

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА.
ЧАСТЬ 2**

ЭЛЕКТРОНИКА. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 22.03.02
и специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра электроэнергетики и электромеханики

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА. ЧАСТЬ 2

ЭЛЕКТРОНИКА. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 22.03.02
и специальности 21.05.04*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019

УДК 621.38 (073)

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА. ЧАСТЬ 2. Электроника. Полупроводниковые приборы: Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *В.И. Маларев, А.В. Контева*. СПб, 2019. 40 с.

В методических указаниях приведен теоретический и учебно-методический материал, необходимый для выполнения практических работ по дисциплинам «Электротехника и электроника. Ч.2» в области физических основ электроники. Целью работ является закрепление полученного теоретического материала и ознакомление на практике с особенностями полупроводниковых материалов и устройств.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 22.03.02 «Металлургия», и специальности 21.05.04 «Горное дело», а также других специальностей, изучающих дисциплину «Электроника» и «Физические основы электроники».

Научный редактор профессор *А.Е. Козярук*

Рецензент канд. техн. наук *А.П. Шевчук* (ООО «ПО «Энергосистема»)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель методических указаний для практических работ – облегчить усвоение необходимого теоретического материала и обеспечить самоконтроль студентов и контроль текущей успеваемости при изучении дисциплин «Электротехника и электроника. Часть 2» и «Электроника».

Методические указания включают в себя практические задания по разделам дисциплины: общие сведения о полупроводниковых материалах, диодах, биполярных и полевых транзисторах, а также расчеты их основных параметров. Целью проведения практических занятий является изучение свойств полупроводниковых материалов, проявляющихся в электромагнитных полях в зависимости от их состава, структуры и окружающей среды. Понимание результатов практических работ должно быть полным, так как без этого невозможно дальнейшее освоение электротехнических дисциплин.

Все практические работы состоят из кратких теоретических сведений, справочного математического аппарата и примеров решения типовых задач. Каждый раздел содержит контрольные задачи и вопросы для самостоятельной работы студентов.

Практическое занятие №1

Общие сведения о полупроводниках

Цель: Освоение методики расчета параметров полупроводниковых материалов.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примеров решения типовых задач.
3. Решение контрольных задач.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения

Полупроводниками называют материалы, занимающие по своей удельной проводимости промежуточное место между диэлектриками и проводниками, имеющие запрещенную зону и обладающие сильной зависимостью удельного сопротивления от концентрации примесей и внешних воздействий.

Различают собственную γ электропроводность, когда полупроводник не имеет примесей, примесную γ_n n -типа, когда в него введена донорная примесь; примесную γ_p p -типа, когда в полупроводник введена акцепторная примесь. Электропроводность любого материала определяется формулой:

$$\gamma = e \cdot n \cdot u_n + e \cdot p \cdot u_p ,$$

где n, p – концентрация электронов и дырок соответственно;
 u_n, u_p – подвижности электронов и дырок.

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

Примесная проводимость n -типа γ_n возникает в полупроводнике, если в него ввести примесь, валентность которой больше, чем валентность полупроводника. Например, для четырехвалентного кремния - Si , донорной примесью является пятивалентный мышьяк - As . Атом мышьяка, отдавший свой электрон в зону проводимости, превращается в положительно заряженный ион, который хотя и имеет заряд, но закреплен в кристаллической решетке и в электро-

проводности не участвует. Перенос зарядов происходит только за счет электронов.

$$\gamma_n = q \cdot n \cdot u_n .$$

Примесная проводимость p -типа (γ_p) возникает в полупроводнике, если в него ввести примесь, валентность которой меньше валентности основного полупроводника. Например, если в кремний ввести трехвалентный алюминий Al , он является акцепторной примесью для Si . Акцептор захватывает электрон из валентной зоны, превращаясь при этом в отрицательно заряженный ион, а в валентной зоне начинается эстафетное перемещение электронов, т. е. будет иметь место дырочная проводимость.

$$\gamma_p = q \cdot n_p \cdot u_p .$$

Собственная концентрация носителей заряда (электронов и дырок)

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

где ΔW_0 - ширина запрещенной зоны, Дж;

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

T - абсолютная температура, К;

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

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

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

где m_n, m_p - эффективные массы электрона и дырки соответственно, при расчетах обычно представляют как доля от массы электрона, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг;

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

Концентрации электронов и дырок в *примесных* полупроводниках

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

где W_C - энергия дна зоны проводимости, Дж;

W_V - энергия потолка валентной зоны, Дж;

W_F - энергия уровня Ферми, Дж.

Уровень Ферми в собственном полупроводнике:

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

где W_i – уровень, соответствующий середине запрещенной зоны.

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

1) для собственного полупроводника (статистика Максвелла-Больцмана)

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

2) для примесного полупроводника (статистика Ферми-Дирака)

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

Уровень Ферми в примесных полупроводниках:

$$W_F^n = \frac{W_C - W_D}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_D}{N_C};$$

$$W_F^p = \frac{W_A - W_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_A}.$$

Основное влияние на поведение электропроводности с изменением температуры оказывает концентрация носителей заряда. Таким образом, электропроводность полупроводника от температуры изменяется экспоненциально по формуле:

$$\gamma_t = A \cdot e^{-\frac{W_t}{2kT}},$$

где A - постоянная, представляющая собой электропроводность полупроводника при экстремальных условиях;

W_t - термическая энергия активации носителей; для примесных полупроводников $W_t = W_{пр}$; для собственных - $W_t = W_0$; W_0 - ширина запрещенной зоны;

K - постоянная Больцмана ($K=1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/град);

T - абсолютная температура, в Кельвинах.

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

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

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

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

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

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

Условие электронейтральности:

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

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

Подвижность носителей:

$$u = v/E,$$

где v - дрейфовая скорость носителей, м/с;

E - напряженность электрического поля, В/м.

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

$$u = \frac{e l_{cp}}{m^* v_T},$$

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

m^* - эффективная масса частицы, кг;

l_{cp} - средняя длина свободного пробега частицы, м;

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

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

С подвижностью связаны *коэффициенты диффузии* носителей:

$$D_n = \left(\frac{kT}{e}\right) \cdot \mu_n; \quad D_p = \left(\frac{kT}{e}\right) \cdot \mu_p.$$

ЭДС Холла в полупроводниках с носителями заряда одного знака:

$$U_H = \frac{R_H IB}{\delta},$$

где I - протекающий ток, А;

B - магнитная индукция, Тл;

δ - толщина пластины, м;

R_H - коэффициент Холла, м³/Кл.

