Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

Владимирский государственный университет

Кафедра конструирования и технологии радиоэлектронных средств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ "ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА"

Составитель Е.А. КАЛИНИН

Владимир 2007

УДК 621.38 ББК 32.85 М54

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Владимирского государственного университета *Т.Н. Фролова*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Владимирского государственного университета

Методические указания к практическим занятиям по М54 дисциплине "Общая электротехника и электроника" / Владим. гос. ун-т ; сост. Е. А. Калинин. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 48 с.

Составлены в соответствии с программой курса «Общая электротехника и электроника» в части, касающейся вопросов электроники. Содержат краткие теоретические сведения, задачи и примеры решения по пяти темам.

Предназначены для студентов специальностей 210201 – проектирование электронных средств и 210202 – проектирование электронновычислительных средств дневной и контрактно-заочной форм обучения.

Ил. 17. Библиогр.: 2 назв.

УДК 621.38 ББК 32.85

введение

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине "Общая электротехника и электроника" содержат краткие теоретические сведения, вопросы и задачи по изучаемой дисциплине. Основное внимание уделено контактным явлениям в твёрдых телах, физическим процессам в полупроводниках и электронным приборам на их основе. Решение многих задач помогает уяснить физический смысл явлений, прививает навыки практического применения теоретических знаний, показывает связь количественных характеристик с качественными признаками. Расчёт параметров и характеристик полупроводниковых материалов, электронных приборов и простейших схем с их применением выполняется по формулам с учётом ряда допущений, а также с учётом только определённых физических процессов, происходящих в реальных электронных приборах. Практические расчёты должны развивать у студентов понимание пределов применимости соответствующих формул, а также наполнять физическим содержанием получаемые результаты.

Практические занятия позволяют закрепить теоретические знания, углубленно изучить наиболее сложные вопросы электроники, получить необходимые навыки анализа и практического расчета простейших процессов в полупроводниках и электронных приборах на их основе.

Тема 1. ЗОННАЯ СТРУКТУРА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Цель – освоение основных понятий зонной теории полупроводников, закрепление фундаментальных понятий теории твердого тела, привитие навыков решения задач по определению энергетических уровней в полупроводниках.

Теоретические основы

Количественный анализ полупроводников и полупроводниковых приборов базируется на зонной теории твёрдого тела. Как известно, изолированный атом характеризуется дискретным спектром энергий, разрешённых для электрона.

Твёрдое тело представляет собой совокупность атомов, сильно взаимодействующих благодаря малым межатомным расстояниям. Эта совокупность характеризуется некоторым единым для всего тела энергетическим спектром. Особенность этого спектра в том, что он состоит не из дискретных уровней, а из дискретных разрешенных зон. То есть для кристалла получается определенная зонная диаграмма, в которой разрешенные зоны чередуются с запрещенными. Ширина тех и других не превышает нескольких эВ и не зависит от числа атомов в твердом теле, то есть от его размеров.

Проводимость в твердом теле возможна лишь тогда, когда возможен переход электрона на ближайший энергетический уровень. Значит, в проводимости могут участвовать электроны только тех зон, в которых есть свободные уровни. Такие свободные уровни всегда имеются в верхней разрешенной зоне. Поэтому верхнюю зону твердого тела, не заполненную (или заполненную не полностью) электронами при 0 К, называют зоной проводимости. Зону, ближайшую разрешенную к зоне проводимости, называют валентной (рис. 1). При нулевой температуре (0 К) она полностью заполнена, и электроны этой зоны не могут участвовать в проводимости. Но при

проводимости. По при температуре выше 0 К некоторые электроны могут преодолеть запрещенную зону и перейти из валентной зоны в зону проводимости. В верхней части валентной зоны образуются свобод-



ные уровни (дырки), и эта зона также может обусловить проводимость.

Зонная структура твердого тела при 0 К лежит в основе классификации металлов, полупроводников и диэлектриков.

Полупроводники и диэлектрики различаются в основном шириной запрещенной зоны (у диэлектриков она больше).

При 0 К зона проводимости у полупроводников и диэлектриков пуста (для электронов), это их качественное отличие от металлов.

Уровень Ферми

Вероятность нахождения электрона на том или ином энергетическом уровне дается распределением Ферми – Дирака:

$$F_n(W) = \frac{1}{\frac{W - W_F}{e^{KT}} + 1},$$
(1)

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; W_F – энергия, называемая уровнем Ферми.

Энергия уровня Ферми W_F соответствует такому энергетическому уровню, вероятность заполнения которого равна 1/2. Удобнее выражать энергию не в джоулях, а в электрон-вольтах или просто в вольтах (так как численно они одинаковы).

Для этого поделим энергии на элементарный заряд, тогда

$$F_n(\varphi) = \frac{1}{\frac{\varphi - \varphi_F}{\varphi_T} + 1},$$

где ϕ – потенциал, характеризующий энергию *W*; ϕ_F – уровень Ферми; ϕ_T – температурный потенциал, равный

$$\frac{kT}{q} = \frac{T}{11600},$$

где *q* – заряд электрона.

Полезно запомнить, что при температуре 300 К (комнатная температура) $\phi_T(300) \approx 0.025 \text{ B} = 25 \text{ мB}.$

В невырожденных полупроводниках уровень Ферми всегда лежит в запрещенной зоне. Глубину его залегания можно характеризовать "расстоянием" от одной из разрешенных зон, выраженных в единицах температурного потенциала ϕ_T .

В большинстве случаев уровень Ферми залегает глубоко, то есть выполняются неравенства:

$$\varphi_{\mathcal{C}} - \varphi_F >> \varphi_T, \qquad (2)$$

$$\varphi_F - \varphi_v \gg \varphi_T, \tag{3}$$

где φ_c и φ_v – потенциалы "дна" зоны проводимости (*conduction*) и "потолка" валентной зоны (*valance*).

