n -типа одинаковы. Отличие их в том, что токи в базах транзисторов p - n - p -типа переносятся основными носителями зарядов – дырками, а в транзисторах n - p - n -типа – электронами. Каждый из переходов транзистора – эмиттерный (B - $\mathcal{E}$) и коллекторный (B - K) можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

- режим *отсечки* – оба p - n -перехода закрыты, при этом через транзистор протекает сравнительно небольшой ток I_0 , обусловленный неосновными носителями зарядов;
- режим *насыщения* – оба p - n -перехода открыты;
- *активный* (усилительный) режим – один из p - n -переходов открыт, а другой закрыт.

В режимах отсечки и насыщения управление транзистором практически отсутствует. В активном режиме транзистор выполняет функцию *активного элемента* электрических схем усиления сигналов, генерирования колебаний, переключения и т. п.

Подав отрицательный потенциал ЭДС источника E_K на коллектор и положительный на эмиттер (рис. 1, в) в схеме включения транзистора n - p - n -типа с общим эмиттером (с ОЭ), мы, тем самым, открыли эмиттерный переход Э-Б и закрыли коллекторный Б-К, при этом ток коллектора $I_{K0} = I_{Э0} = I_0$ мал, он определяется концентрацией неосновных носителей (электронов в данном случае) в коллекторе и базе.

Если между эмиттером и базой приложить небольшое напряжение (0,3...0,5 В) в прямом направлении p - n -перехода Э-Б, то происходит *инжекция* дырок из эмиттера в базу, образуя ток эмиттера $I_Э$. В базе дырки частично рекомбинируют со свободными электронами, но одновременно от внешнего источника напряжения ($E_B < E_K$) в базу приходят новые электроны, образуя ток базы I_B .

Так как база в транзисторе выполняется в виде тонкого слоя, то только незначительная часть дырок рекомбинирует с электронами базы, а основная их часть достигает коллекторного перехода. Эти дырки захватываются электрическим полем коллекторного перехода, являющегося ускоряющим для дырок. Ток дырок, попавших из эмиттера в коллектор, замыкается через резистор R_K и источник напряжения с ЭДС E_K , образуя ток коллектора I_K во внешней цепи.

Токи транзистора в схеме включения с ОЭ (см. рис. 1, в), работающего в активном режиме, связаны уравнением

$$I_Э = I_K + I_B.$$

Отношение тока коллектора к току эмиттера называют *коэффициентом передачи тока*

$$\alpha \approx I_K / I_Э \Big|_{U_{БЭ} = \text{const}} = 0,96...0,995 < 1,$$

откуда ток базы

$$I_B = I_Э - I_K = (1 - \alpha)I_Э - I_{K0} \ll I_Э,$$

где $I_{K0} = 0,1...10$ мкА у кремниевых и $I_{K0} = 10...100$ мкА у германиевых транзисторов

Схема включения транзистора с ОЭ является наиболее распространенной вследствие малого тока базы во входной цепи и усиления входного сигнала как по напряжению, так и по току.

Транзистор может работать на постоянном токе, малом переменном сигнале, большом переменном сигнале и в ключевом (импульсном) режиме.

Основные свойства транзистора определяются соотношениями токов и напряжений в различных его цепях и взаимным их влиянием друг на друга. На рис. 2 представлены семейства входных $I_B = f(U_B)|_{U_K=const}$ (а) и выходных $I_K = f(U_K)|_{U_B=const}$ (б) статических характеристик транзистора в схеме с ОЭ. Они могут быть получены в результате эксперимента или расчёта

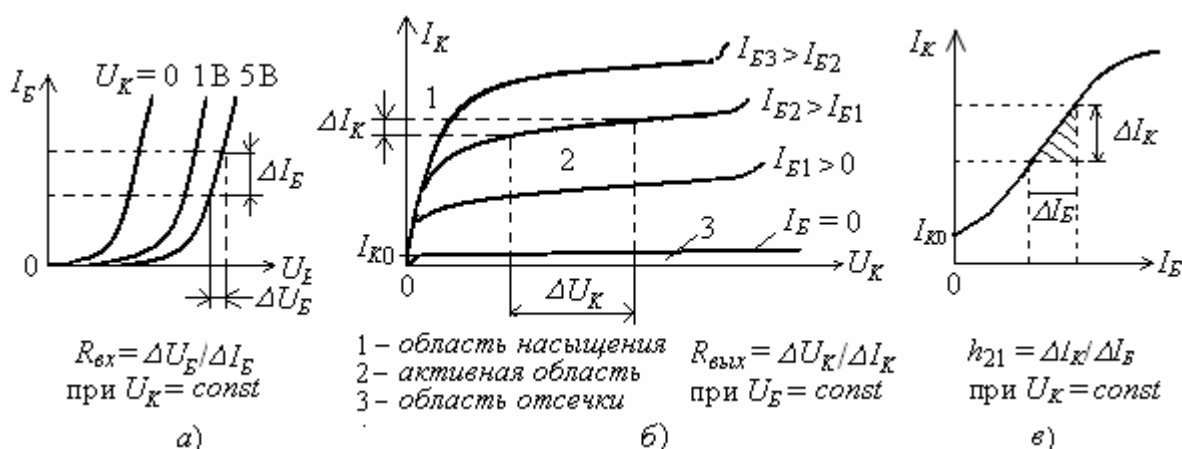


Рисунок 2

Семейства характеристик, которые связывают напряжения и токи на выходе с токами и напряжениями на входе, называют *характеристиками передачи* или *управляющими характеристиками*. В качестве примера на рис. 2, в приведена управляющая характеристика по току транзистора (коэффициент передачи тока) при напряжении $U_K = const$, т. е.

$$I_K = f(I_B)|_{U_K=const}.$$

Входные и выходные характеристики транзистора обычно приводятся в справочниках (каталогах) транзисторов, которые широко используют для анализа работы транзисторов и для расчета схем при больших сигналах.

В режиме усиления *малых сигналов* транзистор в схеме с ОЭ часто представляют в виде линейного четырехполюсника, входные и выходные параметры которого связаны следующими уравнениями:

$$\Delta U_B = h_{11\varnothing} \Delta I_B + h_{12\varnothing} \Delta U_K;$$

$$\Delta I_K = h_{21\varnothing} \Delta I_B + h_{22\varnothing} \Delta U_K,$$

где $h_{11Э} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B} \right|_{U_K = const}$ ($\Delta U_K = 0$) – входное динамическое сопротивление транзистора

($h_{11Э} = 100 \dots 1000$ Ом); $h_{12Э} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta U_K} \right|_{I_B = const}$ ($\Delta I_B = 0$) – безразмерный коэффициент

внутренней обратной связи по напряжению, значение которого лежит в пределах $0,002 \dots 0,0002$ (при расчётах им часто пренебрегают, т. е. полагают равным нулю);

$h_{21Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_K = const}$ ($\Delta U_K = 0$) – коэффициент передачи (усиления) тока при постоянном

напряжении на коллекторе; его также обозначают K_i или $\beta = 10 \dots 200$;

$h_{22Э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_K} \right|_{I_B = const}$ ($\Delta I_B = 0$) – выходная проводимость транзистора при постоянном токе

базы ($h_{22Э} = 10^{-4} \dots 10^{-6}$ См).

Параметры схемы замещения транзистора с ОЭ в h -форме определяют по его входным и выходным характеристикам (см. рис. 2).

3. ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРОВ

Входные и выходные вольтамперные характеристики транзисторов обычно снимают на постоянном токе (по точкам) или с помощью специальных приборов – характериографов, позволяющих избежать сильного нагрева приборов. Полученные ВАХ используют для расчета цепей смещения и стабилизации режимов работы, расчёта конечных состояний ключевых схем (отсечки насыщения).

Входные характеристики $I_B(U_B)$ при $U_{KЭ} = const$ биполярных транзисторов, включенных по схеме с ОЭ (см. рис. 2, а), имеют вид, аналогичный характеристикам диодов: ток базы экспоненциально возрастает с увеличением напряжения база-эмиттер при заданном напряжении на коллекторе. В виду ничтожно малых токов затвора I_3 полевых транзисторов, включенных по схеме с ОИ, их входные ВАХ, как правило, не снимают.

Как отмечалось, выходные характеристики биполярных транзисторов $I_K(U_K)$ при $I_B = const$, включенных по схеме с ОЭ (см. рис. 2, б), определяют зависимость выходного тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при заданных значениях тока базы

4. ПОСТРОЕНИЕ ВАХ ТРАНЗИСТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ХАРАКТЕРИОГРАФА СРЕДЫ MS12

Снять семейство выходных характеристик биполярных транзисторов в схеме с ОЭ или полевых транзисторов в схеме с ОИ можно с помощью характериографа **IV Analyzer**,

подключая соответствующие выводы транзисторов к его входам, например модели 2N2222A (рис. 3).

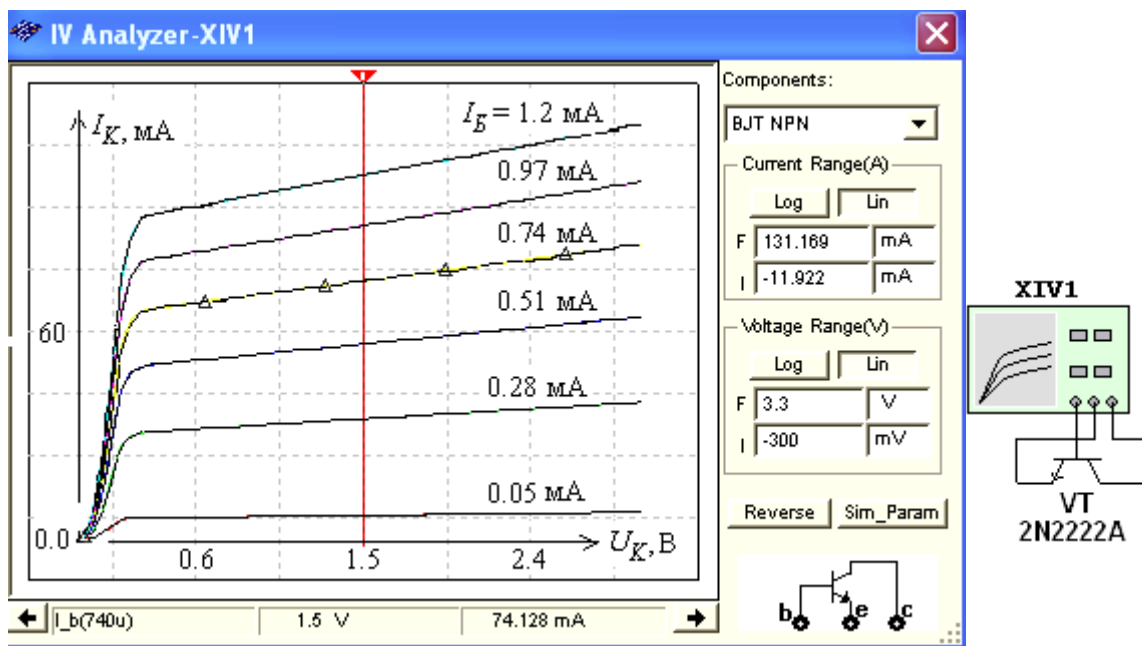


Рисунок 3

Границы изменения напряжения на коллекторе U_K (V_{ce}), тока базы I_B (I_b) и числа фиксированных уровней тока базы (**Num steps**) можно установить в диалоговом окне (рис. 4), (см. рис. 3).

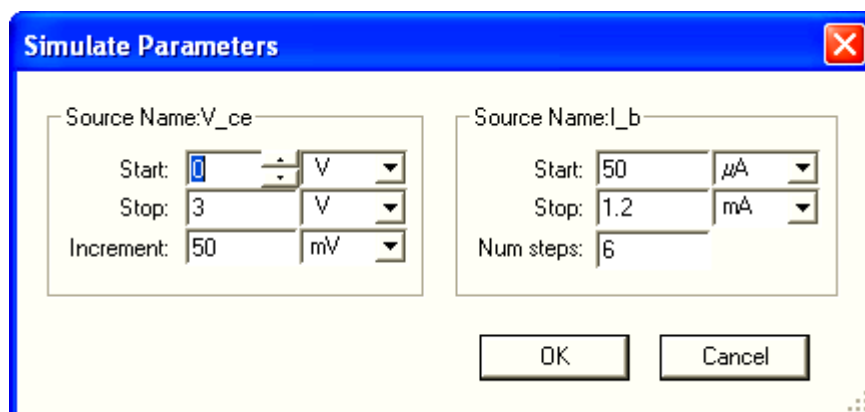


Рисунок 4

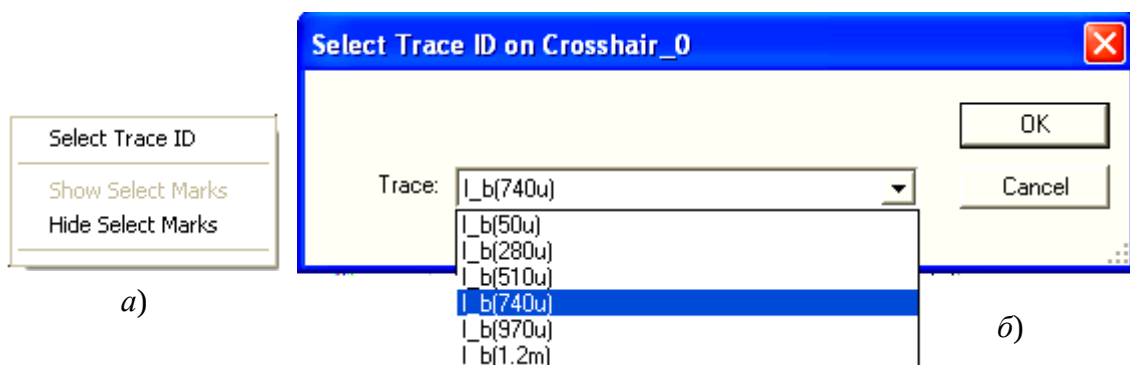


Рисунок 5

Если щелкнуть мышью вначале в поле семейства BAX транзистора (см. рис. 3), а затем в открывшемся окне на закладках **Hide Select Marks** (Выделение BAX маркерами) и **Select Trace ID** (Выбор BAX $I_K(U_K)$ из семейства выходных характеристик по заданному току базы) (рис.5), то при щелчке мышью на кнопке **ОК** и закрытии окон выбранная BAX будет выделена треугольными маркерами (см. рис. 3), а при движении визирной линии внизу рисунка выводятся координаты точек (значения напряжения U_K и тока I_K) выделенной BAX, в которых их пересекает визирная линия. Значение тока базы I_B (I_{b}) выводится в левом нижнем углу рисунка.

При щелчке мышью на любой кривой BAX маркеры перемещаются на неё, а в нижней строке выводятся значение тока базы и координаты точки пересечения визира с выделенной кривой BAX.

Записав координаты двух точек BAX при двух фиксированных положениях визира на линейном участке характеристики (например, при заданном токе $I_{B1} = 0,74$ мА, $U_{K1} = 1,5$ В и $I_{K1} \approx 74,13$ мА, а при $U_{K2} = 2$ В, $I_{K2} \approx 77,58$ мА), вычислим выходное динамическое сопротивление транзистора

$$R_{вых} = \Delta U_K / \Delta I_K = 0,5 / 0,00345 \approx 145 \text{ Ом},$$

а записав при фиксированном напряжении на коллекторе (например, $U_K = 1,5$ В) два значения тока коллектора при двух значениях тока базы (например $I_{K1} = 74,13$ мА при $I_{B1} = 0,74$ мА и $I_{K2} = 90,09$ мА при $I_{B2} = 0,97$ мА) найдём коэффициент передачи тока транзистора в схеме с ОЭ по формуле:

$$h_{21Э} = \Delta I_K / \Delta I_B = 15,96 / 0,23 \approx 69,4.$$

Подобным образом с помощью характериографа **IV Analyzer** можно снять BAX и определить параметры других моделей биполярных и полевых транзисторов, записанных в библиотеке среды MS12, учитывая знаки полярности их электродов и устанавливая на них соответствующие границы изменения напряжений, ориентиром для которых служат паспортные данные транзисторов.

В библиотеке компонентов среды MS12 имеется большое количество моделей номинированных импортных транзисторов, отечественные аналоги которых можно найти в справочниках [10]. Например, аналогом импортного транзистора типа **IRFL710** является отечественный транзистор типа КП731А, транзистора **2N3906** – транзистор КТ6136А, транзистора **2N2222А** – транзистор КТ3117Б и т. д.

Подробную информацию о параметрах транзистора можно найти в диалоговом окне, после двойного щелчка мышью на изображении и закладке **Edit Component in BD**. В качестве примера в табл.1 приведены некоторые параметры (всего их 41) модели биполярного транзистора **2N2222А** и их обозначения, принятые в среде MS12 и в данной работе.