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

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

Фотопроводимость. При освещении полупроводника он приобретает добавочную проводимость γ_Φ :

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

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

Δn , Δp - концентрации фотовозбужденных электронов и дырок.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

T - температура, К;

p_{p0}, p_{n0} - концентрации дырок в *p* и *n* слоях, m^{-3} ;

n_{n0}, n_{p0} - концентрации электронов в *n* и *p* слоях, m^{-3} ;

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

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

Вольтамперная характеристика идеального *p-n*-перехода имеет вид:

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

где I_S – обратный ток (ток насыщения);

U – высота

потенциального барьера.

$$I_S = \left(\frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \right) S,$$

где D_p, D_n - коэффициенты диффузии дырок и электронов, $\text{м}^2/\text{с}$;

p_{n0}, n_{p0} - равновесные концентрации дырок и электронов в n и p слоях;

S - площадь перехода, м^2 ;

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

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

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

Барьерная емкость p - n перехода:

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

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

ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала;

U - приложенное обратное напряжение, В ;

l_0 - равновесная ширина перехода

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

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

Примеры решения типовых задач

Задача 1. Определить удельное сопротивление полупроводника n -типа, если концентрация электронов проводимости в нем равна 10^{22} м^{-3} , а их подвижность $\mu_n = 0,5 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Решение:

Исходя из условия, необходимо рассчитать удельное сопротивление для полупроводника n -типа, что означает, что при расчете можно пренебречь «вкладом» дырок из-за их малого содержания. Таким образом, формула для расчета удельной проводимости:

$$\gamma = e \cdot n \cdot u_n + e \cdot p \cdot u_p$$

может быть преобразована:

$$\gamma_n = e \cdot n \cdot u_n .$$

Тогда, используя исходные данные, определим удельную проводимость полупроводникового материала при определенных условиях:

$$\gamma_n = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22} \cdot 0,5 = 0,8 \cdot 10^3 \text{ См/м.}$$

Исходя из соотношения: $\rho = 1 / \gamma$, определим удельное сопротивление:

$$\rho = 1 / 0,8 \cdot 10^3 = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Задача 2. Собственный полупроводник Ge в определенных условиях обладает удельным сопротивлением $0,48 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Определить концентрацию носителей заряда, если подвижность электронов и дырок соответственно равны $0,30$ и $0,12 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Решение:

1. Зная удельное сопротивление, определим удельную проводимость полупроводника:

$$\gamma = 1 / \rho = 1 / 0,48 = 2,1 \text{ См/м.}$$

2. В собственных полупроводниках количество электронов и дырок равны, т.к. сколько электронов покинут свой энергетический уровень, столько дырок появится на их месте. Следовательно, формула для расчета удельной проводимости можно преобразовать:

$$\gamma = e \cdot n \cdot u_n + e \cdot p \cdot u_p = e \cdot n \cdot (u_n + u_p),$$

где n - это количество электронов и дырок в собственном полупроводнике.

Таким образом определяем искомую величину:

$$n' = \gamma / (e \cdot (u_n + u_p)) = 2,1 / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (0,3 + 0,12)) = 8,3 \cdot 10^{19}.$$

Задача 3. Во сколько раз изменится удельная проводимость кристалла кремния с начальной температурой 0°C при его нагреве на 10 К, если ширина запрещенной зоны 1,1 эВ.

Решение:

Электропроводность полупроводника от температуры изменяется экспоненциально по формуле:

$$\gamma_t = A \cdot e^{-\frac{W_t}{2kT}}.$$

Тогда, при нагреве полупроводника справедливо записать соотношение:

$$\begin{aligned} \frac{\gamma_2}{\gamma_1} &= \frac{A \cdot e^{-\frac{W_t}{2kT_2}}}{A \cdot e^{-\frac{W_t}{2kT_1}}} = e \left[\frac{W_0}{2k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] = \\ &= 2,71^{\frac{1,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,38 \cdot 23} \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{283} \right)} = 2,3. \end{aligned}$$

Таким образом, удельная проводимость полупроводника увеличится в 2,3 раза.

Контрольные задачи:

Задача 1. Оценить среднее время и длину свободного пробега носителей заряда при температуре $T = 300$ К, если их подвижность $\mu = 0,1$ м²/(В·с), а эффективная масса $m^* = 0,26m_0$.

Задача 2. При напряженности электрического поля 100 В/м плотность тока через полупроводник составляет $6 \cdot 10^4$ А/м². Определить концентрацию электронов проводимости в полупроводнике, если их подвижность $\mu_n = 0,375$ м²/(В·с). Дырочной составляющей тока пренебречь.

Задача 3. 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 Ом·м. Принять собственную концентрацию носителей заряда при комнатной температуре $n_i = 2,1 \cdot 10^{19}$ м⁻³, подвижность электронов $\mu_n = 0,39$ м²/(В·с), подвижность дырок $\mu_p = 0,19$ м²/(В·с).

Задача 4. Определить собственную удельную проводимость германия при комнатной температуре, используя значения концентрации и подвижностей носителей заряда из условия предыдущей задачи.

Задача 5. Вычислить удельное сопротивление полупроводника p -типа с концентрацией дырок $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Найти отношение электронной проводимости к дырочной. Собственную концентрацию и подвижность носителей заряда взять такими же, как в задаче 3.

Задача 6. При температуре $T = 300 \text{ К}$ концентрация дырок в полупроводнике p -типа равна $2,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а концентрация электронов в 100 раз меньше. Найти собственное удельное сопротивление полупроводника. Подвижность дырок и электронов взять из условия задачи 3.

Задача 7. Через пластину кремния с удельным сопротивлением $0,01 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ проходит электрический ток плотностью 10 мА/мм^2 . средние скорости дрейфа электронов и дырок, если их подвижности $0,14$ и $0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ соответственно.

Задача 8. 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 3.

Задача 9. 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 $u_n/u_p = b$. Считается, что все акцепторы находятся в ионизированном состоянии.

Задача 10. Прямоугольный образец полупроводника n -типа с размерами $a = 50 \text{ мм}$, $b = 5 \text{ мм}$ и $c = 1 \text{ мм}$ помещен в магнитное поле с индукцией $B = 0,5 \text{ Тл}$. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости образца. Под действием напряжения $U_a = 0,42 \text{ В}$, приложенного вдоль образца, по нему протекает ток $I_a = 20 \text{ мА}$. Измерения показывают ЭДС Холла $U_H = 6,25 \text{ мВ}$. Найти удельную проводимость, подвижность и концентрацию носителей заряда для этого полупроводника, полагая, что электропроводность обусловлена носителями только одного знака.

Задача 11. Образец арсенида галлия с удельным сопротивлением $5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м характеризуется коэффициентом Холла $3 \cdot 10^{-4}$ м³/Кл. Определить: а) напряженность поля Холла, возникающего при пропускании через образец тока плотностью 10 мА/мм² и в действии магнитного поля с индукцией 2 Тл; б) напряженность внешнего электрического поля для создания заданной плотности тока.

Задача 12. При перепаде температур $\Delta E = 3$ К по толщине кремниевой пластины n-типа между плоскостями образца возникает термо-э.д.с. $\Delta U_t = 2,5$ мВ. Определить концентрацию доноров в материале, если средняя температура образца $T = 500$ К.

Задача 13. Обратный ток насыщения I_S германиевого $p - n -$ перехода равен $0,5$ мкА. Какое напряжение U надо приложить к этому переходу в прямом направлении, чтобы при температуре $T = 293$ К через $p - n -$ переход протекал прямой ток I значением 100 мА? Начертить вольт-амперную характеристику $p - n -$ перехода.

Контрольные вопросы:

1. Каков характер изменения электропроводности полупроводников с увеличением температуры?
2. Нарисуйте схематично энергетическую диаграмму полупроводника с акцепторной примесью.
3. В каких приборах и для каких целей используется $p-n$ переход?
4. Нарисуйте вольтамперную характеристику $p-n$ перехода.
5. Что собой представляет фотоэффект?

Практическое занятие № 2

Расчет светодиодов

Цель: Освоение методики расчета светодиодов.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примеров решения типовых задач.
3. Решение контрольных задач.

4. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения

Непосредственное подключение светодиода к источнику напряжения может вызвать протекание через него тока, превышающего допустимый, перегрев и мгновенный выход из строя. В простейшем случае (для маломощных индикаторных светодиодов) токоограничительная цепь представляет собой резистор, последовательно включенный со светодиодом. Для мощных светодиодов применяются схемы с широтно-импульсной модуляцией, которые поддерживают средний ток через светодиод на заданном уровне, и позволяют регулировать его яркость.