Учитывая выражение (2), концентрация свободных электронов в зоне проводимости определяется как

$$n = N_c e^{\frac{-(\varphi_c - \varphi_F)}{\varphi_T}}, \qquad (4)$$

где N_c – это эффективная плотность состояний (на 1 см³) в зоне проводимости;

$$N_{c} = 2 \left(\frac{2\pi m_{n}^{*} q \varphi_{T}}{h^{2}} \right)^{\frac{3}{2}} \approx 0.5 \cdot 10^{16} \left(\frac{m_{n}}{m} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot T^{\frac{3}{2}},$$

где m_n^* – эффективная масса электрона.

Аналогично с учетом (3) концентрация свободных дырок в валентной зоне

$$p = N_{v} e^{\frac{-(\varphi_{F} - \varphi_{v})}{\varphi_{E}}}, \qquad (5)$$

где N_v – это эффективная плотность состояний в валентной зоне (на 1 см³);

$$N_{v} = 2 \left(\frac{2\pi m_{p}^{*} q \varphi_{T}}{h^{2}} \right)^{\frac{3}{2}} \approx 0, 5 \cdot 10^{16} \left(\frac{m_{p}}{m} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot T^{\frac{3}{2}},$$

где m_p^* – эффективная масса дырки.

Легко убедиться, что произведение концентраций $np = n_i^2 = p_i^2$ не зависит от положения уровня Ферми и определяется только температурой и шириной запрещенной зоны:

$$np = N_c N_v e^{\frac{-\varphi_3}{\varphi_T}} = 0,25 \cdot 10^{32} \left(\frac{m_n m_p}{m^2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot T^3 e^{\frac{-\varphi_3}{\varphi_T}},$$
 (6)

где $\phi_3 = \phi_c - \phi_v$ – ширина запрещенной зоны; $n_i = p_i$ – концентрации собственных носителей.

Из соотношений (4) и (5) получим

$$\frac{n}{p} = \frac{N_c}{N_v} e^{\frac{-2(\varphi_E - \varphi_F)}{\varphi_T}},$$
(7)

где ϕ_E – потенциал середины запрещенной зоны, который иногда называют электростатическим потенциалом полупроводника;

$$\varphi_E = \frac{\varphi_c - \varphi_v}{2}$$

Потенциал Ферми имеет еще одно название – электрохимический потенциал. Градиент потенциала Ферми, будучи суммой градиентов электрического и химического потенциалов, позволяет одновременно характеризовать оба типа движения носителей – диффузию (химический) и дрейф (электрический). Следовательно, в условиях равновесия, когда направленного движения носителей нет, должно иметь место условие

grad
$$\varphi_F = 0$$
, $\varphi_F = \text{const.}$

Постоянство ("горизонтальность") уровня Ферми в равновесной системе является одним из фундаментальных соотношений теории твердого тела (сами потоки – дрейфовые и диффузионные – могут быть, но они должны уравновешиваться). Потенциал Ферми для невырожденных полупроводников определяется выражениями:

- для полупроводника *n*-типа

$$\varphi_{Fn} = \varphi_c + \varphi_T \ln \frac{n}{N_c}; \tag{8}$$

– для полупроводника *р*-типа

$$\varphi_{Fp} = \varphi_v - \varphi_T \ln \frac{p}{N_v},\tag{9}$$

то есть у невырожденных полупроводников потенциал Ферми всегда лежит в запрещенной зоне (логарифмы в обоих выражениях – отрицательны!).

С учётом того, что в диапазоне рабочих температур все донорные атомы ионизированы, можно считать, что в полупроводнике *n*-типа $n_n = N_{d}$. Тогда концентрация свободных дырок

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_{\mathrm{A}}}$$
, так как $p \cdot n = n_i^2$.

С учётом приведённого выше

$$\varphi_{Fn} = \varphi_c + \varphi_T \ln \frac{N_{\pi}}{N_c} = \varphi_E + \varphi_T \ln \frac{N_{\pi}}{n_i}.$$
 (10)

Отсюда следует, что уровень Ферми в электронном полупроводнике лежит тем выше, чем больше концентрация доноров и чем ниже температура.

Для дырочного полупроводника

$$p_p = N_{a}, \ n_p = \frac{n_i^2}{N_a},$$
$$\varphi_{Fp} = \varphi_v - \varphi_T \ln \frac{N_a}{N_v} = \varphi_E - \varphi_T \ln \frac{N_a}{n_i}, \tag{11}$$

то есть уровень Ферми лежит тем ниже, чем больше концентрация акцепторов и чем ниже температура. 8 Тогда высота потенциального барьера при контакте *p*-и *n*-слоёв (контактная разность потенциалов)

$$\varphi_{k} = \varphi_{Fn} - \varphi_{Fp} = \varphi_{E} + \varphi_{T} \ln \frac{N_{\pi}}{n_{i}} - \left(\varphi_{E} - \varphi_{T} \ln \frac{N_{a}}{n_{i}}\right) = \varphi_{T} \left(\ln \frac{N_{\pi}}{n_{i}} + \ln \frac{N_{a}}{n_{i}}\right),$$
$$\varphi_{k} = \varphi_{T} \ln \frac{N_{\pi} \cdot N_{a}}{n_{i}^{2}} \approx \varphi_{T} \ln \frac{n_{n} \cdot p_{p}}{n_{i}^{2}} \approx \varphi_{T} \ln \frac{n_{n}}{n_{p}} \approx \varphi_{T} \ln \frac{p_{p}}{p_{n}}, \quad (12)$$

так как в равновесной системе уровень Ферми должен быть единым (рис. 2).