Таблица 1

Наименование параметра	Обозначение и значение параметра в MS12	Обозначение и значение параметра в Lr12
Обратный ток коллекторного перехода	$I_S = 0,2046 \text{ pA}$	$I_{K0} = 0,2046 \text{ пА}$
Идеальный максимальный коэффициент усиления тока в схеме с ОЭ	$BF = 296,5$	$h_{21Э} = \beta = 296,5$
Напряжение, близкое к максимальному напряжению коллектора	$VAF = 10 \text{ V}$	$U_{K.max} = 10 \text{ В}$
Обратный ток эмиттерного перехода	$I_{SE} = 0,1451 \text{ pA}$	$I_{Э0} = 0,1451 \text{ пА}$
Максимальный ток коллектора	$IKF = 77,25 \text{ mA}$	$I_{K.max} = 77,25 \text{ мА}$
Объёмное сопротивление базы	$R_B = 4 \Omega$	$R_B = 4 \text{ Ом}$
Объёмное сопротивление эмиттера	$R_E = 85,73 \text{ m}\Omega$	$R_{Э} = 85,73 \text{ мОм}$
Объёмное сопротивление коллектора	$R_C = 0,4286 \Omega$	$R_K = 0,4283 \text{ Ом}$
Контактная разность потенциалов перехода база-эмиттер	$V_{JE} = 0,95 \text{ V}$	$E_{БЭ} = 0,95 \text{ В}$
Контактная разность потенциалов перехода база-коллектор	$V_{JC} = 0,4 \text{ V}$	$E_{БК} = 0,4 \text{ В}$
Ёмкость эмиттерного перехода при нулевом напряжении	$C_{JE} = 11 \text{ pF}$	$C_{Э} = 11 \text{ пФ}$
Ёмкость коллекторного перехода при нулевом напряжении	$C_{JC} = 32 \text{ pF}$	$C_K = 32 \text{ пФ}$
Время переноса заряда через базу	$TF = 0,3 \text{ nsec}$	$t_{nep} = 0,3 \text{ нс}$

УЧЕБНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Задание 1. На рабочем поле среды MS12 **собрать** схему для снятия ВАХ биполярных транзисторов с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 6).

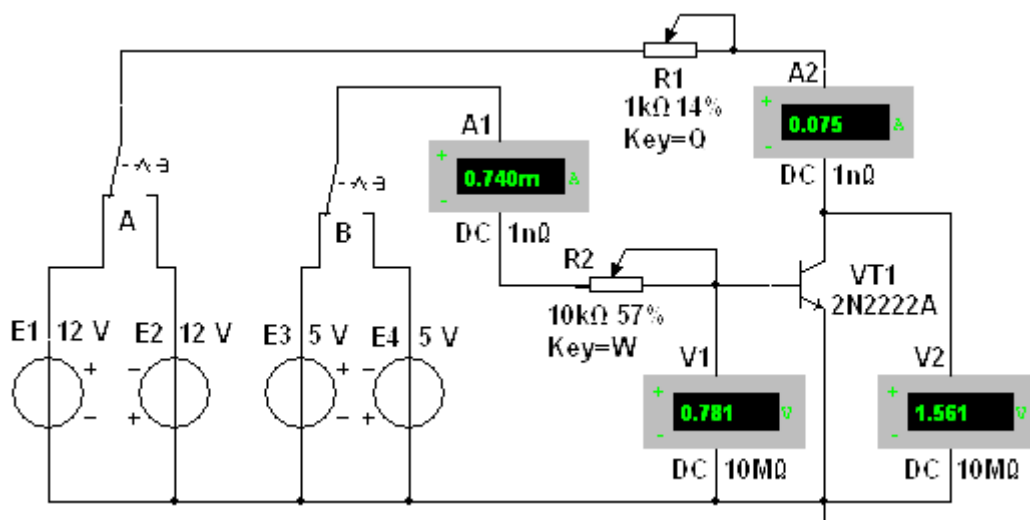


Рисунок 6

В схему включить следующие компоненты

– источники **E1** и **E2** постоянного напряжения, к одному из с помощью переключателя **A** подключается коллектор биполярного или сток полевого транзистора. Выбор источника питания зависит от знака полярности коллектора соответствующего транзистора (рис. 7);



Рисунок 7

– источники **E3** и **E4** постоянного напряжения для включения с помощью переключателя **B** одного из них в цепь базы (затвора) соответствующего транзистора;

– два потенциометра **R1** и **R2** для задания токов в цепях транзисторов;

– два амперметра **A1** и **A2** и два вольтметра **V1** и **V2** для измерения токов и напряжений на электродах исследуемого транзистора.

Основные параметры транзисторов, предлагаемых для испытания в работе, даны в табл. 2. Приведенные марки транзисторов могут быть заменены на другие после двойного щелчка мышью на соответствующем изображении прибора на рабочем поле среды MS12 и на **Replace Components**.

Задание 2. Снять и построить (по точкам) входных $I_B(U_B)$ при $U_{КЭ} = const$ и выходных $I_K(U_K)$ при $I_B = const$ ВАХ соответствующего биполярного транзистора (см. табл. 2).

Для этого:

– заменить транзистор в схеме испытания на рекомендованный тип;

Т а б л и ц а 2

Номер по списку	Тип транзистора	$U_{K.max}, В$	$I_{K.max}, А$	$h_{21Э}$	$S, мА/В$	$f_{max}, МГц$	$P_K, Вт$
Нечётн.	2N2222A	10	0,077	30...300	–	300	1,5
Чётные	2N3906	40	0,2	30...300	–	250	0,625

– в соответствии со знаком полярности коллектора и базы исследуемого транзистора выбрать источники напряжения, задать их ЭДС и установить переключатели **A** и **B** в соответствующие положения;

- изменяя сопротивления потенциометров **R1** и **R2** и, при необходимости, ЭДС источников **E1...E4**, заносить показания приборов в табл. 3 и в табл. 4;
- по данным измерений построить графики семейств входных и выходных ВАХ (см. рис. 2, а и б);
- скопировать изображение схемы с показаниями приборов (для одного из режимов работы при снятии выходной ВАХ) на страницу отчёта;
- воспользовавшись графиками семейств входных и выходных ВАХ, определить h -параметры биполярного транзистора.

Т а б л и ц а 3

Ток базы I_B , мкА		50	100	200	300	400	500
Напряжение $U_{БЭ}$, В при $U_{КЭ}$, В	0						
	5						

Т а б л и ц а 4

Напряжение $U_{КЭ}$, В		0,1	0,5	1	5	8	12
Ток коллектора I_K , мА при I_B , мкА	50						
	100						
	200						
	300						
	400						
	500						

Скопировать изображение схемы с показаниями приборов (для одного из режимов работы при снятии выходной ВАХ) на страницу отчёта.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень приборов, использованных в экспериментах, с их краткими характеристиками.
3. Таблицы результатов измерений и расчётов h -параметров биполярного транзистора
4. Изображения электрических схем испытания биполярного транзистора и семейств входных и выходных ВАХ транзисторов.
5. Выводы по работе.

ТЕСТОВОЕ ЗАДАНИЕ

1. Назовите **режимы** работы биполярного транзистора и дайте их краткую характеристику.

2. Укажите, какой **формулой** описывается коэффициент передачи по току $h_{21Э}$ биполярного транзистора?

$$h_{21Э} = \Delta U_{КЭ} / \Delta I_{К} \Big|_{I_{Б} = const} \quad h_{21Э} = (\alpha - 1) / \alpha \quad h_{21Э} = \Delta I_{К} / \Delta I_{Э} \quad h_{21Э} = \Delta I_{К} / \Delta I_{Б} \Big|_{U_{КЭ} = const}$$

☐ ☐ ☐ ☐

3. Укажите, в какой **схеме включения** биполярного транзистора:

а) *максимальное входное сопротивление:*

в схеме с ОЭ в схеме с ОБ в схеме с ОК

☐ ☐ ☐

б) *максимальный коэффициент усиления по мощности:*

в схеме с ОЭ в схеме с ОБ в схеме с ОК?

☐ ☐ ☐

4. Укажите **порядок** входного сопротивления полевых транзисторов, включенных по схеме с ОИ:

☐ Десятки-сотни ом; ☐ Десятки-сотни килом; ☐ Десятки-сотни мегаом.

5. Каков **физический смысл** h -параметров и при каких условиях их определяют?

6.. Укажите, какая **схема включения** биполярного транзистора наиболее распространена?

Схема с ОЭ Схема с ОК Схема с ОБ

☐ ☐ ☐

Контрольные вопросы

1. Изобразите структуру БПТ и дайте определения эмиттера, базы, коллектора, эмиттерного и коллекторного переходов.
2. Перечислите и поясните режимы работы БПТ.
3. Перечислите и изобразите схемы включения БПТ.
4. Начертите следующие схемы включения БПТ и покажите цепи протекания токов:
 - транзистор р-п-р, СОБ, АРН;
 - транзистор п-р-п, СОБ, АРН;
 - транзистор п-р-п, СОЭ, АРН;
 - транзистор р-п-р, СОЭ, АРН.

5. Принцип работы БПТ в АРН при включении по схеме с ОБ: состояние переходов, процессы в ЭП, КП и базе; токи $I_{\text{Э}}$, $I_{\text{К}}$, и $I_{\text{Б}}$ - их составляющие и цепи протекания.
6. Тоже, что в п.5, но при включении по схеме с ОЭ.
7. Перечислите условия нормальной работы БПТ типа р-п-р и п-р-п в АРН.
8. Чем определяются усилительные свойства БПТ?
9. При каком условии происходит переход БПТ из РН в АРН?
10. Почему при увеличении напряжения на коллекторе ток $I_{\text{К}}$ возрастает резко в РН и очень медленно в АРН?
11. Почему наклон выходной характеристики БПТ в СОЭ больше, чем в СОБ?
12. Параметры предельных режимов работы транзисторов.

Лабораторная работа № 12

Исследование схем смещения положения рабочей точки

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование цепи смещения биполярных транзисторов с фиксированным током базы и фиксированным напряжением база-эмиттер

2 Задание для подготовки к работе

2.1. Изучить по рекомендованной литературе правила и схемотехнику установки рабочей точки транзистора.

2.2. Изучить причины температурной неустойчивости положения рабочей точки.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

До начала работы необходимо выбрать и согласовать с преподавателем вариант задания, представленный в табл. №1:

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Начальная температура(t_1)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Конечная температура(t_2)	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
Диапазон изменения температуры	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95

Задание 1 Исследование схемы смещения фиксированным током

Исследуем два режима работы данной цепи: статический и динамический.

1.1 Статический режим.

Собрать схему рисунок 1.

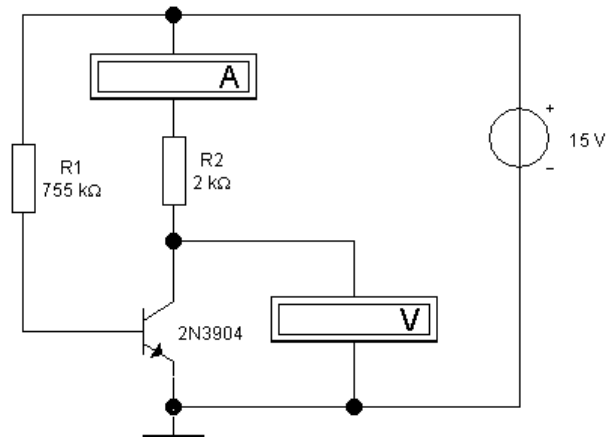


Рисунок 1

Определить величину тока покоя I_{k0} и напряжение покоя U_{k0} по показаниям амперметра и вольтметра при начальной температуре t_1 . Результаты измерения занести в табл. 2.

Таблица 2

Схема	ФТ		ФН	
температура	t1	t2	t1	t2
I_{k0} , мА				
U_{k0} , В				
$U_{\text{мах. Вых}}$, В				

Установить для транзистора начальную температуру t_2 .

Внимание! Для установки необходимой температуры необходимо двойным щелчком левой кнопкой мыши по транзистору открыть диалоговое окно, в котором выбрать закладку **Analysis Setup** и убрать галочку (если она стоит) **Use global temperature**, и установить требуемую температуру.

Определить величину тока покоя I_{k0} и напряжение покоя U_{k0} по показаниям амперметра и вольтметра при начальной температуре t_2 . Результаты измерения занести в табл. 2.

1.2. Динамический режим.

Собрать схему, представленную на рис. 2.

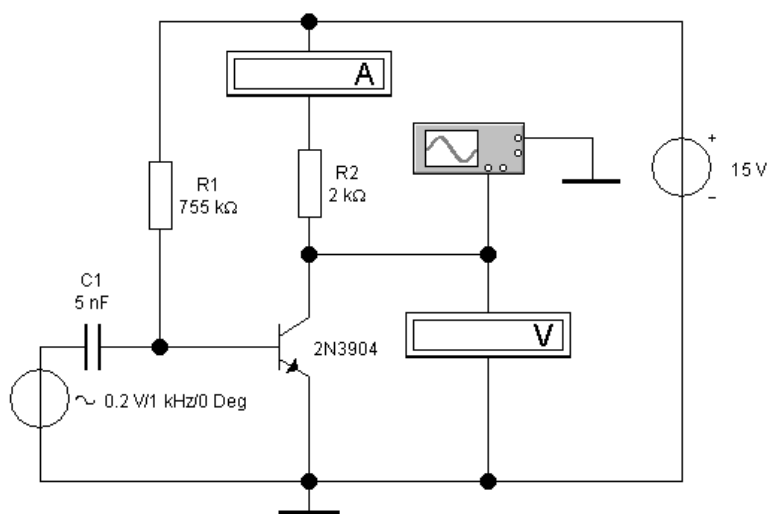


Рисунок 2

Установить начальную температуру транзистора t_1 , перевести вольтметр и амперметр в режим измерения переменного сигнала (АС). Для этого необходимо двойным щелчком левой кнопкой мыши по вольтметру и амперметру открыть диалоговое окно, в котором поменять режим DC на AC. Установить частоту входного сигнала $f = 1 \text{ кГц}$; амплитуду входного сигнала $U = 0.2 \text{ В}$

Активизировать схему. Двойным щелчком левой кнопкой мыши по осциллографу открыть диалоговое окно. Нажать на Expand; задать Time base: 0,50 ms/div; Channel A: 5 V/Div, режим AC. Затем постепенно увеличивая выходное напряжение генератора до 0,6 В,

следить за формой выходного сигнала на экране осциллографа. Зафиксировать максимальное выходное напряжение на вольтметре, при котором ещё не заметны на глаз искажения на осциллографе. Это напряжение является максимальным неискаженным выходным напряжением $U_{\text{макс. вых.}}$.

Выполнить те же действия для температуры t_2 . Результаты измерения занести в табл. 2.

Задание 2. Исследование схемы смещения фиксированным напряжением

2.1. Статический режим.

Собрать схему, представленную на рис. 3.

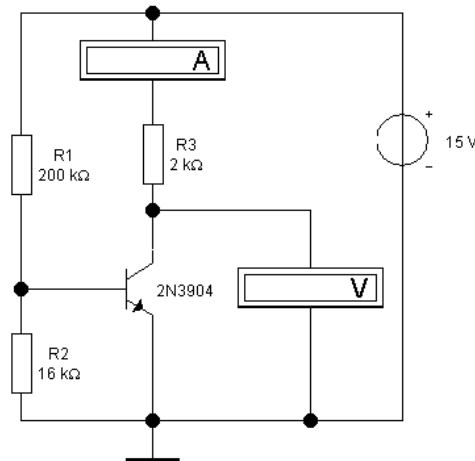


Рисунок 3

Измерения провести аналогично пункту 1.1. Результаты измерения занести в табл. 2.

2.2. Динамический режим.

Собрать схему, представленную на рис. 4.

Установить начальную температуру транзистора t_1 .

Активизировать схему. Затем постепенно увеличивая выходное напряжение генератора в пределах 0.2 .. 0,6 В, следить за формой выходного сигнала на экране осциллографа. Затем зафиксировать максимальное выходное напряжение на вольтметре $U_{\text{макс. вых.}}$

Выполнить те же действия для температуры t_2 . Результаты измерения занести в табл.2.