Недопустимо подавать на светодиоды напряжение обратной полярности. Светодиоды имеют невысокое (несколько вольт) обратное пробивное напряжение. В схемах, где возможно появление обратного напряжения, светодиод должен быть защищен параллельно включенным обычным диодом в противоположной полярности.

Обычно светодиоды рассчитаны на силу тока в 20 мА. Рабочее напряжение светодиода зависит от полупроводникового материала, из которого он сделан, есть зависимость между цветом свечения светодиода и его рабочим напряжением (табл. 2.1).

Как правило, светодиоды имеют разброс параметров, требуют различные напряжения каждый. При параллельном соединении светодиодов один из них будет светиться ярче и брать на себя тока больше, пока не выйдет из строя. Параллельное подключение светодиодов многократно ускоряет естественную деградацию кристалла светодиода. При параллельном соединении светодиодов каждый из них должен иметь свой собственный ограничительный резистор (рис. 2.1).

Если имеются светодиоды разных марок, то они комбинируются таким образом, чтобы в каждой ветви были светодиоды только одного типа (либо с одинаковым рабочим током), для каждой ветви рассчитывается свое собственное сопротивление.

Величина сопротивления защитного резистора:

$$R = (U_{\text{питания}} - U_{\text{диода}}) / I_{\text{диода}},$$

где R – значение резистора в Омах, $U_{\text{диода}}$ – падение напряжения через светодиод, $U_{\text{питания}}$ – напряжение от источника, $I_{\text{диода}}$ – сила тока светодиода.

Таблица 2.1
Примерные напряжения светодиодов в зависимости от цвета

Цветовая характеристика	Длина волны, нм	Напряжение, В
инфракрасные	от 760	До 1,9
красные	610 - 760	1,6 – 2,03
оранжевые	590 - 610	2,1 – 2,3
желтые	570 – 590	2,1 – 2,2
зеленые	500 - 570	2,2 – 3,5
синие	450 - 500	2,5 – 3,7
фиолетовые	400 - 450	2,8 - 4
ультрафиолетовые	до 400	3,1 – 4,4
белые	широкий спектр	3 – 3,7

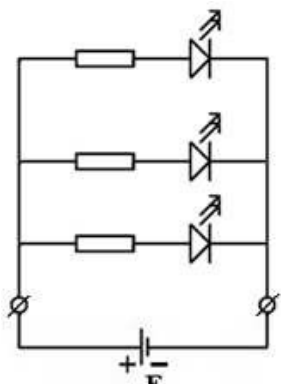


Рис.2. 1 Пример правильного параллельного подключения светодиодов

Примеры решения типовых задач

Задача 1. Светодиод с рабочим напряжением 3 вольт и рабочим током 20 мА. Необходимо подключить его к источнику с напряжением 5 вольт (рис. 2.2).

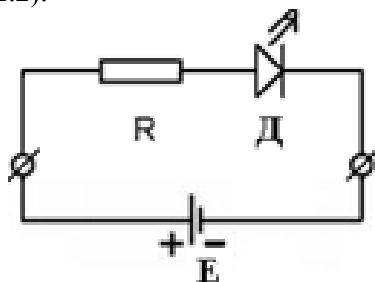


Рис. 2.2. Схема к решению задачи

Решение:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{диода}} &= 3, \\
 U_{\text{питания}} &= 5; \\
 I_{\text{диода}} &= 20 \cdot 10^{-3}; \\
 R &= (U_{\text{питания}} - U_{\text{диода}}) / I_{\text{диода}} = 100 \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Задача 2. Дано: 3 светодиода с рабочим напряжением 3 вольта и рабочим током 20 мА. Необходимо подключить их к источнику с напряжением 15 В (Рис. 2.3).

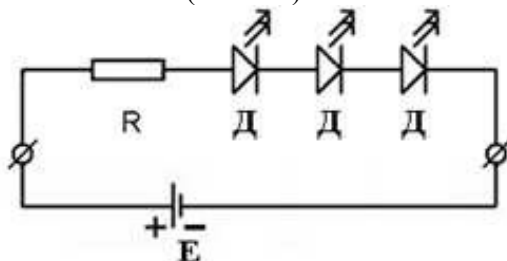


Рис. 2.3.Схема к решению задачи

Решение:

$$\begin{aligned}
 N_{\text{д}} &= 3; \\
 U_{\text{дио́да}} &= 3 \text{ В}, \\
 U_{\text{пита́ния}} &= 15 \text{ В}; \\
 I_{\text{дио́да}} &= 20 \cdot 10^{-3} \text{ А}; \\
 R &= (U_{\text{пита́ния}} - N_{\text{д}} \cdot U_{\text{дио́да}}) / I_{\text{дио́да}} = 300 \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Контрольные задачи

Задача 1. Необходимо рассчитать сопротивление и рассеиваемую на сопротивлении мощность для цепи, содержащей батарейку E , светодиод D и резистор R (рис. 2.2). Исходные данные приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Исходные данные

№	Напряжение источника, В	Среднее напряжение на светодиоде при $I=20$ мА		
		2 В	2.5 В	3 В
Номер варианта				
1	6	1	11	21
2	8	2	12	22
3	9	3	13	23
4	10	4	14	24
5	12	5	15	25

Продолжение табл. 2.2

6	15	6	16	26
7	16	7	17	27
8	18	8	18	28
9	20	9	19	29
10	24	10	20	30

Задача 2. Имеются светодиоды с рабочими напряжением 3 В и током 20 мА. Необходимо подключить N светодиодов к источнику U , В. Исходные данные приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3.

Исходные данные

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	11	12	13	14
N	9	3	4	5	6	7	8	9	3	4	5	6	7	8
U	24	8	7	12	14	16	16	18	6	10	12	14	14	14
Вариант	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
N	9	3	4	5	6	7	8	9	3	4	5	6	7	8
U	20	7	11	14	16	16	16	22	5	11	10	12	18	20

Контрольные вопросы:

1. Чувствительны ли светодиоды к высоким температурам?
2. Какими факторами определяется время непрерывной работы светодиода?
3. Назовите основные характеристики светодиодов.
4. От чего зависит рабочее напряжение светодиода?
5. От каких факторов зависит цвет, излучаемый светодиодом?
6. Справедлив ли закон Ома для режима работы светодиода?

Практическое занятие № 3

Расчет параметров диодов

Цель: Освоение методов расчета параметров диодов.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примеров решения типовых задач.
3. Решение контрольных задач.

4. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения

Диод — двухэлектродный электронный прибор, обладает различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока. Электрод диода, подключенный к положительному полюсу источника тока, когда диод открыт (имеет малое сопротивление) — анод, подключенный к отрицательному полюсу — катод. Полупроводниковые диоды используют свойство односторонней проводимости $p-n$ - перехода — контакта между полупроводниками с разным типом примесной проводимости, либо между полупроводником и металлом (диод Шоттки).

При одинаковом напряжении кремниевые диоды имеют во много раз меньшие обратные токи, чем германиевые (рис. 3.1). Допустимое обратное напряжение кремниевых диодов 1000-1500 В, у германиевых — 100-400 В. Кремниевые диоды могут работать при температурах от -60 до $+150^\circ\text{C}$, германиевые - от -60 до $+85^\circ\text{C}$.