Puc. 2

Из выражения (12) следует, что контактная разность потенциалов зависит от температуры и концентрации примесей в слоях *p* и *n* (от степени легирования слоёв).

Примеры и задачи

1. Определить положение уровня Ферми в Ge *n*-типа при T = 300 K, если на $2 \cdot 10^6$ атомов Ge приходится один атом примеси (донорная). Концентрация атомов в Ge равна $4,4\cdot 10^{28}$ атомов/м³ (*N*). Постоянная *G* в выражении, связывающем число электронов в единице объёма в зоне проводимости с температурой и энергетическими уровнями, равна $4,83\cdot 10^{21}$ м⁻³·K^{-3/2} (Ge). Ширина запрещённой зоны $E_3 = 0,72$ эВ, а расстояние между дном зоны проводимости и донорным уровнем 0,01 эВ.

Решение

Концентрация электронов в зоне проводимости определяется выражением

$$n_n = N_c e^{\frac{-(E_c - E_F)}{kT}},$$
(13)

где E_F – энергия уровня Ферми; E_C – энергия нижней границы зоны проводимости; k – постоянная Больцмана; T – температура; N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости.

В свою очередь,

$$N_{c} = 2\left(\frac{2\pi m_{n}^{*}kT}{h^{2}}\right)^{\frac{3}{2}} = 2\frac{\left(2\pi m_{n}^{*}k\right)^{\frac{3}{2}}T^{\frac{3}{2}}}{h^{3}} = GT^{\frac{3}{2}},$$
 (14)

где h – постоянная Планка; m_n^* – эффективная масса электрона; G – коэффициент пропорциональности.

Перепишем выражение (13) в виде

$$\frac{N_c}{n_n} = e^{\frac{\left(E_c - E_F\right)}{kT}},$$
$$\frac{E_c - E_F}{kT} = \ln \frac{N_c}{n_n},$$
$$E_c - E_F = kT \ln \frac{N_c}{n_n},$$
(15)

последнее и будем анализировать.

Поскольку концентрация атомов в германии $N = 4,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ и на 2·10⁶ атомов германия приходится один атом примеси, а при температуре 300 К разница между донорными уровнями и дном зоны проводимости равна 0,01 эВ при $E_3 = 0,72$ эВ, можно считать, что все атомы доноров будут ионизированы, тогда число свободных электронов в нём составит

$$n_n = \frac{4, 4 \cdot 10^{28}}{2 \cdot 10^6} = 2, 2 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}.$$

Эффективная плотность состояний в зоне проводимости при 300 К из выражения (14)

$$N_c = GT^{\frac{3}{2}} = 4,83 \cdot 10^{21} \cdot (300)^{\frac{2}{3}} = 2,5 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}.$$

Из выражения (15) окончательно имеем

$$E_c - E_F = kT \ln \frac{N_c}{n_n} = 0.86 \cdot 10^{-4} \cdot 300 \cdot \ln \frac{2.5 \cdot 10^{25}}{2.2 \cdot 10^{22}} = 0.18 \text{ B}.$$

Таким образом, уровень Ферми находится ниже дна зоны проводимости на 0,18 эВ, что составляет 25 % от ширины запрещённой зоны.

2. Вычислить положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости при температуре 400 К для кристалла Ge, содержащего $5 \cdot 10^{22}$ атомов сурьмы в кубических метрах.

Решение

Сурьма по отношению к германию является донором, германий будет *n*-типа, поэтому можно воспользоваться всеми рассуждениями и математическими выкладками из предыдущей задачи.

Определяем эффективную плотность состояний в зоне проводимости

$$N_c = GT^{\frac{3}{2}} = 4,83 \cdot 10^{21} \cdot (400)^{\frac{3}{2}} = 3,86 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}.$$

При температуре 400 К тем более можно считать, что все атомы донорной примеси ионизированы, тогда $n_n = 5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Из соотношения $E_c - E_F = kT \ln \frac{N_c}{n_n}$ получим $E_c - E_F = 0.86 \cdot 10^{-4} \cdot 400 \cdot \ln \frac{3.86 \cdot 10^{25}}{5 \cdot 10^{22}} = 0.229$ эВ,

то есть уровень Ферми находится ниже дна зоны проводимости на 0,029 эВ. Это свидетельствует о том, что в полупроводнике *n*-типа с увеличением температуры уровень Ферми стал лежать ниже, чем в предыдущем случае.

Тема 2. НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ, ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Цель – изучение классификации носителей заряда в полупроводниках, закрепление теоретических знаний, привитие навыков решения задач по определению концентраций носителей и их влиянию на свойства полупроводников.

Примеры и задачи

1. Удельное сопротивление собственного Ge при T = 300 К $\rho_i = 0,43$ Ом·м. Подвижности электронов и дырок в Ge равны соответственно 0,39 и 0,19 м²/В·с. Определить собственную концентрацию электронов и дырок. Какова будет концентрация электронов и дырок при той же температуре, если Ge легировать примесью атомов сурьмы так, что один атом примеси приходится на 2·10⁶ атомов Ge? Каково будет удельное сопротивление легированного Ge?

Решение

Удельная проводимость полупроводника σ определяется следующим образом:

$$\sigma = e \Big(p \mu_p + n \mu_n \Big), \tag{16}$$

где p и n – концентрации дырок и электронов соответственно; μ_p и μ_n – подвижности дырок и электронов соответственно; e – заряд электрона.