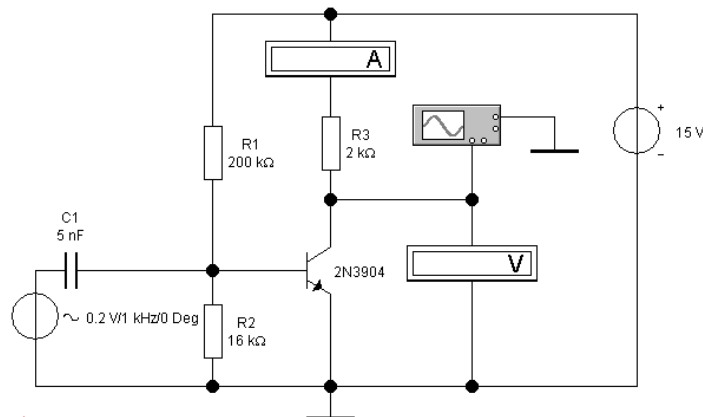


Рисунок 4

Контрольные вопросы

1. С какой целью подают напряжение смещения на электроды усилительных элементов?
2. Покажите пути протекания постоянных составляющих токов коллектора, базы, эмиттера в схеме подачи смещения фиксированным током базы.
3. Почему схема с фиксированным током базы получила такое название.
4. Покажите пути протекания постоянных составляющих токов коллектора, базы, эмиттера и тока делителя в схеме с фиксированным напряжением базы.
5. Почему схема с фиксированным напряжением база-эмиттер получила такое название?
6. Почему схемы с фиксированным током базы и с фиксированным напряжением база-эмиттер не получили широкого распространения в инженерной практике?

Лабораторная работа №13
Исследования схем температурной стабилизации положения рабочей точки

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Исследование стабилизации положения рабочей точки схемой эмиттерной стабилизации, схемой термокомпенсации и схемой с генератором стабильного тока.
2. Исследование влияния температурной неустойчивости положения рабочей точки на величину выходного неискаженного напряжения.

Задание 1. Исследование схемы эмиттерной стабилизации положения рабочей точки

1.1 Статический режим.

Собрать схему, представленную на рис. 1.

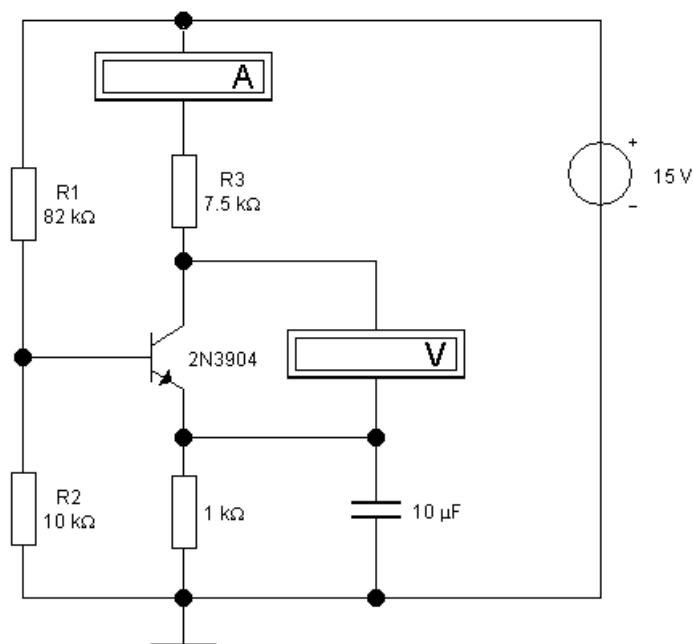


Рисунок 1

Определить величину тока покоя I_{k0} и напряжение покоя U_{k0} по показаниям амперметра и вольтметра при начальной температуре t_1 .

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Начальная температура(t_1)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Конечная температура(t_2)	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
Диапазон изменения температуры	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95

Результаты измерения занести в табл. 2.

Таблица 2

Схема	ЭС		ТК		ГСТ	
температура	t1	t2	t1	t2	t1	t2
I _{k0} , мА						
U _{k0} , В						
U _{мах. Вых} , В						

1.2 Динамический режим

Собрать схему, представленную на рис.2. Установить начальную температуру транзистора t₁, перевести вольтметр и амперметр в режим измерения переменного сигнала (АС). Установить частоту входного сигнала f=1кГц, амплитуду входного сигнала 0. 0.04В, Установить Time base: 0,20 ms/div; Channel A: 1 V/Div, режим АС.

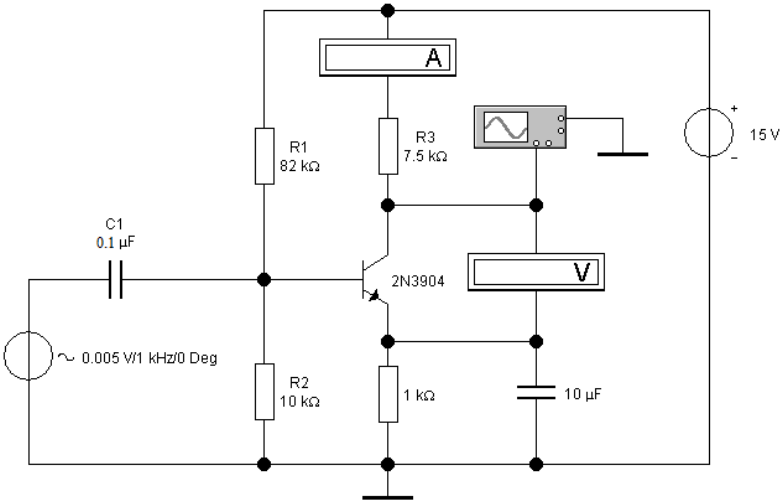


Рисунок 2

Активизировать схему.

Постепенно увеличивая выходное напряжение генератора до 0,01 В с шагом 0,003 В, следить за формой выходного сигнала на экране осциллографа. Зафиксировать максимальное выходное напряжение на вольтметре U_{макс. вых}

Выполнить те же действия для температуры t₂ . Результаты измерения занести в табл.2.

Задание 2. Исследование схемы термокомпенсации

2.1 Статический режим.

Собрать схему, представленную на рис. 3.

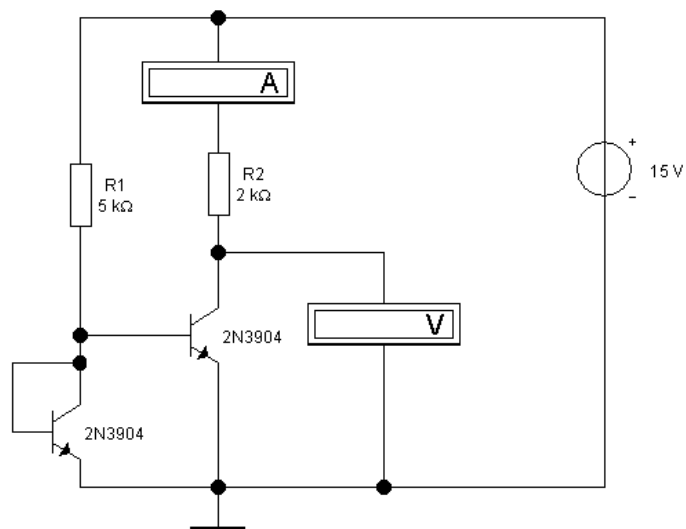


Рисунок 3

Установить начальную температуру транзистора t_1 на обоих транзисторах! Измерения провести аналогично пункту 1.1. Результаты измерения занести в табл.2.

2.2 Динамический режим.

Собрать схему, представленную на рис.4.

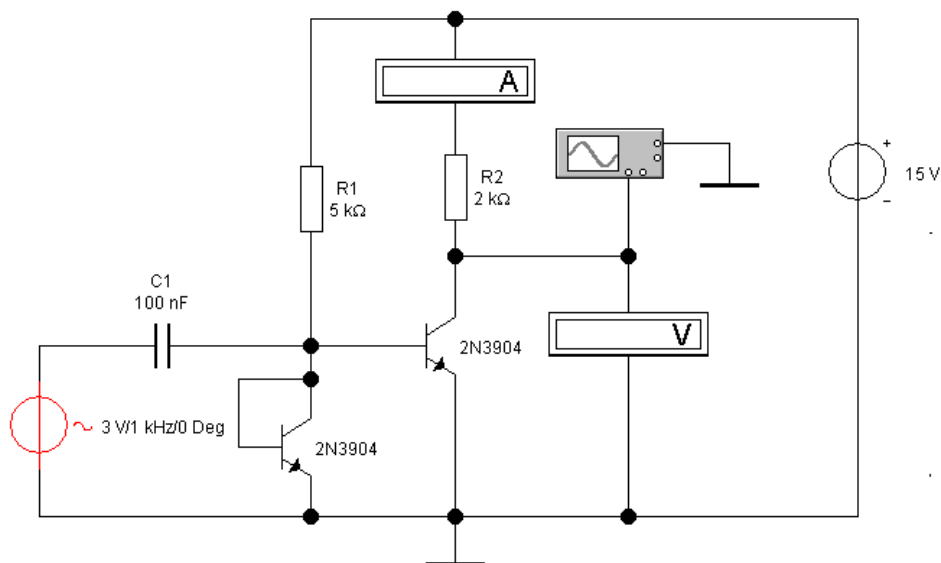


Рисунок 4

Установить начальную температуру транзистора t_1 на обоих транзисторах, перевести вольтметр и амперметр в режим измерения переменного сигнала (AC). Оставить частоту входного сигнала $f=1\text{кГц}$, амплитуду входного сигнала 0.3 В . Установить Time base: 0.50 ms/div ; ChannelA: 5V/Div , режим AC.

Активизировать схему. Постепенно увеличивая выходное напряжение генератора до 3.4 В с шагом 0,2 В, следить за формой выходного сигнала на экране осциллографа. Зафиксировать максимальное выходное напряжение на вольтметре $U_{\text{макс. вых}}$

Выполнить те же действия для температуры t_2 обоих транзисторов. Результаты измерения занести в табл.2.

Задание 3. Исследование схемы с генератором стабильного тока

3.1 Статический режим

Собрать схему, представленную на рис. 5.

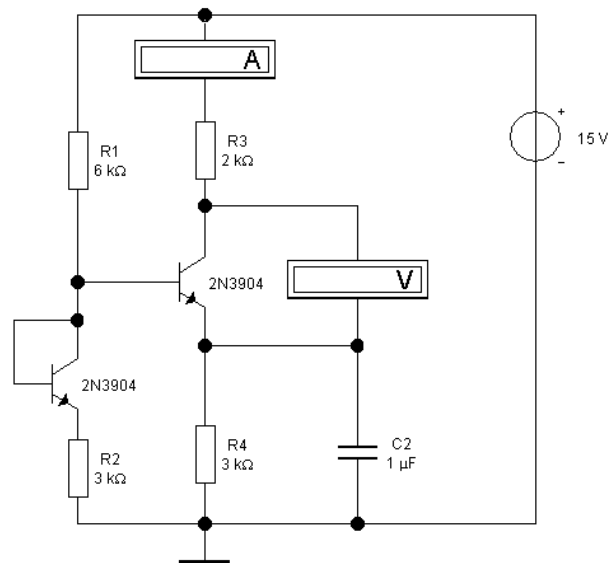


Рисунок 5

Установить начальную температуру транзистора t_1 на обоих транзисторах! Измерения провести аналогично пункту 1.1. Результаты измерения занести в табл.2.

3.2 Динамический режим

Собрать схему, представленную на рис.6.

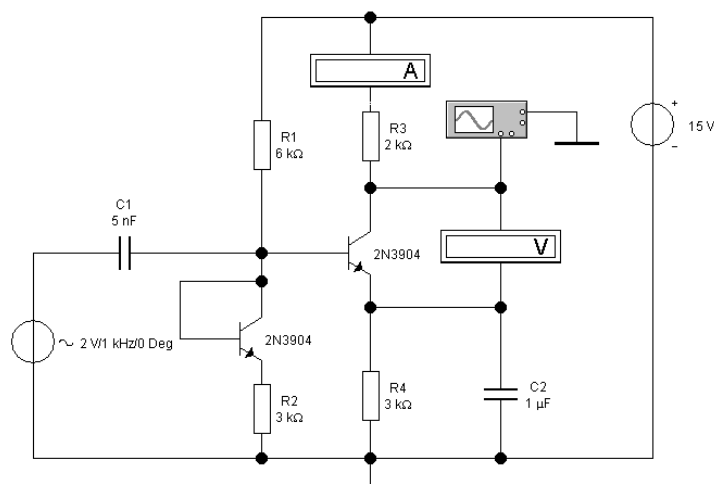


Рисунок 6

Установить начальную температуру транзистора t_1 на обоих транзисторах, перевести вольтметр и амперметр в режим измерения переменного сигнала (АС). Оставить частоту входного сигнала $f=1\text{кГц}$, амплитуду входного сигнала 0.3 В . Установить Time base: $0,50\text{ ms/div}$; ChannelA: 5V/Div , режим АС.

Активизировать схему. Постепенно увеличивая выходное напряжение генератора до $3..4\text{ В}$ с шагом $0,2\text{ В}$, следить за формой выходного сигнала на экране осциллографа. Зафиксировать максимальное выходное напряжение на вольтметре $U_{\text{макс. вых}}$

Выполнить те же действия для температуры t_2 обоих транзисторов. Результаты измерения занести в табл.2.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет лабораторной работы должен содержать:

4.1. Титульный лист

4.2. Цель работы.

4.3. В соответствии с порядком проведения работы должны быть приведены:

- схема;
- краткая теория работы схемы (со ссылкой на [Л], откуда взяты материалы);
- расчетные формулы; результаты расчетов;
- таблица экспериментальных данных;
- результаты сравнения экспериментальных данных с расчетными;
- выводы по работе

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как изменяется управляемый ток коллектора от температуры коллекторного перехода?
2. Как эти изменения сказываются на величине тока покоя?
3. Как изменяется статический коэффициент усиления тока базы $h_{21э}$ при изменении температуры коллекторного перехода? Как это сказывается на величине тока покоя?
4. Что такое температурное смещение входных характеристик? Как оно влияет на изменение положения точки покоя?
5. Покажите пути протекания постоянных составляющих токов коллектора, базы, эмиттера и тока делителя в схеме эмиттерной стабилизации точки покоя.
6. Объясните принцип действия схемы эмиттерной стабилизации точки покоя.
7. Расскажите о назначении резисторов R_1, R_2 делителя и резистора $R_э$ в цепи эмиттера в схеме эмиттерной стабилизации.

8. Расскажите о назначении конденсатора $C_э$ в цепи эмиттера. Как сказывается конденсатор $C_э$ при усилении низкочастотных сигналов?
9. Расскажите о принципе действия схемы эмиттерной стабилизации, используя основы теории обратных связей.
10. Расскажите о принципах термокомпенсации изменений положения точки покоя. Нарисуйте одну из схем термокомпенсации.
11. Расскажите о принципе действия исследованной схемы термокомпенсации.
12. Укажите достоинства и недостатки схем термокомпенсации.
13. Нарисуйте схему стабилизации точки покоя, исследованную в настоящей работе.
14. Объясните принцип действия схемы стабилизации точки покоя спомощью ГСТ.
15. Почему схемы с ГСТ широко применяются в аналоговой интегральной микросхемотехнике?

Лабораторная работа №14

Исследование полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом

1 Цель работы

Экспериментальное исследование параметров и характеристик полевых транзисторов.

2 Задание на исследование:

Исследовать вольтамперные характеристики и рассчитать параметры полевого транзистора с управляющим р-п переходом в схеме с общим истоком.

3 Краткие сведения из теории

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, в котором ток стока (C) через полупроводниковый канал n - или p -типа управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором (3) и истоком ($И$). Полевые транзисторы изготавливают:

- с управляющим затвором типа p - n -перехода для использования в высокочастотных (до 12...18 ГГц) преобразовательных устройствах. Условное их обозначение на схемах приведено на рис. 1, а и б;
- с изолированным (слоем диэлектрика) затвором для использования в устройствах, работающих с частотой до 1...2 ГГц. Их изготавливают или со *встроенным каналом* в виде МДП-структуры (см. их условное обозначение на рис. 1, в и г), или с *индуцированным каналом* в виде МОП-структуры (их условное обозначение на схемах дано на рис. 1, д и е).