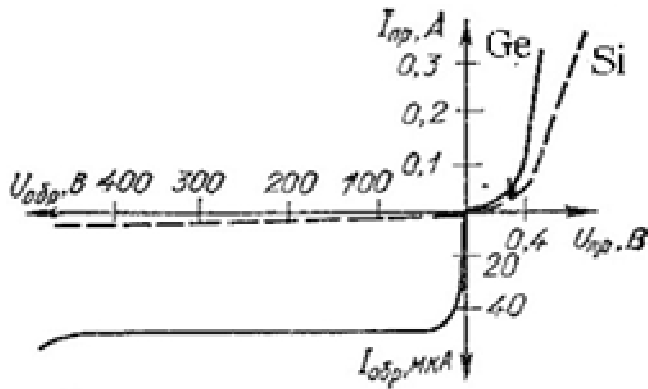


Рис. 3.1. Сравнительные характеристики германиевых и кремниевых диодов

Примеры решения типовых задач

Задача 1. Дано: схема включения и ВАХ диода даны на рис. 3.2.

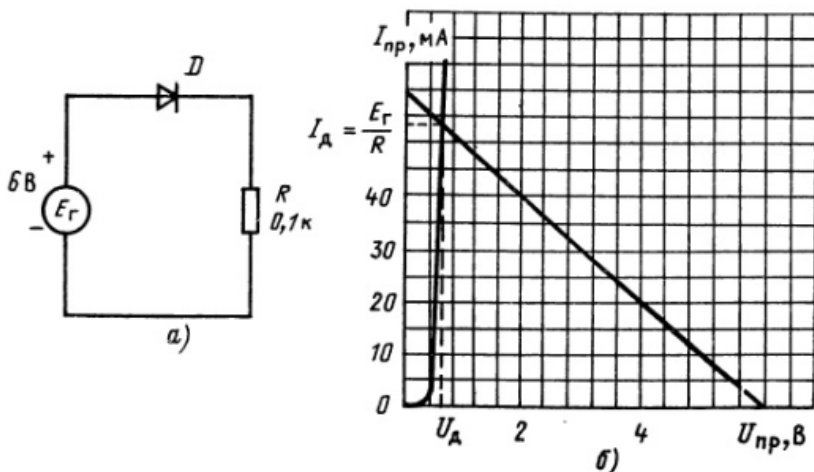


Рис. 3.2. Схема включения (а) и ВАХ (б) диода

Сопротивление нагрузки $R = 100$ Ом, Э.Д.С. источника $E_{и} = 6$ В.

Задание: рассчитать ток и напряжение на диоде.

Решение графо-аналитическим методом:

Совместно решаются уравнения вольтамперной характеристики и нагрузочной прямой:

$$I = f(U_{д})$$

$$E = U_{д} + R I$$

Точки для построения нагрузочной прямой

$$U_{д} = 0 \quad I = E / R = 6 / 100 = 60 \text{ мА};$$

$$I = 0 \quad U_{д} = E = 6 \text{ В}.$$

Пересечение ВАХ и нагрузочной прямой дает точку:

$$U_{д} = 0,6 \text{ В}; I = 54 \text{ мА}.$$

Решение аналитическим методом:

Аналитическое выражение ВАХ:

$$I = I_0 (e^{U_{д}/\varphi_T} - 1),$$

где $I_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ А; $\varphi_T = 25$ мВ.

Из предположения, что $U_{д} \ll E$ следует:

$$I \approx E / R = 6 / 100 = 60 \text{ мА.}$$

$$U_D \approx \varphi_T \ln(I/I_0) \approx 0,025 \ln(60 \cdot 10^{-3} / 10^{-12}) \approx 0,59 \text{ В.}$$

Ток диода:

$$I = (E - U_D) / R = (6 - 0,59) / 100 = 54,1 \text{ мА.}$$

Задача 2. Дано: ВАХ диода (рис. 3.3).

Задание - определить:

1. Как при напряжении на диоде +0,2 В с ростом температуры изменяются сопротивление постоянному току R_0 и дифференциальное сопротивление диода r_d ;
2. Температурный коэффициент по напряжению (TKH) при токе 4 мА;
3. Как изменяются с ростом температуры сопротивление постоянному току R_0 и обратное сопротивление $r_{обр}$ при напряжении - 50В;
4. Температуру удвоения T_y для теплового тока I_0 .

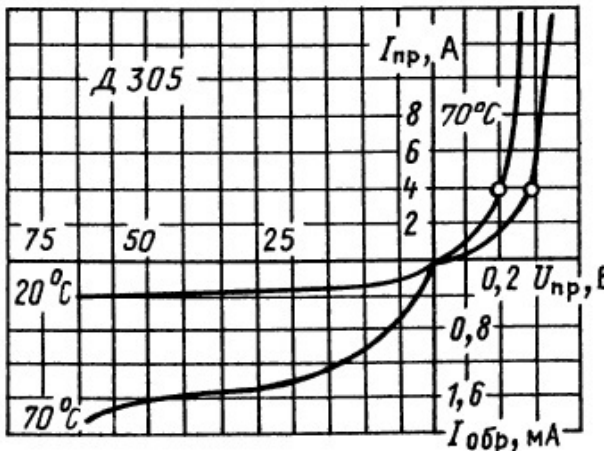


Рис. 3.3. ВАХ диода

Решение:

1. Дифференциальное сопротивление:

$$\varphi_T (+20^\circ \text{C}) \approx 0,025 \text{ В;}$$

$$r'_{\text{диф}} \approx \varphi_T / I_{\text{пр}} \approx 0,025 / 2 \approx 0,0125 \text{ Ом.}$$

Сопротивление постоянному току:

$$R'_0 = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ Ом.}$$

С ростом температуры до $T = 70^\circ \text{C}$:

$$\varphi_T(+70^\circ \text{C}) = \frac{343}{11600} \approx 0,03 \text{ В;}$$

$$r''_{\text{диф}} \approx \frac{0,03}{4} \approx 0,0075 \text{ Ом;}$$

$$R''_0 = \frac{0,2}{4} = 0,05 \text{ Ом.}$$

Оба сопротивления с ростом температуры уменьшились.

2. Температурный коэффициент по напряжению:

$$\text{ТКН} = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{0,1}{70 - 20} = 2 \text{ мВ/}^\circ \text{C.}$$

3. Обратное сопротивление диода при смещении – 50 В:
при $T = 20^\circ \text{C}$

$$r'_{\text{обр}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} |_{T=20^\circ \text{C}} = \frac{25}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 250 \text{ кОм;}$$

при $T = 70^\circ \text{C}$

$$r''_{\text{обр}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} |_{T=70^\circ \text{C}} = \frac{25}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 125 \text{ кОм.}$$

Обратное сопротивление диода с возрастанием температуры на 50° уменьшается в 2 раза.

Сопротивление диода постоянному току:

при $T = 20^{\circ}\text{C}$

$$R_o' = \frac{U}{I} = \frac{50}{0,4 \cdot 10^{-3}} = 125 \text{ кОМ};$$

при $T = 70^{\circ}\text{C}$

$$R_o'' = \frac{U}{I} = \frac{50}{1,6 \cdot 10^{-3}} \approx 33,3 \text{ кОМ}.$$

Сопротивление диода постоянному току уменьшается в 3,7 раза.