Для собственного полупроводника $p_i = n_i$, поэтому удельная проводимость в этом случае

$$\sigma_i = \frac{1}{\rho_i} = n_i e \left(\mu_n + \mu_p\right), \tag{17}$$

откуда

$$n_i = p_i = \frac{1}{\rho_i e(\mu_n + \mu_p)} = \frac{1}{0.43 \cdot 1.602^{-19} (0.39 + 0.19)} \approx 2.5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}. (18)$$

Это и есть собственная концентрация носителей в Ge при 300 К.

Если Ge легирован донорной примесью, то по условию концентрация донорных примесей

$$N_{\rm fi} = \frac{4, 4 \cdot 10^{28}}{2 \cdot 10^6} = 2, 2 \cdot 10^{22} \,\,\mathrm{m}^{-3}.$$

При температуре 300 К можно считать, что все атомы примеси ионизированы и $n_n = 2, 2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Тогда концентрация дырок в Ge *n*-типа

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{\left(2, 5 \cdot 10^{19}\right)^2}{\left(2, 2 \cdot 10^{22}\right)} = 2,84 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}.$$

Удельное сопротивление легированного полупроводника

$$\rho_n = \frac{1}{\sigma_n} = \frac{1}{e(n_n \mu_n + p_n \mu_p)} \cong \frac{1}{e n_n \mu_n}, \qquad (19)$$

так как первым слагаемым в скобках можно пренебречь.

$$\rho_n = \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2, 2 \cdot 10^{22} \cdot 0,39} = 0,73 \cdot 10^{-3} \text{ Om} \cdot \text{m}.$$

Из анализа решения следует, что при такой степени легирования удельное сопротивление Ge уменьшилось практически на три порядка (собственное $\rho_i = 0,43$ Ом·м).

2. Удельное сопротивление собственного Si при 300 К $\rho_i = 3,29 \cdot 10^3$ Ом·м. Подвижности электронов и дырок в Si равны соответственно 0,14 и 0,05 м²/В·с. Определить собственную концентрацию электронов и дырок. Какова будет концентрация электронов и дырок при той же температуре, если Si легировать примесью атомов сурьмы с концентрацией 5·10²⁰ м⁻³? Каково будет удельное сопротивление легированного кремния?

Решение

Воспользуемся рассуждениями предыдущей задачи. Собственная концентрация электронов и дырок из (18) для кремния

$$n_i = p_i = \frac{1}{\rho_i e(\mu_n + \mu_p)} = \frac{1}{3,29 \cdot 10^3 \cdot 1,602^{-19} (0,14 + 0,05)} \approx 0,998 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3};$$
$$n_i = p_i \approx 10^{16} \text{ m}^{-3}.$$

При легировании Si сурьмой можно считать, что при 300 К все атомы примеси ионизированы и $n_n = 5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

Концентрация дырок в Si *n*-типа

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{\left(10^{16}\right)^2}{\left(5 \cdot 10^{20}\right)} = 2 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$$

Удельное сопротивление легированного кремния *n*-типа

$$\rho_n = \frac{1}{\sigma_n} \approx \frac{1}{e n_n \mu_n} = \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{20} \cdot 0,14} = 8,92 \cdot 10^{-2} \text{ Om} \cdot \text{m}.$$

Таким образом, удельное сопротивление легированного кремния уменьшилось практически на пять порядков.

3. Определить удельное сопротивление Si *n*-типа при 300 K, если концентрации доноров $N_{\rm d}$ равны 10^{20} и 10^{24} м⁻³.

Решение

Считаем, что все примеси ионизированы и концентрация основных носителей равна концентрации примеси, то есть $n \approx N_{\rm d}$. Тогда концентрация неосновных носителей (дырок)

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n}$$

Для первого случая

$$p_{n1} = \frac{\left(10^{16}\right)^2}{10^{20}} = 10^{12} \text{ m}^{-3};$$

1	Λ
T	-

$$p_{n2} = \frac{\left(10^{16}\right)^2}{10^{24}} = 10^8 \text{ m}^{-3}.$$

Удельное сопротивление соответственно

$$\rho_{n1} \approx \frac{1}{en_{n1}\mu_n} = \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{20} \cdot 0,14} = 0,44 \text{ Om} \cdot \text{m};$$

$$\rho_{n2} \approx \frac{1}{en_{n2}\mu_n} = \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{24} \cdot 0,14} = 0,44 \cdot 10^{-4} \text{ Om} \cdot \text{m};$$

то есть удельное сопротивление во втором случае будет на четыре порядка меньше.

4. Определить концентрации основных и неосновных носителей, удельное сопротивление Ge *n*-типа при T = 300 K, если концентрации доноров $N_{\rm d}$ равны 10^{20} м⁻³ и 10^{24} м⁻³.

5. Определить концентрации основных и неосновных носителей, удельное сопротивление Si *p*-типа при T = 300 K, если концентрации акцепторов N_a равны 10^{20} м⁻³ и 10^{24} м⁻³.

6. Образец Ge легирован алюминием с концентрацией акцепторной примеси $N_a = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Определить концентрации электронов и дырок, удельную проводимость σ этого образца при T = 300 K.

7. Удельная проводимость σ образца собственного Si при 300 К равна 4,3·10⁻⁴ См/м. Какова концентрация собственных но-сителей?

8. Образец легированного Si *n*-типа имеет размеры, мм: l = 10; b = 2; h = 1. Подвижности электронов и дырок равны соответственно 0,14 и 0,05 м²/В·с, концентрация собственных носителей заряда $n_i = 10^{16}$ м⁻³. Определить концентрацию примесей в образце Si, если его сопротивление R = 150 Ом. Определить также отношение дырочной проводимости к электронной.