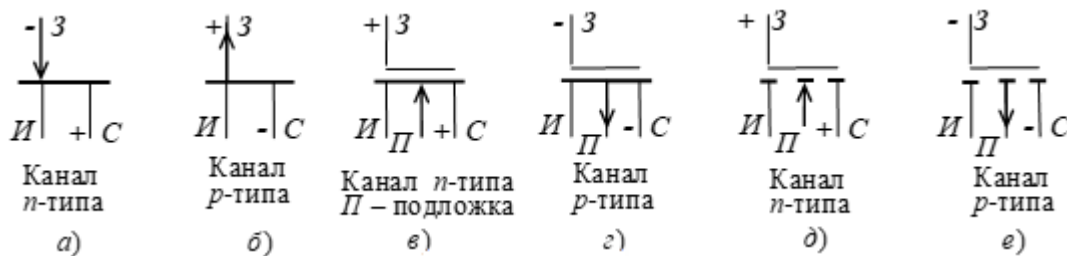


Рисунок 1

Схема включения полевого транзистора с затвором типа p - n -перехода и каналом n -типа, его семейство выходных характеристик $I_C = f(U_C)$, $U_3 = \text{const}$ и стоко-затворная характеристика $I_C = f(U_3)$, $I_C = \text{const}$ изображены на рис 2

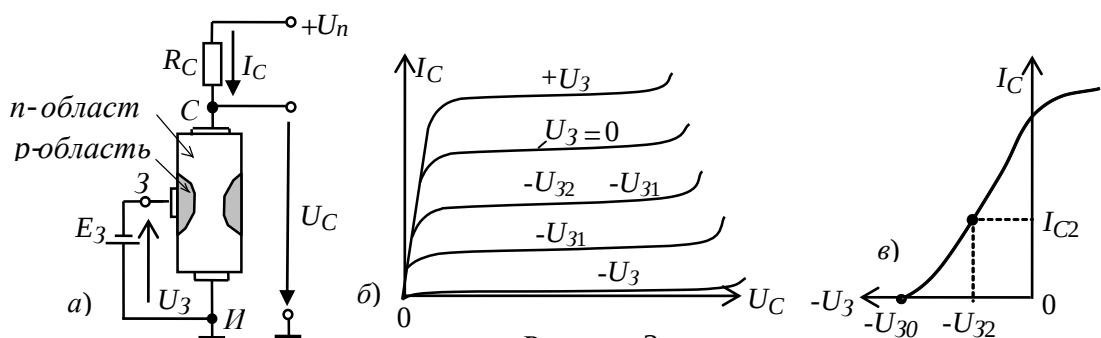


Рисунок 2

При подключении выходов стока C и истока I к источнику питания U_n по каналу n -типа протекает начальный ток I_C , так как p - n -переход не перекрывает сечение канала (рис. 2, а). При этом электрод, из которого в канал входят носители заряда, называют *истоком*, а электрод, через который из канала уходят основные носители заряда, называют *стоком*. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называют *затвором*. С увеличением обратного напряжения $-U_3$ уменьшается сечение канала, его сопротивление увеличивается и уменьшается ток стока I_C (см. рис.2, в).

Итак, управление током стока I_C происходит при подаче обратного напряжения на p - n -переход затвора 3. В связи с малостью обратных токов в цепи затвор-исток, мощность, необходимая для управления током стока, оказывается ничтожно малой.

При напряжении $-U_3 = -U_{30}$, называемым *напряжением отсечки*, сечение канала полностью перекрывается обеднённым носителями заряда барьерным слоем, и ток стока I_{C0} (ток отсечки) определяется неосновными носителями заряда p - n -перехода (см. рис. 2, б).

Схематичная структура полевого транзистора с *индуцированным n -каналом* представлена на рис 3.

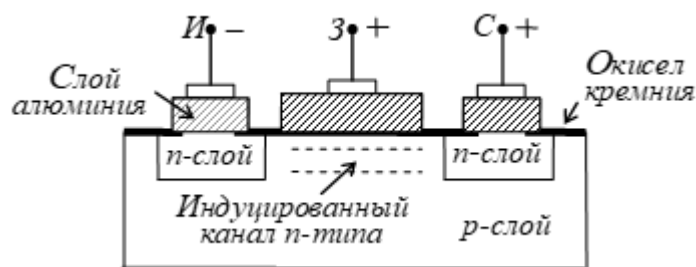


Рисунок 3

Электрод затвора изолирован от полупроводникового канала с помощью слоя диэлектрика из двуоксида кремния (SiO_2). Поэтому полевой транзистор с такой структурой называют МОП-транзистором (металл-оксид-полупроводник). Электроды стока и истока располагаются по обе стороны затвора и имеют контакт с полупроводниковым каналом. При напряжении на затворе относительно истока равным нулю и при наличии напряжения на стоке ток стока I_C оказывается ничтожно малым. Заметный ток стока появляется только при подаче на затвор напряжения положительной полярности относительно истока, больше так называемого *порогового напряжения* $U_{3,пор}$.

При этом в результате проникновения электрического поля через диэлектрический слой в полупроводник при напряжениях на затворе, больших $U_{3,пор}$, у поверхности полупроводника под затвором возникает инверсионный слой, который и является каналом, соединяющим исток со стоком. Толщина и поперечное сечение канала изменяются с изменением напряжения на затворе, соответственно будет изменяться ток стока.

В полевом транзисторе со встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе ток стока имеет начальное значение I_{C0} . Такой транзистор может работать как в режиме

обогащения, так в режиме обеднения: при увеличении напряжения на затворе канал обогащается носителями зарядов и ток стока растёт, а при уменьшении напряжения на затворе канал обедняется и ток стока снижается.

Важнейшей особенностью полевых транзисторов является высокое входное сопротивление (десятки-сотни мегаом) и малый входной ток. Одним из основных параметров полевых транзисторов является *крутизна* $S = \Delta I_C / \Delta U_{зи}$ стоко-затворной характеристики (см. рис. 4), выражаемая в мА/В.

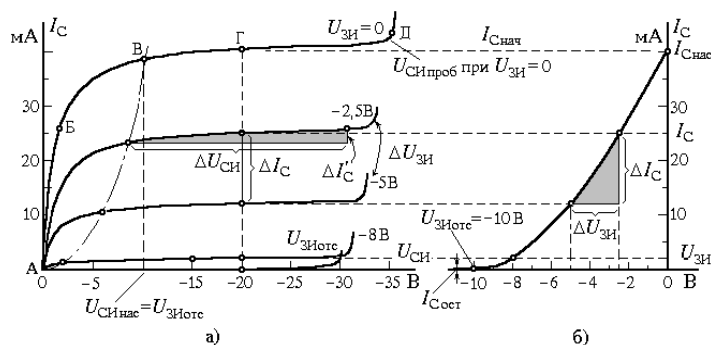


Рисунок 4 - Статические стоковые (а) и стоко-затворные (б) характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n* переходом и каналом *n*-типа включенного по схеме с общим истоком

Крутизна характеристики полевого транзистора $S = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{зи}} \right|_{U_{си} = \text{const}}$

Внутреннее дифференциальное сопротивление полевого транзистора

$$R_{\text{диф}} = \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_C} \right|_{U_{зи} = \text{const}}$$

Коэффициент усиления полевого транзистора $M = \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \right|_{I_C = \text{const}}$

4 Порядок проведения исследований

4.1 Исследование вольтамперной характеристики полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

4.1.1 Исследование стоко-затворной характеристики полевого транзистора

- Собрать схему рисунок 5.

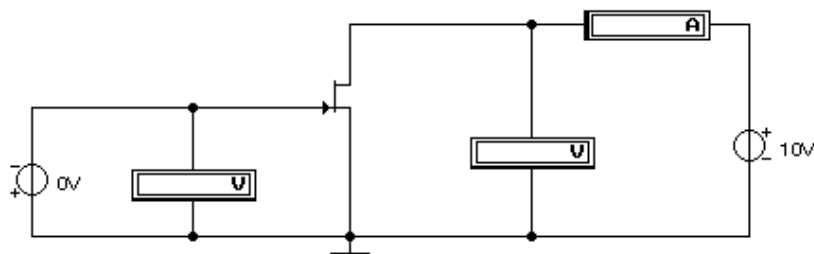


Рисунок 5

- Схема содержит: источники ЭДС, амперметр; вольтметры; полевой транзистор. Тип транзистора определяется номером варианта (таблица 1).
- Установить требуемый тип полевого транзистора.
- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи затвора равным: 0 В; 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 2 В; 3 В и т.д. до запираания канала ПТ.

Таблица 1- Тип исследуемого полевого транзистора

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип ПТ	J2N3369	J2N3370	J2N3369	J2N3466	J2N3819	J2N3968	J2N3969	J2N4224
№ варианта	9	10	11	12	13	14	15	16
Тип ПТ	J2N4885	J2N5198	J2N5104	J2N5245	J2N5246	J2N5347	J2N5248	J2N5360
№ варианта	17	18	19	20	21	22	23	24
Тип ПТ	J2N5361	J2N5362	J2N5363	J2N5364	J2N5453	J2N5546	J2N5547	J2N5561
№ варианта	25	26	27	28	29	30	31	32
Тип ПТ	J2N5562	J2N5563	J2N5654	J2N5903	J2N5949	J2N5950	J2N5951	J2N5952
№ варианта	33	34	35	36	37	38	39	40
Тип ПТ	J2N5953	J2N3458	J2N3459	J2N3584	J2N3585	J2N3586	J2N3587	J2N3822

- Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Стоко-затворная вольтамперная характеристика

$U_{зи}, В$						
$I_c, мкА$						

По полученным данным, таблица 2, построить график функции $I_c = f(U_{зи})$ для заданного значения $U_{си}$. Сделать выводы.

4.1.2 Исследование стоковой характеристики полевого транзистора

- Установить напряжение на затворе (5% от напряжения запирающего канала) (значение источника ЭДС в цепи затвора).
- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи стока равным: 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 1,5 В; 3 В; 5 В; 8 В; 10 В. Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи сток-исток) занести в таблицу 3.

Таблица 3 - Стоковая вольтамперная характеристика при $U_{зи} = 5\%$ от максимального

$U_{си}, В$								
$I_c, мкА$								

- Установить напряжение на затворе (50% от напряжения запирающего канала). Последовательно установить значения ЭДС источника цепи стока равным: 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 1,5 В; 3 В; 5 В; 8 В; 10 В.
- Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи сток-исток) занести в таблицу 4.

Таблица 4 - Стоковая вольтамперная характеристика при $U_{зи} = 50\%$ от максимального

$U_{си}, В$								
$I_c, мкА$								

По полученным данным (таблицы 3,4) постройте графики функции $I_c = f(U_{си})$ для двух значений $U_{зи}$.

Рассчитать: - крутизну $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \Big|_{U_{си} = \text{const}}$,

- дифференциальное сопротивление $R_{диф} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \Big|_{U_{зи} = \text{const}}$,

- коэффициент усиления полевого транзистора $M = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \Big|_{I_c = \text{const}}$

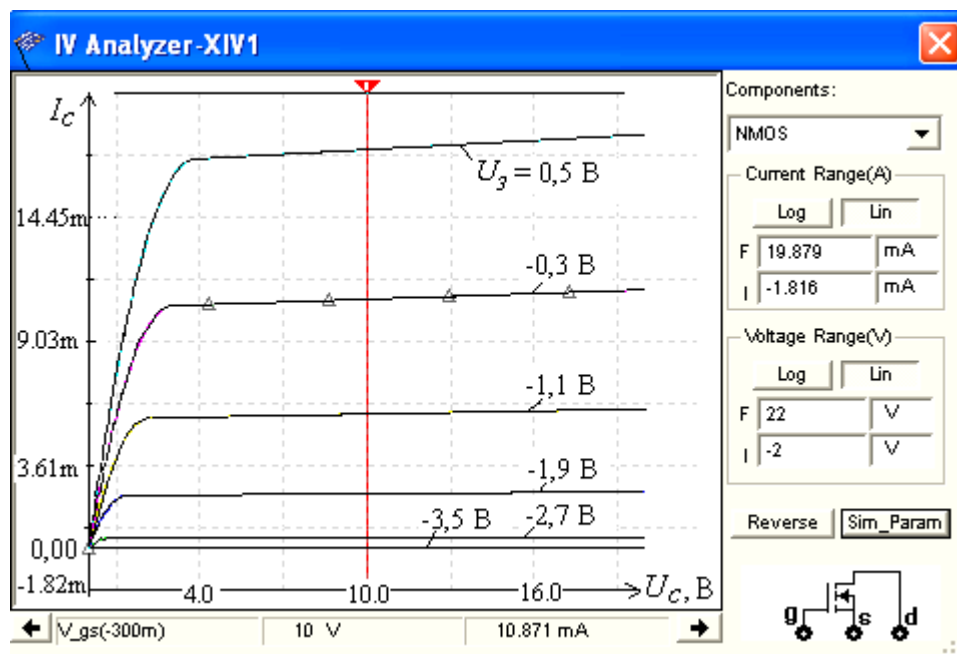
Сделать выводы.

4. ПОСТРОЕНИЕ ВАХ ТРАНЗИСТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ХАРАКТЕРИОГРАФА СРЕДЫ

MS12

Снять семейство выходных характеристик полевых транзисторов в схеме с ОИ можно с помощью характериографа **IV Analyzer** (рис. 6).

На рис. 6 представлено семейство ВАХ модели полевого транзистора 2N3823 ($U_{C-max} = 100$ В; напряжение отсечки $U_{30} = -3,3$ В) с управляющим затвором типа $p-n$ -перехода и с каналом n -типа, снятое с помощью характериографа **IV Analyzer** при изменении напряжения сток-исток (**drain-source**) $U_{СИ}$ (**V-ds**) от 0 до 20 В, напряжении затвор-исток (**gate-source**) $U_{ЗИ}$ (**V-gs**) от $-3,5$ В до $0,5$ В и числе фиксированных уровней напряжения затвора $N = 6$.



Рисунке 6

Переместим визир в окне характериографа в положение, при котором напряжение стока $U_C = 10$ В, и запишем значения тока стока при двух напряжениях затвора транзистора, например, при $U_3 = -0,3$ В ток стока $I_C = 10,87$ мА, а при $U_3 = -1,13$ В ток $I_C = 5,86$ мА. Тогда крутизна управляющей сток-затворной характеристики $I_C(U_3)$ транзистора при $U_C = 10$ В равна $S = \Delta I_C / \Delta U_3 \approx 10,8 / 1,8 = 6,25$ мА/В.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение полевого транзистора и классификацию их.
2. Перечислите основные конструктивные элементы ПТ и поясните назначение их.
3. Дайте определение полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и изобразите его структуру.
4. Начертите схему включения $p-n$ - ПТ и сформулируйте правила определения полярности напряжений $U_{СИ}$ и $U_{ЗИ}$.
5. Поясните влияние напряжений $U_{СИ}$ и $U_{ЗИ}$ на форму канала. Чему равно напряжение в произвольном сечении перехода $U_{пер}(x)$?
6. Дайте определение напряжения отсечки и напряжения насыщения.

7. Изложите принцип работы ***p-n*** - ПТ. Напишите основное уравнение тока стока.
8. В чем суть механизма самоограничения тока I_C ?
9. Дайте определение выходной характеристики ***p-n*** - ПТ, начертите ее. Объясните сублинейный и пологий участки и участок пробоя. Почему при увеличении $|U_{зи}|$ уменьшается напряжение пробоя?
10. Дайте определение проходной характеристики, начертите и объясните ее.
11. Перечислите основные параметры ***p-n*** - ПТ.
12. Начертите эквивалентную схему ***p-n*** - ПТ и поясните назначение ее элементов.
13. Начертите простейший резистивный усилитель на ***p-n*** - ПТ.

Лабораторная работа №15

Исследование МОП транзисторов

1 Цель работы

Экспериментальное исследование параметров и характеристик полевых транзисторов.

2 Задание на исследование:

Исследовать вольтамперные характеристики и рассчитать параметры полевого транзистора с изолированным затвором в схеме с общим истоком.

4 Порядок проведения исследований

4.2 Исследование вольтамперной характеристики МОП транзистора с встроенным каналом

4.2.1 Исследование стоко-затворной характеристики полевого транзистора

- Собрать схему рисунок 1.

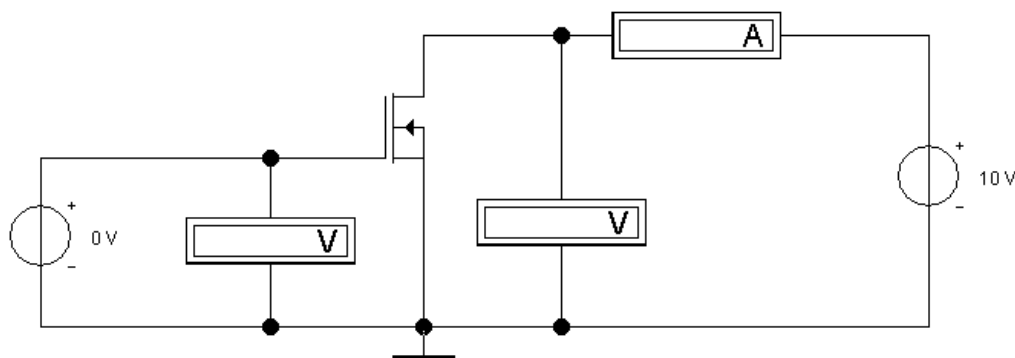


Рисунок 1

- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи затвора равным: 0 В; 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 2 В; 3 В. Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов занести в таблицу 1.
- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи затвора равным: 0 В; -0,1 В; -0,5 В; -1 В; -2 В; -3 В. и т.д. до запираания канала ПТ.
- Показания измерительных приборов занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Стоко-затворная вольтамперная характеристика

$U_{зи}, \text{В}$						
$I_c, \text{мкА}$						

По полученным данным, таблица 1, построить график функции $I_c = f(U_{зи})$ для заданного значения $U_{си}$. Сделать выводы.

4.2.2 Исследование стоковой характеристики полевого транзистора

- Установить напряжение на затворе $U_{зи} = 0.1\text{В}$.

- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи стока равным: 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 1,5 В, 3 В; 5 В; 8 В, 10 В. Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи сток-исток) занести в таблицу 2.

Таблица 2 - Стоковая вольтамперная характеристика при $U_{зи} = 0.1В$

$U_{си}, В$								
$I_c, мкА$								

- Установить напряжение на затворе $U_{зи} = 3В$. Последовательно установить значения ЭДС источника цепи стока равным: 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 1,5 В, 3 В; 5 В; 8 В, 10 В.
- Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи сток-исток) занести в таблицу 3.

Таблица 3 - Стоковая вольтамперная характеристика при $U_{зи} = 3В$

$U_{си}, В$								
$I_c, мкА$								

По полученным данным (таблицы 2, 3) постройте графики функции $I_c = f(U_{си})$ для двух значений $U_{зи}$.

Рассчитать: - крутизну $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \big|_{при U_{си} = const}$,

- дифференциальное сопротивление $R_{диф} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \big|_{при U_{зи} = const}$,

- коэффициент усиления полевого транзистора $M = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \big|_{при I_c = const}$

Сделать выводы.

4.3 Исследование вольтамперной характеристики МОП транзистора с индуцированным каналом

4.3.1 Исследование стоко-затворной характеристики полевого транзистора

- Собрать схему рисунок 2.

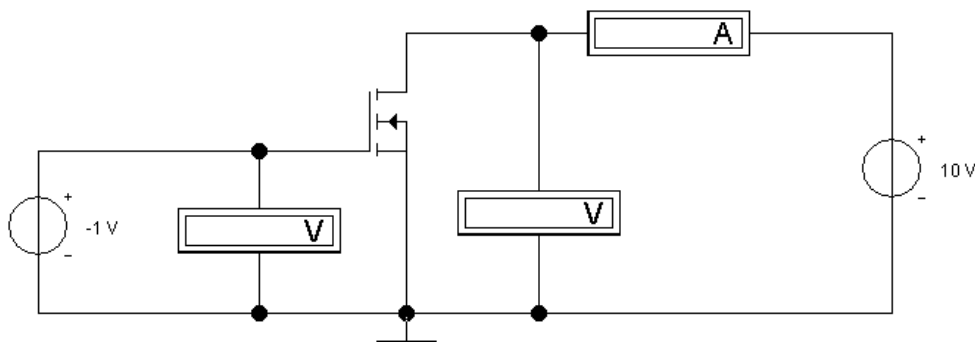


Рисунок 2

- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи затвора равным: 0 В; 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 2 В; 3 В.
- Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов занести в таблицу 4.

Таблица 4 – Стоко-затворная вольтамперная характеристика

U _{зи} , В						
I _с , мкА						

По полученным данным, таблица 8, построить график функции $I_c = f(U_{зи})$ для заданного значения U_{си}. Сделать выводы.

4.1.2 Исследование стоковой характеристики полевого транзистора

- Установить напряжение на затворе 0.1 В (значение источника ЭДС в цепи затвора).
- Последовательно установить значения ЭДС источника цепи стока равным: 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 1,5 В; 3 В; 5 В; 8 В, 10 В. Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи сток-исток) занести в таблицу 5.

Таблица 5 - Стоковая вольтамперная характеристика при U_{зи} = 0.1В

U _{си} , В								
I _с , мкА								

- Установить напряжение на затворе U_{зи} = 3В. Последовательно установить значения ЭДС источника цепи стока равным: 0,1 В; 0,5 В; 1 В; 1,5 В; 3 В; 5 В; 8 В, 10 В.
- Активизировать схему.
- Показания измерительных приборов (амперметра, вольтметра цепи сток-исток) занести в таблицу 6.

Таблица 6 - Стоковая вольтамперная характеристика при U_{зи}= 3В

U _{си} , В								
I _с , мкА								

По полученным данным (таблицы 9,10) постройте графики функции $I_c = f(U_{си})$ для двух значений U_{зи}.

Рассчитать: - крутизну $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \bigg|_{U_{си} = \text{const}}$,

- дифференциальное сопротивление $R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \bigg|_{U_{зи} = \text{const}}$,

- коэффициент усиления полевого транзистора $M = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \bigg|_{I_c = \text{const}}$

Сделать выводы.

5 Контрольные вопросы

1. Дайте определение МДП-ПТ. Изобразите его структуру и опишите структурные элементы.
2. Дайте определение МДП-ПТ с индуцированным каналом и со встроенным каналом.
3. Изобразите структуру и схему включения МДП-ПТ обогащенного типа с р-каналом. Сформулируйте правило определения полярностей
4. Объясните принцип работы МДП-транзистора. Дайте определение порогового напряжения. Напишите уравнение тока стока.
5. Сформулируйте определение стоковой характеристики и начертите ее. Объясните причины сублинейной зависимости тока I_c от $U_{си}$ на крутом участке и насыщения тока I_c - на пологом участке.
6. Дайте определение напряжения насыщения.
7. Сформулируйте определение проходной характеристики, начертите и объясните ее.
8. Дайте определение МДП-ПТ со встроенным каналом, изобразите схему включения его и объясните принцип работы.
9. Начертите и объясните стоковые и проходные характеристики. Отметьте на семействах этих характеристик области, соответствующие обогащению и обеднению канала основными НЗ.
10. Перечислите и поясните дифференциальные и физические параметры.
11. Вычертите эквивалентную схему МДП-ПТ.
12. Перечислите и поясните достоинства и недостатки ПТ.

Лабораторная работа №16
Исследование фотоэлектрических приборов

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование характеристик фототранзистора, столбиковых индикаторов и линейки светодиодов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Принцип действия полупроводниковых *оптоэлектронных* приборов основан на использовании электромагнитного излучения оптического диапазона для передачи, обработки или отображения информации. В семейство приборов некогерентной оптоэлектроники входят излучающие светодиоды, цифробуквенные индикаторы (дисплеи), резисторные, диодные, транзисторные, тиристорные оптопары и оптоэлектронные интегральные микросхемы.

Оптопарой называют прибор, состоящий из излучающего и фотоприёмного элементов, между которыми имеется оптическая связь и обеспечена электрическая изоляция. В резисторной оптопаре в качестве фотоприёмного элемента используется фоторезистор (рис. 1, а), в диодной, транзисторной и тиристорной – соответственно фотодиод, фототранзистор и фототиристор (рис. 1, б-г).

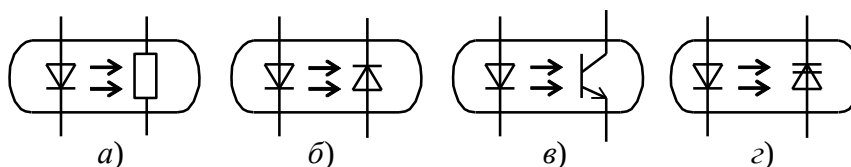


Рисунок 1

В оптоэлектронных интегральных микросхемах осуществляется оптическая связь между отдельными узлами или компонентами с целью изоляции их друг от друга (гальваническая развязка). В этих ИМС, представляющих собою гибридные модули с компараторами, счётчиками, дешифраторами и индикаторами, кроме излучателя и фотоприёмника, содержится устройство обработки сигнала, получаемого от фотоприёмника, в частности, устройство согласования оптико-электронного тракта с логическими ИМС по уровням сигналов, быстродействию, функциональным параметрам [5].

В состав библиотек программной среды MS12 входят следующие оптоэлектронные приборы:

- светодиоды разных цветов, в том числе двухцветные;
- транзисторные оптопары и гибридные микросхемы;
- 7- и 16-сегментные диодные дисплеи;
- линейные шкалы (линейки из десяти независимых светодиодов, в том числе со встроенными АЦП) и дисплеи.

2. СВЕТОДИОДЫ

Светодиоды – это излучающие полупроводниковые приборы (индикаторы), предназначенные для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения.

В основе функционирования светодиодов лежит явление преобразование электрической энергии в электромагнитное излучение, спектр которого полностью или частично лежит в видимой области, диапазон длин волн которой составляет 0,45...0,68 мкм. Светодиодная структура представляет собой p - n -переход, в которой при протекании прямого тока в несколько миллиампер в обеих областях перехода происходит рекомбинация инжектированных электронов и дырок, но наиболее эффективное преобразование инжектированных электронов в световую энергию протекает в базовой p -области.

Максимальное значение энергии, которое может выделяться при рекомбинации, равно ширине запрещённой зоны данного полупроводника. В полупроводниковых материалах с шириной запрещённой зоны менее 1,8 эВ может возбуждаться излучение с длиной волны более 0,7 мкм, которое лежит за пределами диапазона длин волн видимого света. Поэтому основными полупроводниковыми материалами, применяемыми для изготовления серийных светодиодов, являются фосфид галлия (GaP), твёрдые растворы GaAsP, GaAlP и карбид кремния (SiC) с шириной запрещённой зоны более 2 эВ.

Важнейшей характеристикой светодиода является яркостная характеристика $B(I_{np})$, где B – яркость света, в которой используется линейный участок (рис. 2, а). Номинальные токи серийных светодиодов $I_{np} = 2...20$ мА, при прямом и обратном напряжениях 2...3 В ($U_{обр. max} \leq 5$ В).

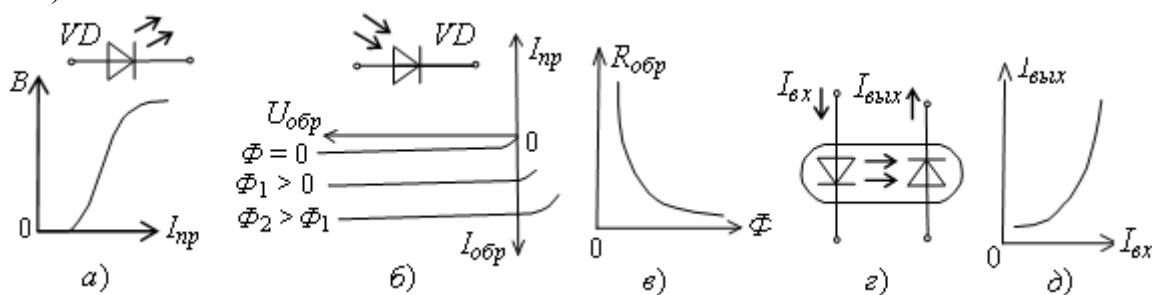


Рисунок 2

Светодиоды разных цветов, как и все светоизлучающие приборы в устройствах отображения, используются для визуального отображения информации. Светодиоды с переменным цветом свечения (зарубежные LTR293, отечественные АЛС331А и др.) содержат в корпусе два светоизлучающих p - n -перехода, один из которых имеет резко выраженный максимум спектральной характеристики в красной полосе, другой – в зелёной. При совместной работе p - n -переходов цвет излучения светодиода зависит от соотношения токов через эти переходы. Они могут служить индикаторами изменения токовых режимов в электронной цепи.

Светодиоды обладают рядом преимуществ: малые габариты, низкое напряжение питания, набор различных цветов свечения, большой срок службы и др., поэтому с успехом используются в схемах индикации включения, готовности к работе, наличия напряжения в блоке, аварийной ситуации узла и в других схемах, хорошо согласуясь по электрическим параметрам с полупроводниковыми приборами и микросхемами. Прямое падение напряжения библиотечных диодов равно 1,5 В, однако внутреннее сопротивление в моделях светодиодов принято равным нулю.

В практических целях светодиоды часто объединяют в единый набор из десяти элементов, образуя так называемую *линейную шкалу* или *линейку* независимых светодиодов.

3. ФОТОДИОДЫ, ОПТРОНЫ, ПРОБНИКИ, ДИСПЛЕИ

Фотодиод – это полупроводниковый прибор с *p-n*-переходом, обратный ток которого зависит от освещенности Φ (рис. 2, б). При поглощении квантов света в *p-n*-переходе или в прилегающих к нему областях кристалла полупроводника образуются новые носители заряда (пары электрон-дырка), поэтому обратный ток (фототок) через фотодиод при освещении возрастает. С увеличением светового потока Φ сопротивление перехода уменьшается (рис. 2, в). Приборы, предназначенные для использования этого явления, называют *фоторезисторами*, а транзисторы и тиристоры, реагирующие на эффект облучения световым потоком и способные одновременно усиливать фототок, называют соответственно *фототранзисторами* и *фототиристорами*.

Диодные оптроны – это приборы, состоящие из оптически связанных между собой элементов оптронной пары (управляемого светодиода и принимающего излучение фотодиода) и предназначенные для выполнения функциональных электрических и оптических преобразований. На рис. 2, г изображена схема диодного оптрона с внутренней прямой оптической связью. Изменение входного тока $I_{вх}$ через светодиод сопровождается изменением яркости его свечения и изменением освещенности фотодиода, что приводит к уменьшению сопротивления фотодиода и соответственно к увеличению тока $I_{вых}$ через выход оптрона (рис. 2, д).

Важным свойством такого оптрона является полная электрическая развязка входа и выхода прибора, что исключает обратную электрическую связь с его выхода на вход.

Алфавитно-цифровые 7- и 16-*сегментные дисплеи* и разноцветные *логические пробники* широко используются при моделировании цифровых устройств. Напряжение срабатывания 2,5 В пробников соответствует минимальному значению сигнала логической единицы цифровых ИМС ТТЛ-серии (с питанием 5 В). Пробники не потребляют тока, поэтому не оказывают воздействие на функционирование схем.

Библиотечный *недешифрирующий столбиковый индикатор* представляет собой набор из десяти диодов, аналогичный набору светодиодов, но отличается от него по ряду параметров.

Во-первых, диоды обладают внутренним сопротивлением, во-вторых, они требуют тока 5 мА, что следует учитывать при проектировании схем. Ток через каждый диод может проходить в обоих направлениях при отсутствии на них прямого падения напряжения в 1,5 В, характерного для светодиодов. Однако каждый диод обладает внутренним сопротивлением 500 Ом и характеризуется пороговым значением тока (5 мА), ниже которого соответствующая черта в приборе не светится. Как сопротивление диодов, так и пороговый ток можно изменить в диалоговом окне прибора.

В библиотеке среды MS12 размещены также *аналоговые столбиковые индикаторы* с одним аналоговым входом. Благодаря встроенным логическим схемам индикаторы преобразуют аналоговый сигнал в десять цифровых сигналов, которые отображаются в уровень столбика на своих дисплеях.

Большой выбор индикаторов сигналов и оптоэлектронных приборов программной среды MS12 придаёт наглядность, красочность и динамику эксперимента, что должно вызвать интерес студентов к проведению экспериментов и способствовать более глубокому осмыслению процессов, происходящих в электронных приборах и устройствах.

УЧЕБНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Задание 1. Собрать на рабочем поле среды MS12 схему для испытания *фототранзистора* с открытым оптическим каналом (рис. 3) и **установить** в диалоговых окнах компонентов их параметры или режимы работы с учётом приведенных на рисунке коэффициентов модели фототранзистора **МСТ6**. Скопировать схему (рис. 3) на страницу отчёта

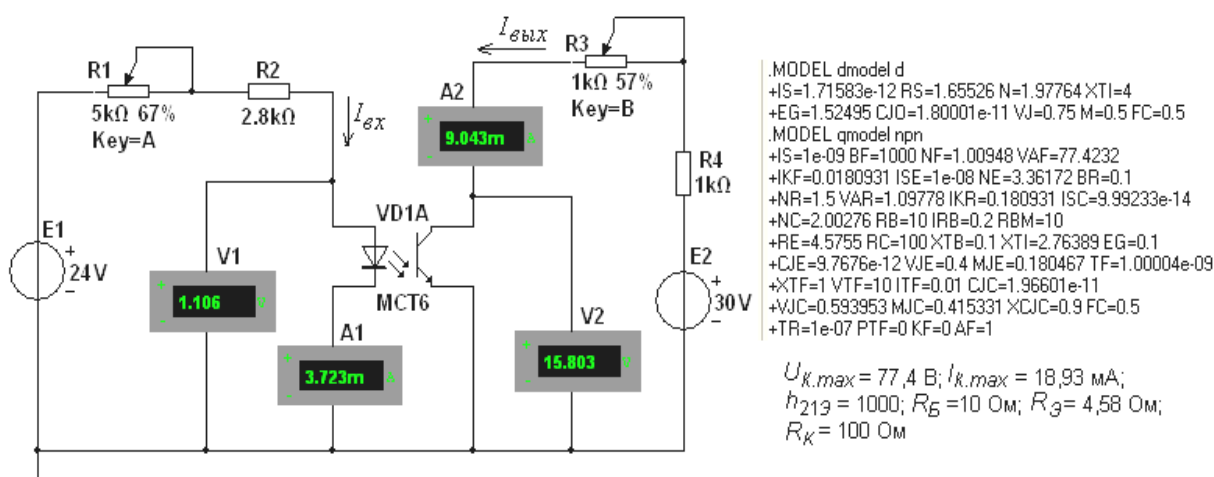


Рисунок 3

Запустить программу моделирования, **снять** и **построить** переходную характеристику $I_{вых}(I_{сх})$ фототранзистора **МСТ6**, **определить** коэффициент передачи тока $K_i = I_{вых}/I_{сх}$ и дифференциальный коэффициент передачи тока $K_{i\partial} = \Delta I_{вых}/\Delta I_{сх}$.