4. Из аналитического выражения ВАХ диода следует:

$$I_0(T_2) = I_0(T_1) \cdot 2^{\frac{\Delta T}{T_{\text{удв}}}};$$

$$\Delta T = T_2 - T_1,$$

Где $T_{\text{удв}}$ – изменение температуры, при котором обратный тепловой ток удваивается.

$$I_0(+20^{\circ}\text{C}) = 0,4 \text{ мА}; I_0(+70^{\circ}\text{C}) = 1,6 \text{ мА}; \Delta T = 50^{\circ}\text{C};$$

$$1,6 \cdot 10^{-3} = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2^{\frac{50}{T_{\text{удв}}}};$$

$$T_{\text{удв}} = 50 / \log_2 4 = 25^{\circ}\text{C}.$$

Контрольные задания

1. Для заданного диода подобрать оптимальную нагрузку, см. табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Исходные данные

№ варианта	Обозначение диода	Обратное напряжение, В	Ток, мА
1	Д101	75	30
2	Д1011	500	300
3	Д101А	75	30
4	Д102	50	30

Продолжение табл. 3.1

5	Д102А	50	30
6	Д103	30	30
7	Д103А	30	30
8	Д104	100	30
9	АД110А	30	10
10	АД112А	50	300

Контрольные вопросы:

1. В чем отличие свойств и параметров кремниевых и германиевых выпрямительных диодов?
2. Как обозначаются диоды на электрических схемах?
3. Как проверить диод мультиметром?
4. К чему приводит увеличение приложенного к диоду обратного напряжения?
5. Назовите области применения диодов.
6. По каким признакам можно различать диоды?

Практическое занятие № 4

Расчет параметров биполярных транзисторов

Цель: Освоение методов расчета параметров биполярных транзисторов.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примеров решения типовых задач.
3. Решение контрольных задач.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения

Транзистор — радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами, позволяющий входным сигналам управлять током в электрической цепи. Используется для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Управление током в выходной цепи осуществляется за счет изменения входного напряжения или тока. Условные обозна-

чения и упрощенная схема поперечного разреза биполярного транзистора приведены на рис. 4.1. Схемы возможных включений транзисторов приведены на рис. 4.2.

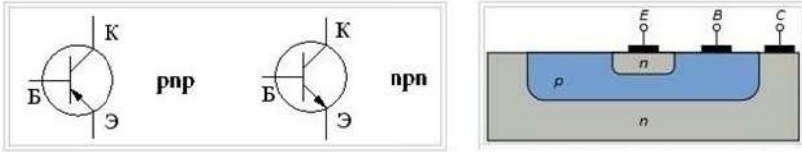


Рис. 4.1. Условные обозначения и схема поперечного разреза транзистора

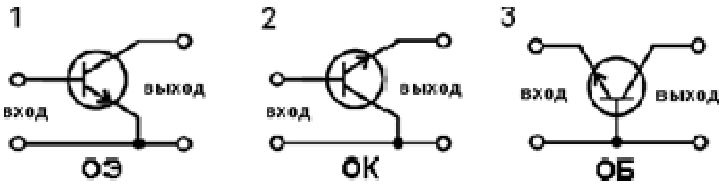


Рис. 4.2. Схемы включения биполярных транзисторов: 1 – с общим эмиттером, 2- с общим коллектором, 3 – с общей базой

h-параметры биполярных транзисторов:

$$h_{11\varepsilon} = \frac{\Delta U_{\text{б}\varepsilon}}{\Delta I_{\text{б}}} \quad \text{при } U_{\text{к}\varepsilon} = \text{const} \quad (\Delta U_{\text{к}\varepsilon} = 0);$$

$$h_{12\varepsilon} = \frac{\Delta U_{\text{б}\varepsilon}}{\Delta U_{\text{к}\varepsilon}} \quad \text{при } I_{\text{б}} = \text{const} \quad (\Delta I_{\text{б}} = 0);$$

$$h_{21\varepsilon} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} \quad \text{при } U_{\text{к}\varepsilon} = \text{const} \quad (\Delta U_{\text{к}\varepsilon} = 0);$$

$$h_{22\varepsilon} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{к}\varepsilon}} \quad \text{при } I_{\text{б}} = \text{const} \quad (\Delta I_{\text{б}} = 0).$$

Включение транзистора *n-p-n* типа по схеме с общим эмиттером и его схема замещения.

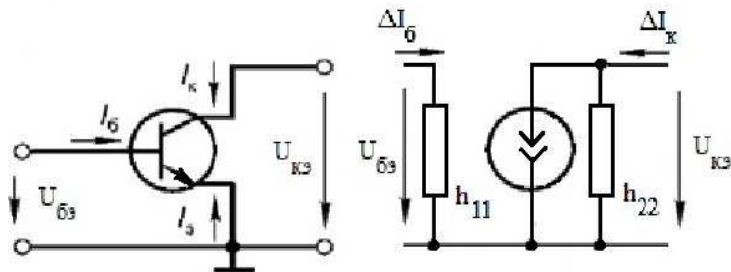


Рис. 4.3. Включение транзистора *n-p-n* типа

Ток базы: $I_B = I_Э - I_K = (1 - a) I_Э - I_{КЭ} \ll I_Э \sim I_K$.

Примеры решения типовых задач

Задача 1. Дано: Входная и выходная вольтамперные характеристики (ВАХ) биполярного транзистора (рис. 4.4).

Определить тип транзистора и основные параметры его *T*-образной схемы замещения (рис. 4.5), обратный ток коллекторного перехода.

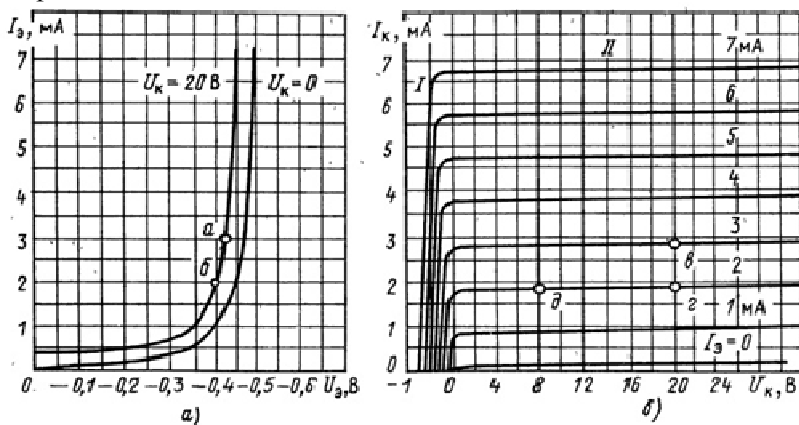


Рис. 4.4 Вольтамперные характеристики биполярного транзистора

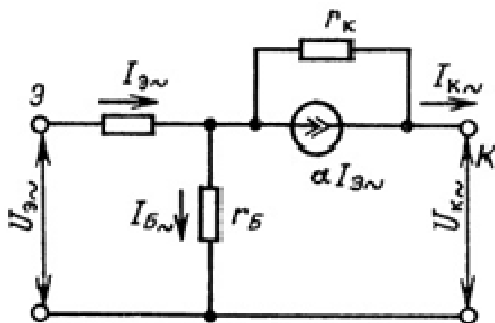


Рис. 4.5. Т-образная схема замещения биполярного транзистора

Решение:

Полярность внешних напряжений ($U_э < 0$ и $U_к > 0$) соответствует транзистору типа *n-p-n*.