Решение

С одной стороны, удельное сопротивление материала образца

$$\rho = \frac{Rbh}{l} = \frac{150 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} = 0,03 \text{ Om} \cdot \text{m}.$$

С другой стороны, удельное сопротивление легированного кремния *n*-типа определяется выражением

$$\rho_n = \frac{1}{\sigma_n} = \frac{1}{e(n_n\mu_n + p_n\mu_p)},$$

то есть

$$0,03 = \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \left(0,14n_n + 0,05p_n\right)},$$

ИЛИ

$$0,14n_n + 0,05p_n = 2,08 \cdot 10^{20}.$$

Поскольку $n_i^2 = np$, то концентрация неосновных носителей – дырок $p_n = \frac{n_i^2}{n_n}$, её и подставим в предыдущее уравнение, тогда

$$0,14n_n + 0,05\frac{n_i^2}{n_n} = 2,08 \cdot 10^{20},$$

где $n_i = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ для кремния.

Упростим уравнение

$$0,14n_n^2 + 0,05 \cdot 10^{32} = 2,08 \cdot 10^{20} \cdot n_n.$$

Это квадратное уравнение имеет корни

$$n_{n1,2} = \frac{2,08 \cdot 10^{20} \pm \sqrt{(2,08)^2 \cdot 10^{40} - 4 \cdot 0,14 \cdot 0,05 \cdot 10^{32}}}{2 \cdot 0,14},$$
$$n_{n1,2} = \frac{2,08 \cdot 10^{20} \pm 2,08 \cdot 10^{20}}{2 \cdot 0,14}.$$

Один из корней уравнения равен 0, а другой дает $n_n = 1,48 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$.

Полагая, что все атомы примеси ионизированы, получаем

$$N_{\rm d} = n_n = 1,48 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$$
.

Дырочная и электронная проводимости определяются выражениями $\sigma_p = e\mu_p p$, $\sigma_n = e\mu_n n$. Тогда

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_n} = \frac{e\mu_p p_n}{e\mu_n n_n} = \frac{\mu_p p_n}{\mu_n n_n} = \frac{\mu_p n_i^2}{\mu_n n_n^2},$$

так как $p_n = \frac{n_i^2}{n_n}$.

Следовательно,

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_n} = \frac{0.05 \cdot (10^{16})^2}{0.14 \cdot (1.48 \cdot 10^{21})^2} = 0.16 \cdot 10^{-10}.$$

Это свидетельствует о том, что дырочная проводимость в кремнии *n*-типа ничтожно мала.

9. Полупроводник в условиях равновесия имеет концентрацию электронов $n = 2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ и концентрацию дырок $p = 10^{20} \text{ m}^{-3}$. Определить полную концентрацию примесей, тип доминирующей примеси и собственную концентрацию носителей заряда.

10. Определить удельную проводимость σ образца Si при 300 K, если концентрация акцепторов в полупроводнике $N_{\rm a} = 2,3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, а концентрация доноров $N_{\rm g} = 2,2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$.

11. Собственный Ge имеет удельную проводимость $\sigma_i = 3,56$ см/м при 310 К и $\sigma_i = 0,42$ См/м при 273 К. Ge *n*-типа имеет $2 \cdot 10^{21}$ атомов донорной примеси на 1 м³ при этих двух температурах. Определить концентрации собственных носителей и удельные проводимости легированного Ge при данных температурах.

12. В Si p-n-переходе удельное сопротивление p-области $\rho_p = 10^{-4}$ Ом·м, а n-области $\rho_n = 10^{-2}$ Ом·м. Вычислить контактную разность потенциалов, если концентрация собственных но-сителей $n_i = 1, 2 \cdot 10^{16}$ м⁻³.

13. Идеальный Si p - n-переход имеет обратный ток насыщения $I_0 = 30$ мкА при t = 25 °C. Определить дифференциальное сопротивление диода при прямом и обратном напряжениях, равных 0,2 В.

Тема 3. БАРЬЕРЫ, КОНТАКТЫ И ПЕРЕХОДЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель – освоение основных понятий теории контактных явлений в полупроводниках, привитие навыков решения задач по определению характеристик электрических переходов в зависимости от параметров полупроводников.

Теоретические основы

Чаще всего в полупроводниковых приборах используются p - n-переходы. Одна из областей (p^+ или n^+) имеет более высокую концентрацию носителей и называется эмиттером, другая (n или p) – меньшую концентрацию основных носителей и называется базой.

Теоретическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) *p* – *n*-перехода определяется соотношением

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

ИЛИ

$$U = \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right),$$

где I_0 – обратный ток насыщения; U – напряжение на p – n-переходе; ϕ_T – температурный потенциал.

Полупроводниковый прибор, имеющий один выпрямляющий электрический переход и два омических вывода, называют полупроводниковым диодом. Кремниевые диоды имеют значительно меньшее значение обратного тока по сравнению с германиевыми.

На ВАХ диода существенное влияние оказывает температура окружающей среды. При ее увеличении на каждые 10 °C обратный ток насыщения увеличивается примерно в два раза у германиевых и в 2,5 раза у кремниевых диодов.

Важным параметром полупроводниковых диодов является дифференциальное сопротивление $r_{\mu \mu \phi} = \frac{dU}{dI}$. При прямом сме-

щении (
$$U > 0$$
) $r_{\text{диф}} = \frac{\varphi_T}{I + I_0}$, если же $I >> I_0$, то $r_{\text{диф}} \approx \frac{\varphi_T}{I}$

Полупроводниковые диоды принято характеризовать общей ёмкостью, которая состоит из двух составляющих – барьерной ёмкости $C_{\text{бар}}$ и диффузионной $C_{\text{диф}}$.