Задание 2. Собрать на рабочем поле среды MS12 схему для испытания *транзисторного оптрона* (рис. 4, а) и **установить** в диалоговых окнах компонентов их параметры или режимы работы. **Скопировать** схему (рис. 17.5) на страницу отчёта.

С помощью схемы (рис. 17.5, а) **снять** и **построить** амплитудно-частотную характеристику по напряжению $K_u = U_{вых}(U_{вх})$, $U_{вх} = 1$ мВ транзисторного оптрона (фототранзистора) **МСТ6**.

Определить верхнюю границу f_c полосы пропускания сигнала и **сравнить** её со значением, полученным с помощью плоттера **XBP1** на уровне $1/\sqrt{2}$ от коэффициента K_u на линейном

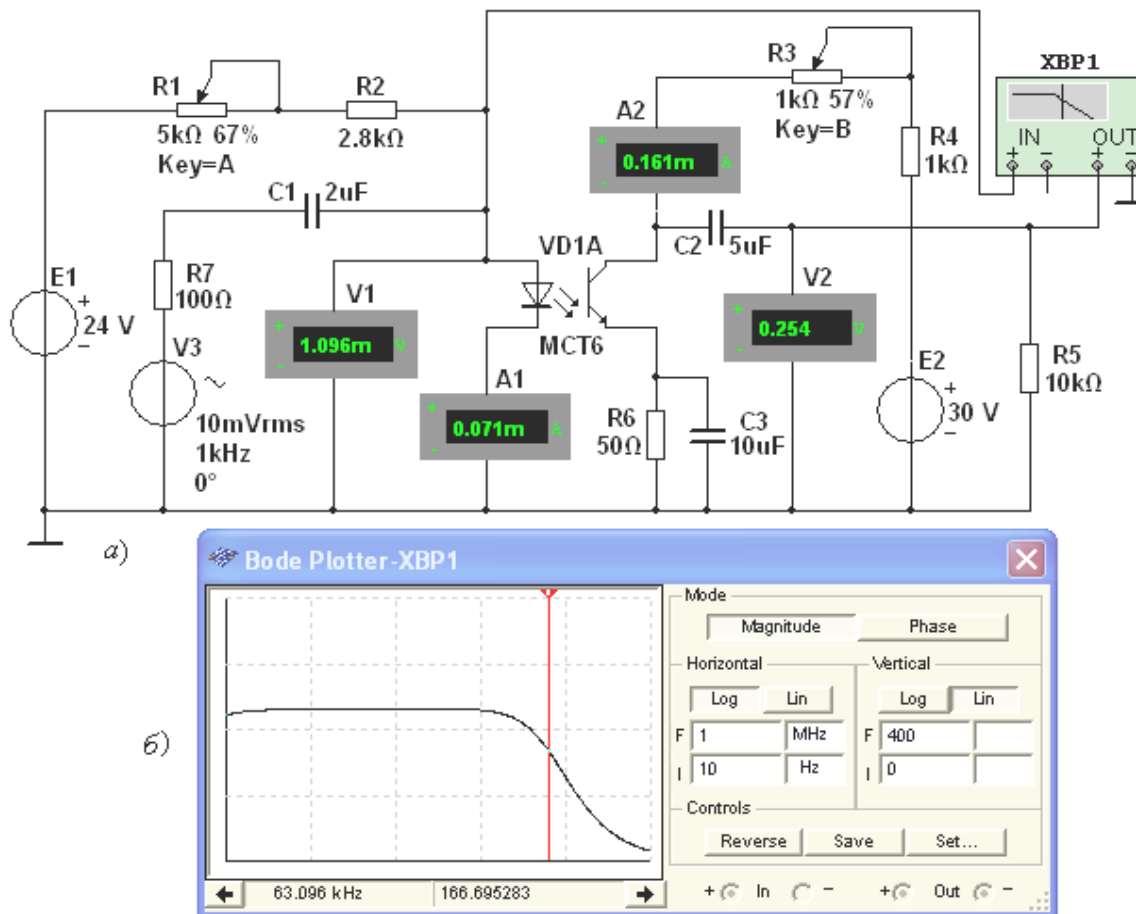


Рисунок 4

участке характеристики (рис. 4, б).

Задание 3. Собрать на рабочем поле среды MS12 схему для демонстрации работы *индикаторов* (пробников, дисплея, линеек) (рис. 5) и **установить** в диалоговых окнах компонентов их параметры или режимы работы.

В схему (рис. 5) включены пробники **X1**, ..., **X10**, 7-сегментный дисплей **DCD_HEX**, недешифрирующий столбиковый индикатор **BARGR**, аналоговый столбик **LBARGR**, линейка из десяти независимых светодиодов **LED4**, источники питания **E1**, **E2** и **VCC**, логический анализатор **XLA1**, переключатели **1**, ..., **4**, счётчик **CT**, дешифратор **DC** и другие компоненты.

На рис. 5 зафиксировано состояние индикаторных устройств после подачи седьмого тактового импульса с генератора **E1** на вход счётчика **CT**: разрядные сигналы (код 0110) на

выходе счётчика вызвали индикацию цифры 6 на 7-сегментном дисплее **DCD_HEX**, формирование на выходе дешифратора **DC** логического нуля только на линии **Q6**. Поэтому не засвечиваются пробник **X7** и седьмые полосы в столбиковом диодном индикаторе **BARGR** и в светодиодной линейке **LED4**.

Для демонстрации работы индикаторных устройств в одиночном режиме нужно **разомкнуть** ключ **Space**, набрать с помощью ключей **1, ..., 4** любой код (от 0000 до 1111) и

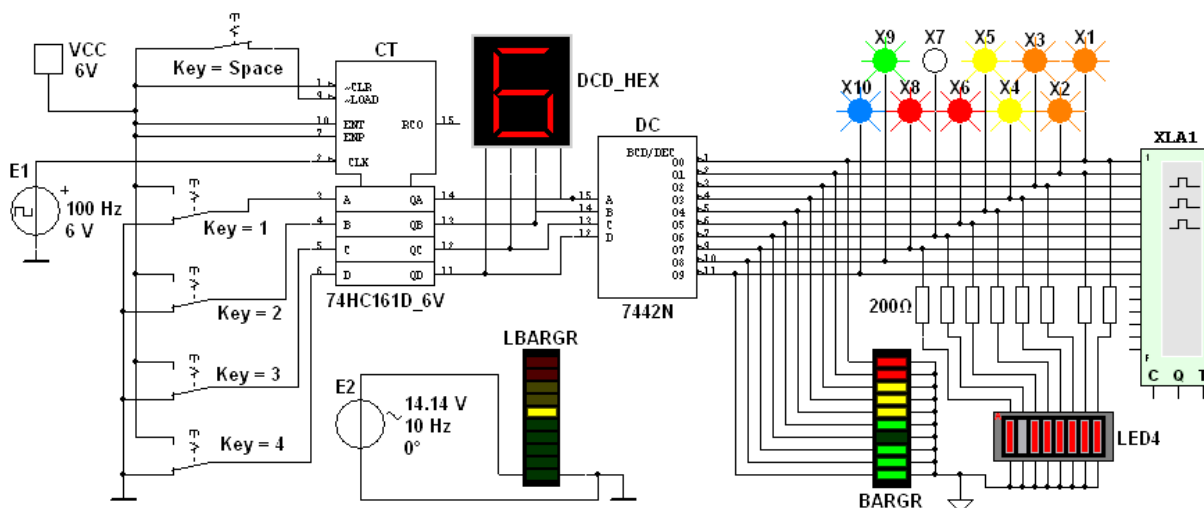


Рисунок 5

подать его на счётчик **СТ**.

В схеме (рис. 5) аналоговый столбик **LBARGR** подключен к источнику синусоидального напряжения **E2** с амплитудой ЭДС $E_2 = 14,14$ В. При моделировании показание индикатора (перемещение черточек снизу вверх и обратно) изменяется в соответствии с отсчётами синусоидального напряжения. Исходные значения: напряжение 10 В и внутреннее сопротивление 500 Ом аналогового столбика **LBARGR** могут быть изменены в его диалоговом окне.

При включении в схему линейки **LED4** из восьми независимых светодиодов (см. рис. 5) последовательно с каждым светодиодом были включены резисторы с сопротивлениям $R = 200$ Ом, значения которых определены, исходя из параметров светодиодов (на каждом светодиоде падение напряжения равно 1,66 В при номинальном токе 15 мА) и напряжений узлов схемы, куда включены светодиоды линейки.

Временные диаграммы выходных сигналов дешифратора **DC** можно наблюдать на экране логического анализатора **XLA1**.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень приборов, использованных в экспериментах, с их краткими характеристиками.
3. Изображения электрических схем для испытания оптоэлектронных устройств.

4. Таблицы и графики переходной и амплитудно-частотной характеристик фототранзистора.

5. Выводы по работе.

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К РАБОТЕ

1. Определите **понятие** "оптопара".

- ☐ Это излучающий полупроводниковый прибор, предназначенный для непосредственного преобразования электрической энергии в энергию некогерентного светового излучения
- ☐ Это полупроводниковый прибор с *p-n*-переходом, обратный ток которого зависит от освещенности
- ☐ Это прибор, состоящий из излучающего и фотоприёмного элементов, между которыми имеется оптическая связь
- ☐ Это набор из двух светодиодов или из двух фотодиодов

2. Укажите **значения параметров** (прямое напряжение U_{np} , прямой ток I_{np} , внутреннее сопротивление $R_{вн}$) при напряжении питания 5 В относящиеся:

а) к модели светодиода программной среды MS12:

- ☐ 1,66 В; 15 мА; 200 Ом ☐ 1,5 В; $I_{np} = *$; $R_{вн} = 0$ ☐ $U_{np} = 0$; 5 мА; 500 Ом

б) к модели фотодиода программной среды MS12:

- ☐ 1,66 В; 15 мА; 200 Ом ☐ 1,5 В; $I_{np} = *$; $R_{вн} = 0$ ☐ $U_{np} = 0$; 5 мА; 500 Ом

*) – не определено.

3. Укажите **напряжение срабатывания** моделей пробников среды MS12 при напряжении питания 5 В.

- ☐ 5 В ☐ 4,5 В ☐ 5,5 В ☐ 2,5 В ☐ 1,5 В

4. Укажите максимальное **число** (в шестнадцатеричном коде), которое может отображать 7-сегментный дисплей?

- ☐ 5 ☐ 7 ☐ 8 ☐ С ☐ F

5. Укажите, какую **функцию** реализует аналоговый столбиковый индикатор?

- ☐ Преобразование аналогового сигнала в десять цифровых сигналов
- ☐ Сигнализация о состоянии входов и выходов аналоговых устройств
- ☐ Индикация о состоянии входов и выходов цифровых устройств
- ☐ Измерение и индикация об уровне аналогового сигнала

6. Укажите, можно ли **включать светодиоды** линейки светодиодов **LED4** без ограничивающих ток резисторов?

☐ Да ☐ Нет

7. Укажите, влияют ли **на режим работы** электронных схем подключение к её узлам более пяти пробников среды MS12?

☐ Да ☐ Нет

8. Укажите, можно ли **включать светодиоды** столбикового индикатора **BARGR** без ограничивающих ток резисторов?

☐ Да ☐ Нет

9. Укажите, какой фундаментальный **принцип, явление** лежит в основе функционирования оптоэлектронных приборов?

- ☐ Передача электромагнитных волн оптического диапазона на большие расстояния
- ☐ Явление преобразования электрической энергии в некогерентное электромагнитное излучение оптического диапазона и явление преобразования электромагнитных волн оптического диапазона в электрическую энергию
- ☐ Явление когерентного излучения под действием электрической энергии
- ☐ Явление изменения структуры полупроводника под действием электромагнитного излучения оптического диапазона

1 Цель работы:

Экспериментальное исследование характеристик светодиода.

2 Задание на исследование:

1. Исследовать вольт-амперную характеристику и рассчитать параметры светодиода.

3 Краткие сведения из теории

Рассмотрим процессы, сопровождающие переходы электронов в полупроводнике с более низких уровней энергии на более высокие. Атом, молекула и гигантская молекула-кристалл являются квантовыми системами, т.е. могут поглощать и излучать энергию только квантами, которым соответствуют указанные переходы электронов. При переходе электрона с донорного уровня в зону проводимости, или с уровня в валентной зоне на акцепторный уровень возникает дырка либо на донорном уровне, либо в валентной зоне. В итоге в кристалле образуется электронно-дырочная пара с энергией ΔW_n , много меньшей ширины запрещенной зоны. Если выполнено условие $\Delta W_n, \Delta W_p < kT$, то число пар с энергией $\Delta W_n, \Delta W_p < \Delta W$ равно числу уровней. Поэтому при образовании дырки поглощается энергия $\geq \Delta W$, либо $\geq \Delta W_n, \Delta W_p$, а при возвращении электрона излучается точно такая же энергия.

Количество переходов с излучением и поглощением энергии связано с заполнением уровней квантовой системы.

При тепловом равновесии, согласно распределению Больцмана; на более высоком энергетическом уровне содержится меньше частиц, чем на более низком. Это соответствует принципу минимума энергии. *Чтобы возникло неравновесное излучение, нужно иметь на более высоком энергетическом уровне большее число частиц, чем на более низком.* Такое распределение частиц по энергетическим уровням называется инверсной заселенностью. Оно является необходимым условием для усиления излучения, проходящего через кристалл.

Чтобы получить существенное усиление света, в полупроводнике нужно иметь значительное число электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне, т.е. иметь сильно легированный (вырожденный) полупроводник. В одном полупроводнике создать вырождение как в электронной, так и в дырочной подсистемах очень сложно, поэтому рассмотрим р-п-переход, состоящий из двух вырожденных полупроводников, для которых выполняется неравенство

$$W_{F.n} - W_{F.p} > \Delta W \quad (1)$$

При этом электроны из зоны проводимости n-полупроводника могут легко переходить в валентную зону p-полупроводника только на свободные уровни, находящиеся в интервале от W_n до $W_{F,p}$, так как остальные уровни заняты электронами (не заняты дырками).

Если пропустить через p-n-переход из двух вырожденных полупроводников электромагнитное излучение, энергия квантов которого находится в интервале от $h \cdot \nu_{max} = W_{F,n} - W_{F,p}$ до $h \cdot \nu_{min} = \Delta W$, то такие фотоны не могут вызвать электронных переходов из валентной зоны в зону проводимости и поэтому не могут поглощаться в полупроводнике. В то же время эти фотоны могут легко перевести электроны из зоны проводимости в валентную зону и вызвать вынужденную рекомбинацию. При рекомбинации разрушаются электронно-дырочные пары и рождаются фотоны, точно совпадающие по своим свойствам с первичными. Такой p-n-переход может усиливать свет в полосе частот $\Delta \nu = \nu_{max} - \nu_{min}$. Ширина этой полосы определяется расположением уровней Ферми электронов и дырок и шириной запрещенной зоны ΔW . Следовательно, $W_{F,n} - W_{F,p} > \Delta W$ есть необходимое условие для работы полупроводникового квантового генератора. В этом случае концентрация электронов у потолка валентной зоны меньше, чем у дна зоны проводимости. Поэтому $W_{F,n} - W_{F,p} > \Delta W$ называют условием инверсной заселенности.

Если поместить такой p-n-переход, состоящий из двух вырожденных полупроводников, между отражающими зеркалами, то возникшие фотоны снова и снова будут проходить через кристалл, порождая новые лавины фотонов характеризуемые частотой излучения:

$$\nu = \frac{W_D - W_A}{h}, \quad (2)$$

где W_D, A – энергия донорного, акцепторного уровня;

h – постоянная Планка.

За достаточно малое время подавляющее число фотонов будет обладать очень близкими значениями энергии. Следовательно, электромагнитное излучение, заключенное между зеркалами, станет очень близким к монохроматическому. Если одно из зеркал сделать полупрозрачным, то через него будет проходить почти монохроматическое излучение, и мы получим полупроводниковый квантовый генератор. Учитывая область значений энергии, в которой находятся значения запрещенных зон полупроводников, мы получим оптический квантовый генератор, который при невысоком качестве зеркал дает расходящееся излучение. Это - светодиод.

Если привести в контакт вырожденные p- и n-полупроводники с одинаковой шириной запрещенной зоны ΔW , то вследствие установления термодинамического равновесия уровни энергии W_{Fn} и W_{Fp} выравниваются (рис. 1).