Входная и выходная ВАХ соответствуют включению транзистора с общей базой. Эквивалентная Т-образная схема описывается параметрами:

- $\alpha = \Delta I_к / \Delta I_э |_{U_к=const}$ дифференциальный коэффициент прямой передачи по току;

- $r_к = \Delta U_к / \Delta I_к |_{I_э=const}$ дифференциальное сопротивление коллекторного перехода;

$r_э$ – дифференциальное сопротивление; $r_б$ – объемное сопротивление базы.

1. Коэффициент прямой передачи α определяется по выходной ВАХ при $U_к = 20$ В.

$$\alpha = (2,8 - 1,85) / (3,0 - 2,0) = 0,95 / 1,0 = 0,95.$$

2. Дифференциальное сопротивление $r_э$:

$$r_э \approx \varphi_T / I_{эcp} = 0,025 / (2,5 \cdot 10^{-3}) = 10 \text{ Ом}.$$

3. Входное сопротивление транзистора для рабочей точки на участке АБ ВАХ:

$$r_{вх} = r_э + r_б (1 - \alpha) = \Delta U_э / \Delta I_э |_{U_к=const} = 0,025 / (1 \cdot 10^{-3}) = 25 \text{ Ом}.$$

4. Дифференциальное сопротивление на участке ГД выходной ВАХ:

$$r_k = 12 / (0,05 \cdot 10^{-3}) = 240 \text{ Ом};$$

$$5. I_k = \alpha I_3 + I_{k0} + U_k / r_k ;$$

$$I_{k0} = I_k|_{I_3=0} - U_k / r_k ;$$

$I_{k0} = I_k|_{I_3=0}$, так как U_k / r_k при включении с общей базой мало, то $I_{k0} = 0,2 \text{ мА}$, $I_3 = 0$, $U_k = 20 \text{ В}$.

Задача 2. Дано: Транзистор включен в схему, приведенную на рис. 4.6. $\alpha = 0,0995$, $I_{30} = I_{k0} = 10^{-12} \text{ А}$, найти токи транзистора и напряжение между коллектором и эмиттером.

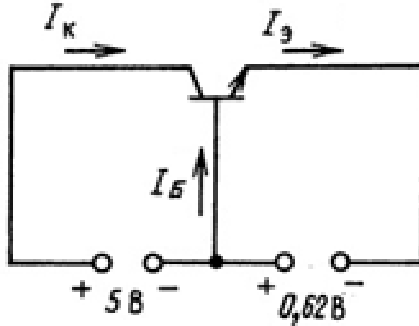


Рис. 4.6. Схема включения транзистора

Транзистор типа $n-p-n$ с прямо смещенным эмиттерным переходом и обратным смещением коллекторного перехода, соответственно $U_3 > 0$ и $U_k < 0$.

1. Ток эмиттера:

$$I_3 = I_{30} (e^{U_3/\Phi_T} - 1) = 10^{-12} (e^{0,61/0,025} - 1) \approx 58,95 \text{ мА}.$$

2. Ток коллектора:

$$I_k = \alpha I_3 - I_{k0} (e^{U_k/\Phi_T} - 1) = 0,995 \cdot 58,95 \cdot 10^{-3} (e^{-5/0,025} - 1) \approx 58,66 \text{ мА}.$$

3. Ток базы:

$$I_B = (1 - \alpha)I_3 = (1 - 0,995) 58,95 = 0,29 \text{ мА},$$

при $\alpha = 0,995$, $I_{30} = I_{k0} = 10^{-12} \text{ А}$.

4. Напряжение $U_{кэ}$:

$$U_{кэ} = U_K - U_3 = 5 - (-0,62) = 5,62 \text{ В}.$$

Задача 3. Дано: Транзистор в Т-образной схеме замещения (рис. 4.7) имеет следующие параметры: $\alpha = 0,9993$; $r_k = 1,5 \text{ МОм}$; $r_B = 200 \text{ Ом}$; $r_3 = 20 \text{ Ом}$. Определить h -параметры для схемы с общей базой.

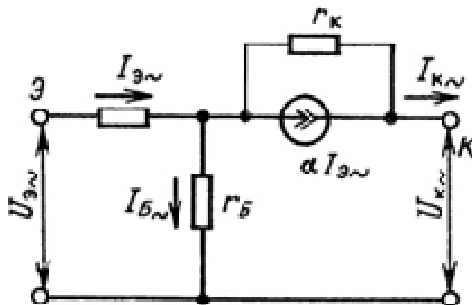


Рис. 4.7. Схема включения транзистора

Решение:

$$h_{11Б} \approx r_3 + r_B (1 - \alpha) = 20 + 200 (1 - 0,9993) = 21,4 \text{ Ом};$$

$$h_{21Б} \approx \alpha = 0,9993;$$

$$h_{22Б} \approx 1/r_k = 1 / (1,5 \cdot 10^6) \approx 0,67 \text{ мкСм};$$

$$h_{12Б} \approx r_B / r_k = 200 / (1,5 \cdot 10^6) \approx 1,33 \cdot 10^{-6}.$$

Задача 4. Дано: ВАХ транзистора с общим эмиттером (рис. 4.8). Рабочая точка с напряжением $U_{кэ} = 25 \text{ В}$ и током базы 300 мкА . Определить параметры $h_{21э}$ и $h_{22э}$.

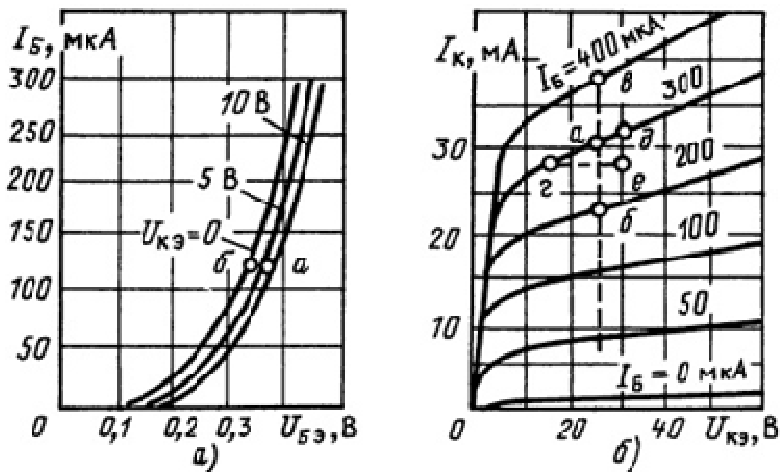


Рис. 4.8. ВАХ транзистора с общим эмиттером

Решение:

1. Определение параметра $h_{21Э}$.

По расстоянию между выходными характеристиками можно судить о параметре $h_{21Э}$:

$$h_{21Э} = I_{2-} / I_{1-} | U_{2-} = 0 = \Delta I_K / \Delta I_B | U_{КЭ} = \text{const}.$$

Подставляя значения коллекторного тока в точках б и в, находим:

$$h_{21Э} = (37 - 23) \cdot 10^{-3} / [(400 - 200) \cdot 10^{-6}] = 70.$$

2. Определение параметра $h_{22Э}$.

$$h_{22Э} = I_{2-} / U_{2-} | I_{1-} = 0 = \Delta I_K / \Delta U_{КЭ} | I_B = \text{const}.$$

Находим приращения тока ΔI_K и напряжения $\Delta U_{КЭ}$ при фиксированном значении тока базы $I_B = 300$ мкА (треугольник *где*), откуда следует, что $h_{22Э} = 5 \cdot 10^{-3} / 15 = 0,33 \cdot 10^{-3}$ МОм.