Барьерная (зарядная) ёмкость обусловлена нескомпенсированным объемным зарядом, сосредоточенным по обе стороны от границы p - n-перехода, и зависит от величины приложенного обратного напряжения

$$C_{\text{foap}} \approx C_0 \sqrt{\frac{\Delta \varphi_k}{\Delta \varphi_k + |U|}}$$

где C_0 – барьерная ёмкость диода при нулевом напряжении. В свою очередь,

$$C_0 \approx \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l_0},$$

где ε_0 – относительная диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – диэлектрическая проницаемость материала полупроводника; S – площадь перехода; l – длина перехода.

Примеры и задачи

1. В сплавном германиевом p - n-переходе с $N_{\rm d} = 10^3 N_{\rm a}$ на каждые 10^8 атомов Ge приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов (высоту потенциального барьера) при температуре 300 К. Концентрация собственных носителей для германия $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \,\mathrm{m}^{-3}$.

Решение

Плотность атомов в Ge $N = 4, 4 \cdot 10^{28}$ м⁻³, тогда концентрация акцепторных примесей

$$N_{\rm a} = \frac{N}{10^8} = \frac{4, 4 \cdot 10^{28}}{10^8} = 4, 4 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

-

и соответственно концентрация донорных примесей

$$N_{\rm d} = 10^3 \cdot N_{\rm a} = 4, 4 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$$

Контактная разность потенциалов определяется по формуле

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{\rm a} \cdot N_{\rm A}}{n_i^2},\tag{20}$$

где $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ – собственная концентрация носителей в Ge. Из формулы (20)

$$\varphi_k = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{4,4 \cdot 10^{20} \cdot 4,4 \cdot 10^{23}}{2,5^2 \cdot 10^{38}},$$

$$\varphi_k = 0,86 \cdot 10^{-4} \cdot 300 \ln \frac{19,36 \cdot 10^{43}}{6,25 \cdot 10^{38}} = 0,0258 \cdot 12,64 = 0,326 \text{ B}.$$

2. То же самое проделаем для кремниевого *p* – *n*-перехода. Концентрация собственных носителей для Si $n_i = 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

Для кремния концентрация атомов $N = 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, тогда концентрация акцепторных примесей

$$N_{\rm a} = \frac{5 \cdot 10^{28}}{10^8} = 5 \cdot 10^{20} \,\,{\rm m}^{-3}\,,$$

а донорных

$$N_{\rm d} = 10^3 \cdot N_{\rm a} = 5 \cdot 10^{23} \ {\rm m}^{-3}$$

$$N_{\rm A} = 10^{-10} \cdot N_{\rm a} = 3 \cdot 10^{-10} \, \text{M}^{-1}.$$

Контактная разность потенциалов $(n_i = 10^{16} \, \text{m}^{-3})$:
 $\varphi_k = 0,0258 \ln \frac{5 \cdot 10^{20} \cdot 5 \cdot 10^{23}}{10^{32}} = 0,0258 \ln \frac{25 \cdot 10^{43}}{10^{32}},$
 $\varphi_k = 0,0258 \ln 25 \cdot 10^{11} = 0,0258 \cdot 28,5 = 0,73 \, \text{B}.$

3. Удельное сопротивление *p*-области германиевого p - n-перехода $\rho_p = 0,02$ Ом·м, а *n*-области $\rho_n = 0,01$ Ом·м. Какова контактная разность потенциалов при T = 300 К? Подвижность электронов и дырок в Ge соответственно $\mu_n = 0,39$ м²/B·c, $\mu_p = 0,19$ м²/B·c.

Решение

Удельное сопротивление *р*-области

$$\rho_p = \frac{1}{\sigma_p} = \frac{1}{ep\mu_p} \approx \frac{1}{eN_a\mu_p},$$

где N_a – концентрация акцепторов; μ_p – подвижность дырок; e – заряд электрона.

Отсюда

$$N_{\rm a} = \frac{1}{e\mu_p \rho_p} = \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,19 \cdot 0,02} = 0,164 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}.$$

Аналогично найдём концентрацию доноров

$$N_{\rm d} = \frac{1}{e\mu_n\rho_n} = \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,39 \cdot 0,01} = 1,6 \cdot 10^{21} \,\,{\rm m}^{-3}.$$

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_k = 0,0258 \ln \frac{0,164 \cdot 10^{22} \cdot 1,6 \cdot 10^{21}}{6,25 \cdot 10^{38}} = 0,0258 \ln 0,04198 \cdot 10^5 = 0,21 \text{ B}.$$

4. Проделаем то же самое для Si диода. Подвижности электронов и дырок для Si: $\mu_n = 0,14 \text{ m}^2/\text{B·c}, \ \mu_p = 0,05 \text{ m}^2/\text{B·c}.$

Концентрация акцепторов

$$N_{\rm a} = \frac{1}{e\mu_p \rho_p} = \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,05 \cdot 0,02} = 0,624 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$$

и доноров

$$N_{\rm d} = \frac{1}{e\mu_n\rho_n} = \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,14 \cdot 0,01} = 4,45 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}.$$

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_k = 0,0258 \ln \frac{0,624 \cdot 10^{22} \cdot 0,445 \cdot 10^{22}}{(10^{16})^2} = 0,0258 \ln 27,7 \cdot 10^{10} = 0,68 \text{ B}.$$

Таким образом, при равных условиях высота потенциального барьера в Si диоде оказалась практически в три раза выше, чем в Ge.

5. В германиевом p - n-переходе удельная проводимость *p*-области $\sigma_p = 10^4 \text{ См/м}$, а *n*-области $\sigma_n = 10^2 \text{ См/м}$. Подвижности электронов μ_n и дырок μ_p соответственно равны 0,39 и 0,19 м²/В·с. Концентрация собственных носителей в Ge при 300 К $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Вычислить контактную разность потенциалов (высоту потенциального барьера) при 300 К.