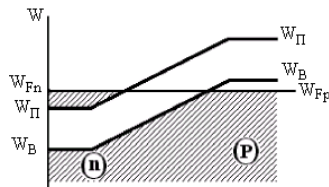


Рисунок 1

Этот процесс занимает очень короткое время. Условие $W_{F.n} - W_{F.p} > \Delta W$ переходит в равенство $W_{F.n} = W_{F.p}$, т.е. необходимое условие усиления света нарушается. Для восстановления его к р-п- переходу можно, например, приложить внешнюю разность потенциалов. Чтобы получить генерацию, необходимо выполнить условие:

$$q \cdot U > \Delta W \quad (3)$$

В момент зажигания светодиода (начало генерации) имеем:

$$q \cdot U = \Delta W = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda_{\max}}, [\text{Дж}] \quad (4)$$

$$\text{Откуда: } \lambda_{\max} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\Delta W [\text{Дж}]} = \frac{h \cdot c}{q \cdot \Delta W [\text{эВ}]} = \frac{h \cdot c}{q \cdot U} \quad (5)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость электромагнитной волны;

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

U - напряжение прикладываемое к переходу;

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

$\lambda_{\max}$ - длина волны генерируемого «света»;

4 Порядок проведения исследований

Исследование проводится на лабораторной установке Elvis II

Перед началом исследований изучить руководство по Elvis II

Собрать схему рисунок 2.

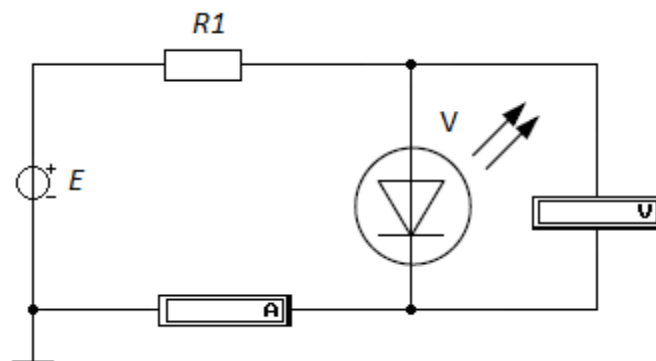
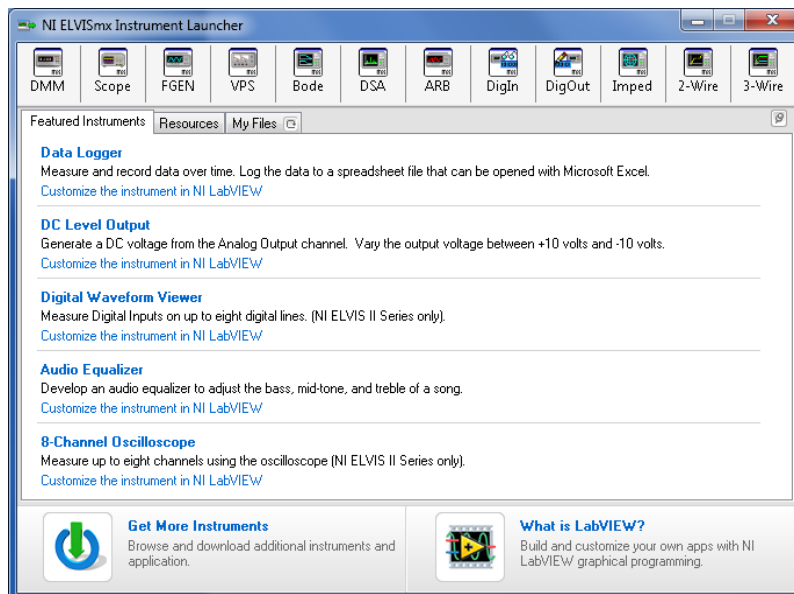


Рисунок 2

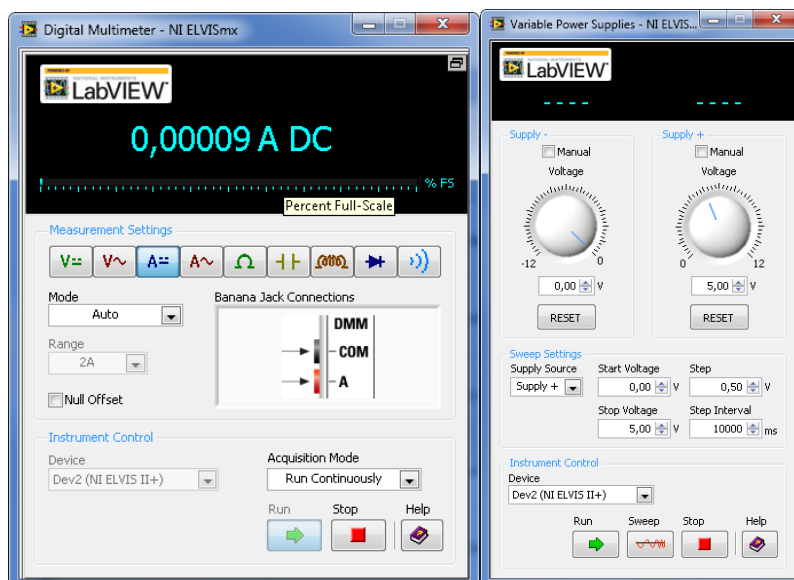
Схема содержит: источник ЭДС постоянного тока E (регулируемый источник питания (Variable Power Supplies -VPS)), амперметр (цифровой мультиметр (Digital Multimeter –

DMM)), резисторы $R1=1\text{кОм}$ и светодиод, вольтметр (мультиметр DT 838 в режиме U_{2000m}).



Для исследования использовать красный светодиод

Перевести цифровой мультиметр (Digital Multimeter – DMM) в режим измерения постоянного тока (нажать клавишу A-). Щупы должны быть подсоединены к боковой панели Elvis II в соответствии с изображением на лицевой панели DMM.



Установить на источнике постоянного тока (VPS):

Плавно увеличивая напряжение от 0 V до напряжения при котором появляется свечение диода, зафиксировать данное напряжение. Рассчитать по (5) длину волны.

Показания приборов занести в таблицу 1

Таблица 1

Красный светодиод	U, мВ	0								
	I, мА	0								
Желтый светодиод	U, мВ	0								
	I, мА	0								
Синий светодиод	U, мВ	0								
	I, мА	0								

Построить график вольт – амперной характеристики.

Рассчитайте статические и дифференциальные значения сопротивления светодиода.

Данные для расчетов показать на вольт-амперной характеристике.

В схему вставить желтый диод

Повторить исследование.

В схему вставить синий светодиод. Повторить исследование.

Сделать выводы.

Задание 2. Собрать на рабочем поле среды MS12 схему индикации состояния выхода логического элемента И-НЕ (NAND) (рис. 18.4) и установить в диалоговых окнах

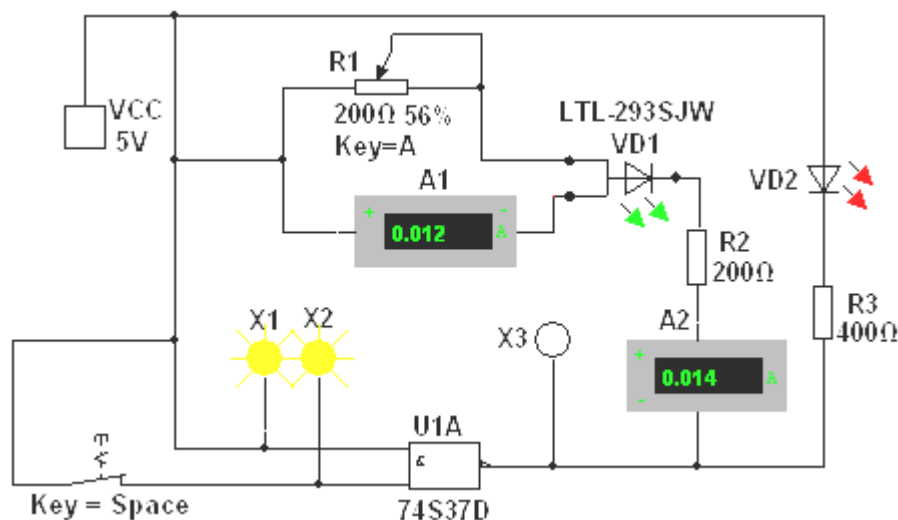


Рисунок 3

компонентов их параметры или режимы работы. **Скопировать** схему (рис. 18.4) на страницу отчёта.

Запустить программу моделирования элемента **NAND** с индикацией его состояния посредством двухцветного светодиода **VD1**, светодиода оранжевого цвета **VD2** и пробников **X1**, **X2** и **X3**. **Замкнуть** ключ **Space**/ Так как на оба входа элемента **NAND** подана логическая 1 (пробники **X1** и **X2** светятся), то на его выходе формируется логический 0 (пробник **X3** не засвечивается, а светодиоды **VD1** и **VD2** светятся, так как на их аноды подано напряжение 5 В от источника **VCC**). При размыкании ключа **Space** на выходе элемента **NAND** формируется

логическая 1, поэтому светодиоды **VD1** и **VD2** и пробник **X2** гаснут, а пробник **X3** засвечивается.

Изменяя сопротивление потенциометра **R1**, **определить** с помощью амперметров **A1** и **A2** токи, протекающие через *p-n*-переходы светодиода **VD1**, при которых излучается красный свет, оба перехода гаснут и начинает излучаться зелёный свет.

5 Контрольные вопросы

1. Поясните явление фоторезистивного эффекта
2. Поясните явление фотогальванического эффекта
3. Поясните влияние освещенности на характеристики *p-n*-перехода.
4. Дать определение и пояснить порядок расчета параметров
 - статическое значение сопротивления фоторезистора,
 - дифференциальное значение сопротивления фоторезистора.

Литература

1. Элементная база радиоэлектронной техники: учебник: Направления подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, 09.03.01 Информатика и вычислительная техника. Бакалавриат / П.А. Пашинцев, В.П. Пашинцев, Г.И. Линец, В.И. Никулин; под общ. ред. П.А. Пашинцева; ФГАОУ ВПО Сев.-Кав. федер. ун-т. - Ставрополь: СКФУ, 2022. - 399 с., экземпляров неограниченно.
2. Водовозов А.М. Основы электроники [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Водовозов А.М.— Электрон. текстовые данные.— М.: Инфра-Инженерия, 2016.— 140 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/51731>.— ЭБС «IPRbooks», экземпляров неограниченно.
3. Яковлев, С. В. Электроника / С. В. Яковлев – Ставрополь : Изд-во СевКавГТУ, 2012.
4. Бурбаева, Н. В. Основы полупроводниковой электроники / Н. В. Бурбаева, Д. С. Днепровская – М. : Издательство «Физматлит», 2012. – 312 с. (электронно-библиотечная система издательства «Лань»).
5. Игумнов, Д. В. Основы полупроводниковой электроники : учебное пособие / Д. В. Игумнов, Г. П. Костюнина – М. : Издательство «Горячая линия-Телеком», 2011. – 394 с. (электронно-библиотечная система издательства «Лань»).
6. Марченко, А. Л. Основы электроники : учебное пособие / А. Л. Марченко – М. : Издательство «ДМК Пресс», 2010. – 296 с. (электронно-библиотечная система издательства «Лань»).
7. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника. – Ростов н/Д: Феникс, 2009.
8. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB- М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
9. Марченко, А. Л. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim : учебное пособие / А. Л. Марченко, С. В. Освальд – М. : Издательство «ДМК Пресс», 2010. – 448 с. (электронно-библиотечная система издательства «Лань»).
10. Яковлев, С. В. Электроника: учебно-методическое пособие (практикум) / С. В. Яковлев – Ставрополь: СКФУ, 2014. – 292 с.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по организации и проведению
самостоятельной работы

дисциплине

«МАТЕРИАЛЫ и ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»

для студентов направления

11.03.04 Электроника и наноэлектроника Направленность (Профиль)

Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь 2026 г.

Оглавление	с
Введение.....	3
1 Общая характеристика самостоятельной работы студента при изучении дисциплины	4
2. План-график выполнения СРС по дисциплине	5
3. Контрольные точки и виды отчетности по ним.....	5
4.Методические рекомендации по изучению теоретического материала	5
5. Методические указания по выполнению лабораторных работ.....	7
6. Методические указания по подготовке к экзамену.....	10
7. Рекомендуемая литература	16

Введение

Целью самостоятельной работы по дисциплине «Материалы и элементы электронной техники» является изучение физических принципов работы, методов изготовления и возможностей применения электронных устройств на полупроводниковых приборах обеспечение ясного понимания студентами задач, решаемых с помощью электронных устройств, формирование представлений о математических методах их анализа и проектирования.

Самостоятельная работа должна способствовать развитию творческих способностей студентов, умению формулировать и решать задачи оптимизации систем связи, умению творчески применять и самостоятельно повышать свои знания в области инфокоммуникаций.

Задача самостоятельной работы по дисциплине «Элементная база радиоэлектронной техники» состоит в том, чтобы ознакомить студентов с современными методами анализа и синтеза электронных устройств.

Важность изучения таких разделов дисциплины как: физические основы электроники, элементная база электроники, основы микроэлектроники, функциональная Элементная база радиоэлектронной техники обусловлена их основополагающим значением единого процесса изучения профессиональных дисциплин при подготовке бакалавра данного направления и формировании следующих компетенций обучающегося:

- способностью владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации.
- способностью иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях; осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ
- способностью проводить инструментальные измерения, используемые в области инфокоммуникационных технологий и систем связи

1. Общая характеристика самостоятельной работы студента при изучении дисциплины «Материалы и элементы электронной техники»

Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельно работы	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
				СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
3 семестр						
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-1 _{ОПК-2} ИД-2 _{ОПК-2} ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Компьютерное моделирование с использованием графических редакторов	Отчеты по лабораторным работам	Зачетное задание (контрольная точка), выполнение индивидуальных (групповых) заданий из лабораторных работ	39	1.50	40.50
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-1 _{ОПК-2} ИД-2 _{ОПК-2} ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Самостоятельное изучение литературы	Конспект	Собеседование, оценка ответов по вопросам заданных тем	26.50	2	28.50
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-1 _{ОПК-2} ИД-2 _{ОПК-2} ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Самотестирование, подготовка к тестированию	Результаты контрольного компьютерного тестирования	Тестирование с помощью компьютерных тестовых заданий	10	2	12.00
Итого за семестр				75.50	5.50	81.00
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-1 _{ОПК-2} ИД-2 _{ОПК-2} ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Подготовка к экзамену	Экзамен	Оценка ответов по экзаменационным билетам	39	1.50	40.50
Всего				114.5	7.00	121.50

2. План-график выполнения самостоятельной работы

Название контрольной точки Семестр 3	Срок сдачи	Номер недели учебного семестра	Вес в баллах
Физические основы электроники		4	15
Полупроводниковые диоды		8	15
Биполярные транзисторы		12	15
Полевые транзисторы		15	10

3. Контрольные точки и виды отчетности по ним

Название контрольной точки Семестр 3	Срок сдачи. Номер контрольной точки	Виды отчетности по итогам самостоятельной работы	Средства и технологии оценки
Физические основы электроники	1	Собеседование, защита лабораторной работы, отчет по практическим занятиям	Собеседование, отчет письменный
Полупроводниковые диоды	2	Собеседование, защита лабораторной работы, отчет по практическим занятиям	Собеседование, отчет письменный
Биполярные транзисторы	3	Собеседование, защита лабораторной работы, отчет по практическим занятиям	Собеседование, отчет письменный
Полевые транзисторы	4	Собеседование, защита лабораторной работы, отчет по практическим занятиям	Собеседование, отчет письменный

4. Методические рекомендации по изучению теоретического материала

В результате освоения дисциплины студент должен знать:

- физические эффекты и процессы, лежащие в основе принципов действия электронных приборов,
- устройство, принцип действия, схемы включения и режимы работы приборов, вид статических характеристик и их семейств в различных схемах включения,
- основы технологии интегральных схем, микросхемотехнику, принцип работы базовых каскадов аналоговых и логических цифровых схем

Рекомендации по организации работы при самостоятельном изучении тем лекционных занятий и подготовке к лабораторным работам

Студентам рекомендуется:

- в день проведения занятий проработать, изученный на занятии учебный материал по конспекту. При этом необходимо выделить вопросы, на которые следует обратить большее

внимание при дальнейшем изучении текущей темы. После проработки учебного материала необходимо ответить на, рекомендуемые контрольные вопросы;

- с целью качественного закрепления изученного материала в последующем следует более детально проработать учебный материал с использованием рекомендованной литературы. Студентам рекомендуется выделить вопросы, требующие более детальной проработки с помощью преподавателя;

- накануне проведения лабораторного или практического занятия студенту рекомендуется закрепить теоретический материал, который вынесен на эти виды учебных занятий и уяснить, его роль для достижения поставленных целей, подготовить вопросы, требующие уточнения у преподавателя.