Контрольные вопросы:

1. Каким образом происходит управление электрическим сопротивлением биполярного транзистора?
2. Расскажите об областях применения транзисторов.

3. Изобразите условное графическое изображение $p-n-p$ и $n-p-n$ - транзисторов.
5. Изобразите схемы включения транзистора. Укажите полярности напряжений и направление протекания токов.
6. Какие характеристики являются входными и выходными?
7. Укажите соотношения между током эмиттера, коллектора и базы.
10. Объясните физический смысл h -параметров транзистора.
11. Назовите и охарактеризуйте режимы работы транзистора.
13. Изобразите схему замещения биполярного транзистора.
14. Какие факторы влияют на частотные характеристики транзистора?

Практическое занятие № 5

Расчет параметров полевых транзисторов

Цель: Освоение методов расчета параметров полевых транзисторов.

План проведения занятия:

1. Рассмотрение теоретических сведений.
2. Рассмотрение примеров решений типовых задач.
3. Решение контрольных задач.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Краткие теоретические сведения

Полевой транзистор — полупроводниковый прибор, ток в котором управляется электрическим полем (ток определяется только движением основных носителей заряда одного типа — электронов или дырок).

На рисунке 5.1 приведена структура и стоковые характеристики МДП-транзисторов со встроенным каналом и с индуцированным каналом. Носители заряда перемещаются по каналу от истока к стоку (рис. 5.2). С помощью затвора создается управляющее электрическое поле, позволяющее регулировать электрическую проводимость канала (ток в канале). В зависимости от электропроводно-

сти исходного материала транзисторы бывают с p -каналом и n -каналом (рис. 5.3 и рис. 5.4).

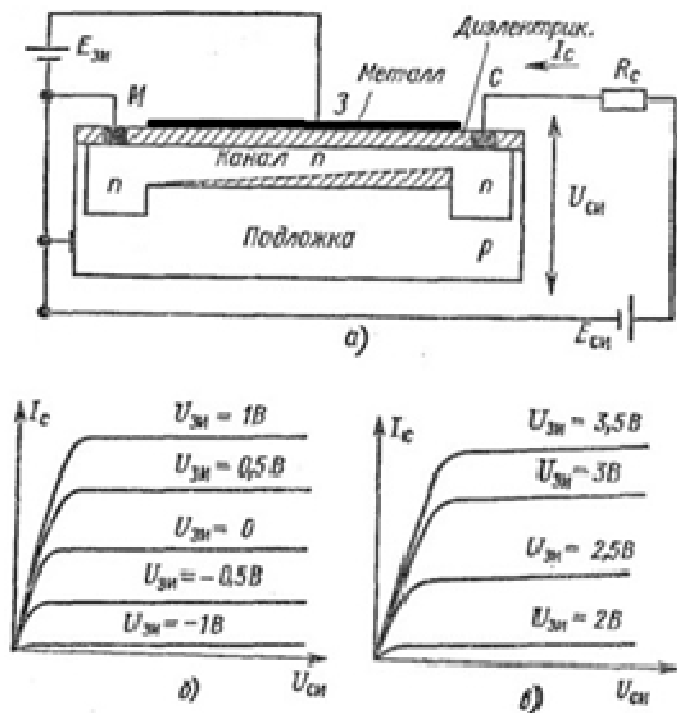


Рис. 5.1. Структура МДП-транзисторов (а) и стоковые характеристики МДП-транзисторов; б – со встроенным каналом, в – с индуцированным каналом

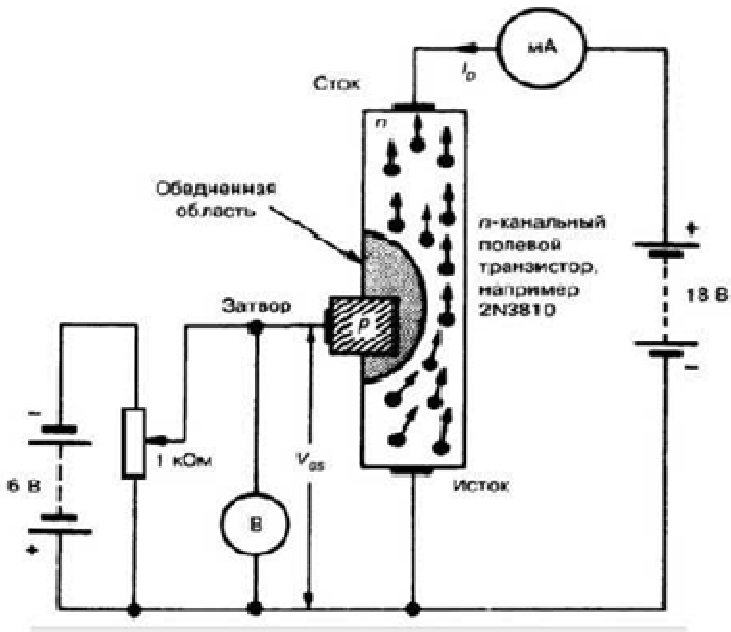


Рис. 5.2. Направление перемещения носителей заряда

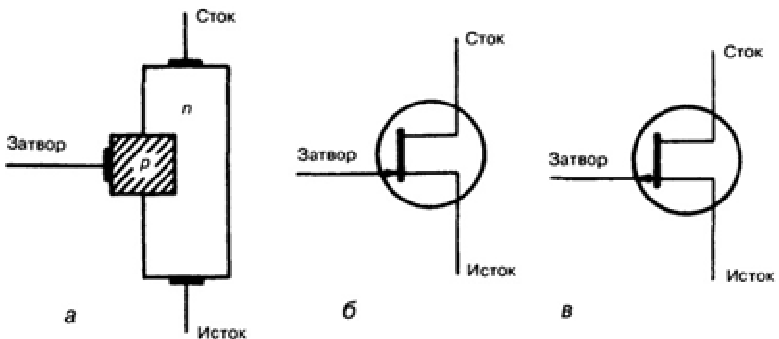


Рис. 5.3. Полевой транзистор с p - n -переходом: а- схематическое изображение конструкции транзистора с каналом n -типа; б, в – обозначение транзисторов с каналом n -типа и p -типа

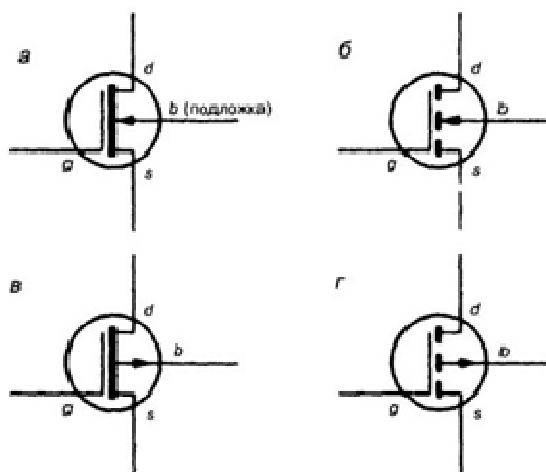


Рис. 5.4 Условные обозначения полевых транзисторов: а – n -канальный транзистор со встроенным каналом (с объединением); б – n -канальный транзистор с индуцируемым каналом (с обогащением); в – p -канальный транзистор со встроенным каналом (с объединением); г – p -канальный транзистор с индуцируемым каналом (с обогащением)

Примеры решения типовых задач

Задача 1. Дано: ВАХ полевого транзистора (рис. 5.5). Определить тип канала и основные характеристики транзистора.