Решение

Значение контактной разности потенциалов определяется положением уровня Ферми в областях *р* и *n*:

$$\varphi_k = \varphi_{Fn} - \varphi_{Fp}$$

и в первом приближении можно считать, что

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n \cdot n_p}{n_i^2},\tag{21}$$

где n_n и p_p – концентрации основных носителей заряда в равновесном состоянии в областях *n* и *p*. Учитывая, что в равновесном полупроводнике при данной температуре $n_i^2 = p_i^2 = n_p \cdot p_p = n_n \cdot p_n$, можно выражение (21) записать в виде

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{p_n} = \varphi_T \ln \frac{N_a \cdot N_{\mathcal{A}}}{n_i^2}, \qquad (22)$$

где $\phi_T = \frac{kT}{e}$ – температурный потенциал.

Поскольку удельная проводимость *p*-области $\sigma_p = p_p e \mu_p$, то

$$p_p = \frac{\sigma_p}{e\mu_p} = \frac{10^4}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,19} = 3,29 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}.$$

Аналогично для *n*-области $\sigma_n = n_n e \mu_n$, откуда

$$n_n = \frac{\sigma_n}{e\mu_n} = \frac{10^2}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,39} = 1,6 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}.$$

Воспользовавшись выражением (21), получим контактную разность потенциалов:

$$\varphi_{k} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{n} \cdot n_{p}}{n_{i}^{2}} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1.602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{1.6 \cdot 10^{21} \cdot 3.29 \cdot 10^{23}}{(2.5)^{2} \cdot (10^{19})^{2}},$$
$$\varphi_{k} = 0.0258 \ln 0.84224 \cdot 10^{6} = 0.35 \text{ B}.$$

6. Используя данные и результаты предыдущей задачи, определить: плотность обратного тока насыщения, отношение дырочной составляющей тока насыщения к электронной, если диффузионная длина электронов и дырок одинакова $L_p = L_n = 10^{-3}$ м и напряжение, при котором плотность прямого тока $j = 10^5$ A/м².

Решение

Плотность обратного тока насыщения

$$j_0 = \frac{D_p e p_n}{L_p} + \frac{D_n e n_p}{L_n},\tag{23}$$

где D_p и D_n – соответственно коэффициенты диффузии дырок и электронов, равные $D_p = \frac{kT}{e} \mu_p$ и $D_n = \frac{kT}{e} \mu_n$. Подставим эти значения в (23) и при равенстве $L_p = L_n = L$ получим $j_0 = \frac{kT}{I} (\mu_p p_n + \mu_n n_p).$ (24)

Определим p_n и n_p , пользуясь соотношением $n_i^2 = p_i^2 = n_p \cdot p_p = n_n \cdot p_n$, тогда

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{(2.5)^2 (10^{19})^2}{1.6 \cdot 10^{21}} = 3.9 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-3};$$
$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{6.25 \cdot 10^{38}}{3.29 \cdot 10^{23}} = 1.9 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}.$$

Плотность обратного тока насыщения

$$j_0 = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{10^{-3}} \left(0,19 \cdot 3,9 \cdot 10^{17} + 0,39 \cdot 1,9 \cdot 10^{15} \right) \approx 0,3 \text{ A/m}^2.$$

Отношение дырочной составляющей обратного тока насыщения к электронной

$$\frac{I_{0p}}{I_{0n}} = \frac{\mu_p p_n L_n}{\mu_n n_p L_p} = \frac{\mu_p p_n}{\mu_n n_p} = \frac{0.19 \cdot 3.9 \cdot 10^{17}}{0.39 \cdot 1.9 \cdot 10^{15}} = 100,$$

то есть дырочная составляющая на два порядка больше.

Определим напряжение для получения заданной плотности прямого тока, воспользовавшись уравнением

$$j = j_0 \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

$$e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 = \frac{10^5}{0.3} = 3.3 \cdot 10^5,$$

$$\ln \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} \right) = \ln 3.3 \cdot 10^5,$$

$$\frac{U}{\varphi_T} = \ln 3.3 \cdot 10^5,$$

$$U = \varphi_T \ln 3.3 \cdot 10^5 = 0.0258 \cdot 12.7 = 0.33 \text{ B}.$$

7. Ток, текущий в идеальном p - n-переходе при большом обратном напряжении и 300 К, равен $2 \cdot 10^{-7}$ А. Определить ток при прямом напряжении 0,1 В.

Решение

Воспользуемся зависимостью

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

так как при большом обратном напряжении протекает обратный ток насыщения.

При прямом напряжении 0,1 В ток

$$I = 2 \cdot 10^{-7} \left(e^{\frac{0,1}{0,0258}} - 1 \right) = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 9,6 \text{ мкA}.$$

8. Диод имеет обратный ток насыщения $I_0 = 10$ мкА. Напряжение, приложенное к диоду, равно 0,5 В. Найти отношение прямого тока к обратному при 300 К.

Решение

Зависимость тока от напряжения

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

где I_0 – обратный ток насыщения; ϕ_T – температурный потенциал (для 300 К равен 0,025 В).

Тогда

$$\frac{I}{I_0} = e^{\frac{0.5}{0.0258}} - 1 = 2.2 \cdot 10^8.$$

9. Германиевый полупроводниковый диод, имеющий обратный ток насыщения $I_0 = 25$ мкА, работает при прямом смещении 0,1 В и 300 К. Определить сопротивление диода постоянному и переменному току (дифференциальное).

Решение

Прямой ток диода

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) = 25 \cdot 10^{-6} \left(e^{\frac{0,1}{0,026}} - 1 \right) = 1,14 \text{ MA},$$

где ф*_T* – температурный потенциал.