Рекомендации по организации работы с литературой

Для овладения, закрепления и систематизации знаний студентам рекомендуется самостоятельная работа с рекомендованной литературой и конспектом лекций. При самостоятельной работе с рекомендованной литературой студентам рекомендуется проводить конспектирование учебного материала, изложенного в рекомендованных источниках.

Конспектирование источников проводится при детальном изучении темы, при этом студентам рекомендуется:

- дополнять конспект лекционного занятия путем его расширения по наиболее важным вопросам, рассмотренным на занятии. Конспектирование источников заключается в дополнении конспекта следующими положениями:

- основные определения и их физический смысл;
- основные физические принципы формирования и обработки сигналов в системах связи с графическими иллюстрациями;
- основные математические соотношения с раскрытием их физического смысла;
- выводы по учебным вопросам, изучаемой темы занятий.

Контроль этого вида самостоятельной работы осуществляется на учебных занятиях путем проверки преподавателем конспекта лекций.

При конспектировании источников студенты должны исходить из рационального объема, конспектируемого материала. Конспект должен быть кратким и понятным при его использовании после изучения текущей темы.

При конспектировании источников рекомендуется отдельные рисунки, наиболее важные их фрагменты, наиболее важные формулы выделять цветом. При ведении конспекта на занятии рекомендуется заполнять две трети страницы листа тетради по вертикали, а свободную часть использовать при дополнении конспекта, по изучаемому вопросу.

Для успешного освоения дисциплины, необходимо самостоятельно детально изучить представленные темы по рекомендуемым источникам информации:

№ п/п	Темы для самостоятельного изучения	Рекомендуемые источники информации (№ источника)			
		Основная	Дополнительная	Методическая	Интернет-ресурсы
1	Силовые полупроводниковые приборы	1	1		2
2	Компоненты интегральных микросхем.	2	5	1	
3	Интегральные микросхемы программируемой логики.	3	5		3
4	Основные элементы функциональной электроники.	5			3

Конспектирование источников оценивается удовлетворительно и неудовлетворительно. Работа по конспектированию источников оценивается удовлетворительно если:

- конспект имеет достаточный объем детализации по, изучаемой теме, обеспечивающий заданный уровень освоения теоретического материала дисциплины;
- конспект оформлен аккуратно, изучаемый материал изложен последовательно в соответствии с порядком изучения дисциплины, содержит обобщающие выводы по каждой теме.

Работа по конспектированию источников оценивается неудовлетворительно, если не выполнены требования на оценку удовлетворительно.

5. Методические указания по выполнению лабораторных работ

При выполнении практикума по дисциплине для достижения базового уровня сформированности компетенций студент должен уметь:

- определять дифференциальные параметры электронных приборов по их статическим характеристикам,
- проводить самостоятельный анализ физических процессов, происходящих в электронных устройствах, проектировать и рассчитывать их,
- осуществлять компьютерное моделирование электронных устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.

Владеть:

- навыками экспериментального определения статических характеристик и параметров полупроводниковых приборов и устройств в рамках физического и математического моделирования.
- навыками применения полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.
- основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации по электронике

5.1. Методические указания при подготовке к лабораторной работе

Подготовку к лабораторной работе рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- уяснить тему и цель, предстоящей лабораторной работы;
- изучить теоретический материал в соответствии с темой лабораторной работы (рекомендуется использовать рекомендованную литературу, конспект лекций, учебное пособие (практикум по лабораторным работам);
- ознакомиться с оборудованием и материалами, используемыми на лабораторной работе (при использовании специализированного оборудования необходимо изучить порядок и правила его использования).

5.2. Методические указания при выполнении лабораторной работы

При выполнении лабораторной работы студенты должны строго соблюдать, установленные правила охраны труда.

При выполнении лабораторной работы студентам рекомендуется:

- уяснить цель, выполняемых заданий и способы их решения;
- задания, указанные в лабораторной работе выполнять в той последовательности, в которой они указаны в лабораторном практикуме;
- при выполнении практического задания и изучении теоретического материала использовать помощь преподавателя;
- оформить отчет по лабораторной работе;
- ответить на контрольные вопросы.

5.3. Методические указания при подготовке к защите лабораторной работы

При подготовке к защите лабораторной работы студентам рекомендуется:

- подготовить отчет по лабораторной работе;
- уметь обосновать, сделанные выводы;
- закрепить знания теоретического материала по теме лабораторной работы (рекомендуется использовать контрольные вопросы);
- знать порядок проведения расчетов (проводимых исследований);
- уметь показать и пояснить порядок исследований при использовании специализированного оборудования.

Защита лабораторной работы осуществляется путем собеседования студента с преподавателем. При собеседовании студент представляет на проверку отчет по лабораторной работе. Собеседование со студентом, претендующим на оценку «отлично» проводится по вопросам продвинутого уровня обучения. Собеседование со студентом, не претендующим на оценку «отлично» проводится по вопросам базового уровня обучения.

Критерии оценки собеседования:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если студент дал полный, развернутый ответ на поставленный вопрос, при этом показана совокупность осознанных знаний по теме дисциплины, доказательно раскрыты основные положения вопроса; в ответе прослеживается четкая структура, логическая последовательность, отражающая сущность раскрываемых понятий. Ответ изложен литературным языком с использованием технической терминологии. Могут быть допущены недочеты в определении понятий, исправленные студентом самостоятельно в процессе ответа. Ситуационная задача по теме решена правильно.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент дал полный, развернутый ответ на поставленный вопрос, при этом показано умение выделить существенные и несущественные признаки, причинно-следственные связи. Ответ четко структурирован, логичен, изложен литературным языком с использованием технической терминологии. Могут быть допущены 2-3 неточности или незначительные ошибки, исправленные студентом с помощью преподавателя. Ситуационная задача по теме решена правильно, но при ее решении допущено не более одной ошибки.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент дал недостаточно полный и недостаточно развернутый ответ. Логика и последовательность изложения имеют нарушения. Допущены ошибки в раскрытии понятий, употреблении терминов. Студент не способен самостоятельно выделить существенные и несущественные признаки и причинно-следственные связи. В ответе отсутствуют выводы. Умение раскрыть значение обобщенных знаний не показано. Речевое оформление требует поправок, коррекции. Ситуационная задача по теме решена правильно, но при ее решении допущено не более двух ошибок.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если ответ представляет собой разрозненные знания с существенными ошибками по вопросу. Присутствуют фрагментарность, нелогичность изложения. Студент не осознает связь обсуждаемого вопроса с другими вопросами темы. Отсутствуют выводы, конкретизация и доказательность изложения. Речь неграмотная, терминология не используется. Дополнительные и уточняющие вопросы преподавателя не приводят к коррекции ответа студента, или ответ на вопрос полностью отсутствует или студент отказался от ответа. Ситуационная задача по теме решена неправильно.

6. Методические указания по подготовке к экзамену

Перед экзаменом студенту необходимо полностью завершить лабораторные работы и выполнить задания практических занятий. При наличии задолженностей по текущей аттестации по данной дисциплине студент к экзамену не допускается. Экзамен по дисциплине предусмотрен в устной форме по билетам. В состав билета включается два теоретических

вопроса и задача (практическое задание). Экзаменатор имеет право с целью выяснения глубины знаний задавать обучающимся до 2 – 3-х дополнительных вопросов в рамках экзаменационных тем.

Для подготовки ответов на экзамене каждому студенту предоставляется 30 минут. При подготовке к ответу обучающийся должен вести записи на листе подготовки к ответу, который затем сдает экзаменатору.

Во время экзамена студенты не имеют права пользоваться посторонними источниками информации. Во время экзамена студент имеет право пользоваться ПЭВМ (лабораторной установкой) для выполнения практического задания.

Студент, испытывающий затруднения при подготовке к ответу по выбранному билету, имеет право получить второй билет с соответствующим продлением времени на подготовку. При окончательной оценке ответа отметка снижается на один балл. Выдача третьего билета не разрешается.

В случае неявки студентом на экзамен в экзаменационной ведомости словами записывается «не явился» и заверяется подписью преподавателя.

Если во время сдачи или пересдачи экзамена со стороны студента допущены нарушения учебной дисциплины (списывание, использование средств мобильной связи, персональных или планшетных компьютеров, аудио- или видеоплееров, других технических устройств), нарушения Правил внутреннего распорядка СКФУ, предпринята попытка подлога документов, преподаватель вправе удалить обучающего с экзамена с выставлением в ведомости отметки «неудовлетворительно».

Вопросы для подготовки к экзамену, типовые задачи

Базовый уровень

Вопросы для проверки уровня обученности:

1. Электронно-дырочный переход.
2. Диоды и их свойства.
3. Разновидности диодов.
4. Биполярные транзисторы.
5. Полевые транзисторы.
6. Динисторы.
7. Тиристоры.
8. Параметры предельных режимов работы транзисторов.
9. Первичные пробой в транзисторах.
10. Вторичные пробой в транзисторах.
11. Область безопасной работы транзистора.

12. Защита транзисторов от пробоев.
13. Основные понятия микроэлектроники.
14. Интегральные схемы.
15. Особенности интегральных схем как нового типа электронных приборов.
16. Проектирование полупроводниковых приборов.
17. Разновидности технологий изготовления интегральных микросхем.
18. Классификация и основные параметры цифровых логических элементов.
19. Серийные логические ИМС.
20. Устройство и принцип действия операционного усилителя.
21. Основные характеристики операционного усилителя.
22. Классификация операционных усилителей.
23. Классификация специализированных микросхем.
24. Полузаказные интегральные микросхемы на основе базовых матричных кристаллов.
25. Классификация интегральных микросхем программируемой логики.
26. Программируемые логические матрицы.
27. Программируемые матрицы логики.
28. Программируемые пользователем вентильные матрицы.
29. Предпосылки возникновения функциональной электроники.
30. Направления развития функциональной электроники.
31. Разновидности ПЗС-матриц.

Задания для проверки умений и навыков

1. Рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления заданного типа выпрямительного диода.
2. Рассчитать токи и напряжения схемы при последовательном включении диода и резистора.
3. Рассчитать токи и напряжения схемы при параллельном включении диода и резистора.
4. Рассчитать токи и напряжения схемы при смешанном включении диода и резисторов.
5. Рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления заданного типа стабилитрона.
6. Рассчитать токи и напряжения схемы при последовательном включении стабилитрона и резистора.
7. Рассчитать токи и напряжения схемы при параллельном включении стабилитрона и резистора.
8. Рассчитать токи и напряжения схемы при смешанном включении стабилитрона и резисторов.

9. Рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления заданного типа туннельного диода.
10. Рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления заданного типа выпрямительного диода.
11. Рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления заданного типа диодистора.
12. Рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления заданного типа тиристора.
13. Рассчитать h -параметры заданного типа биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой.
14. Рассчитать h -параметры заданного типа биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
15. Рассчитать ток базы заданного типа биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
16. Рассчитать ток коллектора заданного типа биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
17. Определить параметры элементов схемы для активного режима заданного типа биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
18. Определить параметры элементов схемы для режима насыщения заданного типа биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
19. Определить параметры элементов схемы аналогового ключа на базе заданного типа биполярного транзистора.
20. Для заданного полупроводникового прибора определить его тип, назначение, основные характеристики.

Повышенный уровень

Вопросы для проверки уровня обученности:

1. Биполярные транзисторы с изолированным затвором.
2. Статический индукционный транзистор.
3. Микроэлектронно-механические системы.
4. Выполнение проекта производства полупроводниковых приборов.
5. Завод полупроводниковых приборов.
6. Динамические свойства операционного усилителя.
7. Инвертирующие и неинвертирующие усилители.
8. Проектирование специализированных ИС на основе стандартных ячеек.
9. Сложные программируемые логические устройства.
10. Микро элементная база радиоэлектронной техники динамических неопределенностей.

11. Понятие о поверхностно-акустических волнах.
12. Понятие о цилиндрических магнитных доменах.
13. Понятие о приборах с зарядовой связью.

Задания для проверки умений и навыков

1. Определить параметры элементов схемы простейшего усилителя на базе заданного типа биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
2. Определить параметры элементов схемы простейшего усилителя на базе заданного типа биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой.
3. Определить параметры элементов схемы эмиттерного повторителя на базе заданного типа биполярного транзистора.
4. Определить параметры элементов схемы LCгенератора на базе заданного типа туннельного диода.
5. Рассчитать параметры элементов однополупериодной схемы выпрямления.
6. Рассчитать параметры элементов схемы параметрического стабилизатора.
7. Определить параметры элементов схемы эмиттерного повторителя на базе заданного типа биполярного транзистора.
8. Рассчитать токи и напряжения схемы при смешанном включении двух диодов и резистора.

Критерии оценки:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов; исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно излагает материал; свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний; использует в ответе дополнительный материал все предусмотренные программой задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному; анализирует полученные результаты; проявляет самостоятельность при выполнении заданий.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если теоретическое содержание курса освоено полностью, необходимые практические компетенции в основном сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения достаточно высокое. Студент твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, большинство предусмотренных программой заданий выполнено, но в них имеются ошибки, при ответе на

поставленный вопрос студент допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, наблюдаются нарушения логической последовательности в изложении программного материала.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если он не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы, необходимые практические компетенции не сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнено, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к минимальному.

В соответствии с университетским положением «Об организации образовательного процесса на основе рейтинговой системы оценки знаний ...» итоговая оценка по дисциплине определяется по сумме баллов, набранных за работу в течение семестра, и баллов, полученных при сдаче экзамена.

Работа студента в течение семестра оценивается рейтинговыми баллами в диапазоне от 33 до 60. В том случае если текущий рейтинг составляет менее 33 баллов, студент не допускается к экзамену по дисциплине.

Положительный ответ студента на экзамене оценивается рейтинговыми баллами в диапазоне от 20 до 40. Шкала соответствия рейтинговых баллов за теоретические вопросы и практическое задание представлена в таблице.

Оценка по 4-балльной системе	Рейтинговые баллы		
	Теоретический вопрос № 1	Теоретический вопрос № 1	Практическое задание
Отлично	13	13	14
Хорошо	10	10	11
Удовлетворительно	6	6	8
Неудовлетворительно	менее 6	менее 6	менее 8

Шкала соответствия рейтингового балла, полученного на экзамене, 4-балльной системе представлена в таблице.

Рейтинговый балл, полученный на экзамене	Оценка за экзамен по 4-х балльной системе
35 – 40	Отлично
28 – 34	Хорошо
20 – 27	Удовлетворительно
менее 20	Неудовлетворительно

В зачетно-экзаменационную ведомость и зачетную книжку студента оценка по дисциплине проставляется в виде оценки по 4-балльной системе. Шкала пересчета итогового рейтингового балла по дисциплине в оценку по 4-балльной системе представлена в таблице.

Итоговый рейтинговый балл по дисциплине	Оценка по дисциплине в 4-х балльной системе
88 – 100	Отлично
72 – 87	Хорошо

53 – 71	Удовлетворительно
менее 53	Неудовлетворительно

Если студент на экзамене допустил случай нарушения учебной дисциплины (списывание, использование средств мобильной связи, персональных или планшетных компьютеров, аудио- или видеоплееров, других технических устройств), то данный студент удаляется с экзамена с оценкой неудовлетворительно.

7.1. Основная литература:

7.1. Основная литература:

- ## 7.2. Дополнительная литература:

- 124

6. Сборник задач по электротехнике и электронике Электронный ресурс : Учебное пособие / Ю. В. Бладыко [и др.] ; ред. Ю. В. Бладыко. - Сборник задач по электротехнике и электронике, 2020-02-24. - Минск : Вышэйшая школа, 2013. - 478 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-985-06-2287-7
7. Электроника. Часть первая. Лабораторный практикум по аналоговой электронике в программно-аппаратной среде NI ELVIS II Электронный ресурс : Учебное пособие / Э. И. Цимбалист [и др.]. - Томск : Томский политехнический университет, 2013. - 302 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-4387-0314-3
8. Яковлев, С. В. (СевКавГТУ). Электроника : учеб. пособие / С. В. Яковлев ; ФГБОУ Сев.-Кав. гос. техн. ун-та. - Ставрополь : Издательство СевКавГТУ, 2012. - 270 с. : ил. - Библиогр.: с. 268-269

7.3. Методическая литература:

1. Аристов, А. В. Физические основы электроники. Сборник задач и примеры их решения / А.В. Аристов ; В.П. Петрович. - Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2015. - 100 с.
2. Яковлев, С. В. (Северо-Кавказский федеральный университет). Электроника : учебно-методическое пособие : Направление подготовки - 210700.62 Инфокоммуникационные технологии и системы связи. Профиль подготовки - Сети связи и системы коммутаций. Квалификация выпускника - бакалавр / С. В. Яковлев ; ФГАОУ ВПО Сев.-Кав. федер. ун-та. - Ставрополь : СКФУ, 2014. - 270 с.

7.4. Интернет-ресурсы:

1. <http://www.chipinfo.ru>
2. <http://www.labcenter.com/index.cfm>.