Решение:

1. Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом имеет канал n -типа, так как ток стока управляется отрицательным напряжением $U_{зи}$, приложенным к затвору (минус – к области затвора, плюс – к каналу n -типа). Канал перекрывается полностью ($I_c=0$) при напряжении $U_{зи} = -1,75$ В (напряжение отсечки $U_{отс}$). При $U_{зи} = 0$ и $U_{си} > 1,75$ В (участок насыщения II) в транзисторе течет максимальный ток стока $I_{снас} = 8,2$ мА.

2. Эквивалентная схема полевого транзистора показана на рис. 5.6.

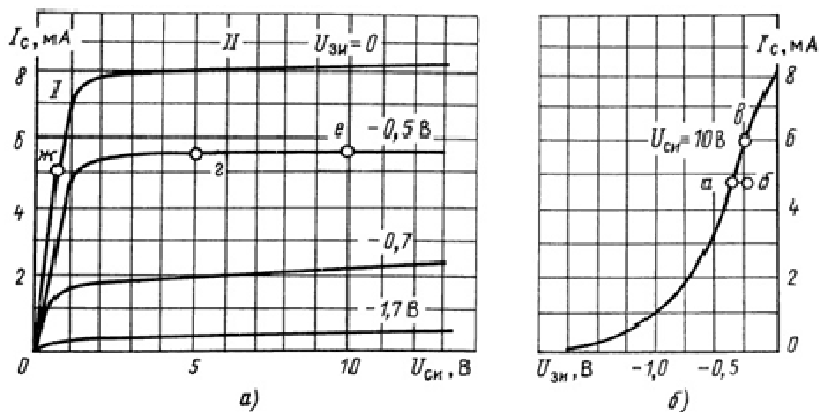


Рис. 5.5. ВАХ полевого транзистора

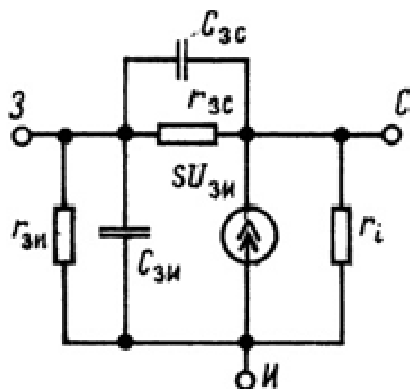


Рис. 5.6. Эквивалентная схеме полевого транзистора Крутизна стокзатворной характеристики:

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗН} | U_{СДН} = \text{const} ,$$

$$S = 1,2 \cdot 10^{-3} / 0,12 = 10 \text{ мА/В, для } U_{СДН} = 10 \text{ В.}$$

1. Дифференциальное сопротивление канала на участке насыщения:

$$r_c = \Delta U_{СДН} / \Delta I_C | U_{ЗН} = \text{const} ,$$

$$r_c = 5 / (0,1 \cdot 10^{-3}) = 50 \text{ кОм.}$$

2. Сопротивление открытого канала (участок I ВАХ) при $U_{зи} = 0$ (точка ж):

$$R_0 = U_{СИ} / I_C = 0,5 (5 \cdot 10^{-3}) = 100 \text{ Ом.}$$

Задача 2. Дано: полевой транзистор с $p-n$ -переходом имеет $I_{C \text{ MAX}} = 5 \text{ мА}$ и $U_{отс} = -2 \text{ В}$. Определить ток стока $I_{ст}$ и крутизну S при напряжениях затвора $-2, 0, -1 \text{ В}$.

Решение:

1. Ток стока:

$$I_C = I_{C \text{ MAX}} (1 - |U_{зи}| / U_{отс})^2,$$

$$\text{при } U_{зи} = -2\text{В}, I_C = 5 \cdot 10^{-3} (1 - 2 / 2)^2 = 0;$$

$$\text{при } U_{зи} = 0, I_C = I_{C \text{ MAX}} = 5 \text{ мА};$$

$$\text{при } U_{зи} = -1\text{В}, I_C = 5 \cdot 10^{-3} (1 - 1 / 2)^2 = 1,25 \text{ мА.}$$

2. Крутизна полевого транзистора:

$$S = 2I_{C \text{ MAX}} / U_{отс} (1 - |U_{зи}| / U_{отс}),$$

$$\text{при } U_{зи} = -2\text{В}, S = 0;$$

$$\text{при } U_{зи} = 0, S = S_{\text{ MAX}} = 2I_{C \text{ MAX}} / U_{отс} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} / 2 = 5 \text{ мА/В};$$

$$\text{при } U_{зи} = -1\text{В}, S = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} / 2(1 - 1/2) = 2,5 \text{ мА/В.}$$

Контрольные вопросы:

1. Каким образом происходит управление электрическим сопротивлением полевого транзисторов?

2. Расскажите об областях применения транзисторов.

3. Изобразите условное графическое изображение $p-n-p$ и $n-p-n$ -транзисторов.

4. Изобразите условные графическое изображения МЭП транзисторов и с управляемым переходом.

5. Изобразите схемы включения транзистора. Укажите полярности напряжений и направление протекания токов.

6. Какие характеристики являются входными и выходными?

7. Какие параметры характеризуют свойства полевого транзистора?

8. В чем отличие статических характеристик передачи МДП-транзисторов с индуцированным и встроенным каналами?
9. Назовите и охарактеризуйте режимы работы транзистора.
10. Какие факторы влияют на частотные характеристики транзистора?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Богородицкий Н.П.* Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев.- Л.: Энергоиздат, 1985.
2. *Гершунский Б.С.* Основы электроники. – М: Медиа, 2012.
3. *Коптева А.В., Войтюк И.Н.* Электротехническое и конструкционное материаловедение. – СПб.: «ЛЕМА», 2016.
4. *Ланчин В.И., Савельев Н.Р.* Электроника. – Ростов Н/Д: Феникс, 2008.
5. *Маларев В.И., Коптева А.В.* Электроника. Физические основы электроники. Часть 1: Учебное пособие. – СПб.: «ЛЕМА», 2017.
6. *Маларев В.И., Коптева А.В.* Электроника. Физические основы электроники. Часть 2: Учебное пособие. – СПб.: «ЛЕМА», 2018.
7. *Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И.* Аналоговая и цифровая электроника. - Москва: «Горячая линия телеком», 2000.
8. *Пасынков В.В.* Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин.- СПб.: «Лань», 2003.
9. *Умрихин В.В.* Физические основы электроники: Учебное пособие. –М: Альфа-М, 2012.
10. *Щука А.А.* Электроника. – СПб: БХВ-Петербург, 2012.
11. Электротехнический справочник: в 2-х томах. Т.1 / под ред. В.Г. Герасимова и др.- М.: Изд-во МЭИ, 2003.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Практическое занятие №1. <u> </u> Общие сведения о полупроводниках.....	4
Практическое занятие № 2. Расчет светодиодов	14
Практическое занятие № 3. Расчет параметров диодов.....	19
Практическое занятие № 4. Расчет параметров биполярных транзисторов	25
Практическое занятие № 5. Расчет параметров полевых транзисторов	32
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	39

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА.
ЧАСТЬ 2**

ЭЛЕКТРОНИКА. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 22.03.02
и специальности 21.05.04*

Сост.: *В.И. Маларев, А.В. Коптеева*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
электроэнергетики и электромеханики

Ответственный за выпуск *А.В. Коптеева*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 06.03.2019. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 2,3. Усл.кр.-отт. 2,3. Уч.-изд.л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 176. С 72.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2