Сопротивление диода постоянному току

$$R_0 = \frac{U}{I} = \frac{0.1}{1.14 \cdot 10^{-3}} = 87 \text{ Om}.$$

Дифференциальное сопротивление получим дифференцированием исходного выражения:

$$\frac{1}{r_{\mu\mu\phi}} \cong \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}U} = \frac{I_0}{\varphi_T} e^{\frac{U}{\varphi_T}}$$

или $r_{\mu\mu\phi} \approx \frac{\phi_T}{I_0} e^{\frac{-U}{\phi_T}} = \frac{0.026}{25 \cdot 10^{-6}} e^{\frac{-0.1}{0.026}} \cong 10^3 \cdot \frac{1}{45.8} = 21.8 \text{ OM}.$

С учётом того, что $I >> I_0$, можно считать, что $I \approx I_0 e^{\phi_T}$, тогда $r_{\mu\mu\phi} \approx \frac{\phi_T}{I}$.

В нашем случае это будет $r_{\text{диф}} \approx \frac{0,026}{1,14 \cdot 10^{-3}} = 22,8 \text{ Om}$, то

есть упрощенной формулой можно пользоваться для оценки дифференциального сопротивления прямосмещённого p - n-перехода. На практике она чаще используется в виде (для 300 К) $r_{\text{диф}} \approx \frac{25}{I}$, где I берётся в миллиамперах, а результат получается в омах. Тогда $r_{\text{диф}} \approx \frac{26}{1,14} = 22,8 \text{ OM}$.

Из анализа решений можно сделать также очень важный вывод: сопротивление прямосмещённого *p* – *n*-перехода переменному току значительно меньше, чем постоянному. Это явление очень часто используется на практике.

10. Для идеального p - n-перехода определить: а) при каком напряжении обратный ток будет достигать 90 % значения обратного тока насыщения при 300 К; б) отношение тока при прямом напряжении 0,05 В к току при том же значении обратного напряжения.

Решение

1. При 300 К температурный потенциал $\phi_T = 0,026$ В. Из условия задачи обратный ток составит $0,9I_0$.

$$\begin{split} -U_{\text{обр}} &= \varphi_T \ln \left(\frac{-I_{\text{обр}}}{I_0} + 1 \right) \\ \text{или} & -U_{\text{обр}} &= \varphi_T \ln 0, 1, \\ -U_{\text{обр}} &= 0,026 \cdot (-2,3) = -0,06 \text{ B} \left(\approx 2 \text{ } \varphi_T \right) \end{split}$$

2. Отношение прямого тока к обратному при напряжениях 0,05 и -0,05 В

$$\frac{I_{\rm np}}{I_{\rm obp}} = \frac{I_0 \left(e^{+\frac{0.05}{\varphi_T}} - 1 \right)}{I_0 \left(e^{-\frac{0.05}{\varphi_T}} - 1 \right)} = \frac{e^{+1.92} - 1}{e^{-1.92} - 1} = 6.8,$$

то есть примерно в семь раз прямой ток больше обратного.

11. В идеальном p - n-переходе обратный ток насыщения $I_0 = 10^{-14}$ А при 300 К и $I_0 = 10^{-9}$ А при 398 К (125 °C). Определить напряжения на p - n-переходе в обоих случаях, если прямой ток равен 1 мА.

Решение

Из уравнения вольт-амперной характеристики перехода

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right)$$
$$\frac{I}{I_0} = e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1$$
$$\frac{U}{I_0} = I$$

можно записать

$$e^{\frac{U}{\varphi_T}} = \frac{I}{I_0} + 1.$$

ИЛИ

Логарифмируя последнее выражение, получим:

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

Для 300 К
$$\varphi_T = kT/e = 0,86 \cdot 10^{-4} \cdot 300 = 0,0258$$
 B, а напряжение
 $U_1 = 0,0258 \ln\left(\frac{10^{-3}}{10^{-14}} + 1\right) \approx 0,0258 \ln 10^{11} = 0,65$ B.

Для 398 К
$$\varphi_T = kT/e = 0,86 \cdot 10^{-4} \cdot 398 = 0,0342$$
 В и
 $U_2 = 0,0342 \ln\left(\frac{10^{-3}}{10^{-9}} + 1\right) \cong 0,0342 \ln 10^6 = 0,47$ В.

Такая температурная зависимость характерна для Si диодов.

12. Определить, во сколько раз увеличивается обратный ток насыщения сплавного p - n-перехода, если: а) для Ge диода температура увеличивается от 20 до 80 °C; б) для Si диода температура увеличивается от 20 до 150 °C.

Решение

Зависимость обратного тока от температуры имеет вид

$$I_0 = k_1 T^m e^{-U_3 0/\eta \phi_T},$$

где k_1 – постоянная; $E_{30} = eU_{30}$ – ширина запрещённой зоны при 0 К; ϕ_T – температурный потенциал.

Для Ge: η = 1, *m* = 2, *U*₃₀ = 0,785 B, Si: η = 2, *m* = 1,5, *U*₃₀ = 1,21 B.

Следовательно, для Ge обратный ток насыщения

$$I_0 = k_1 T^2 \mathrm{e}^{-0,785/\phi_T}$$

При 80 °С или 353 К имеем:

$$\varphi_T = 353 \cdot 0,86 \cdot 10^{-4} = 0,0304 \,\mathrm{B},$$

тогда

$$I_{0(80 \circ C)} = k_1 (353)^2 e^{-0.785/0.0304} = k_1 (353)^2 e^{-25.8}$$

При 20 °С или 293 К имеем:

$$\varphi_{T2} = 293 \cdot 0,86 \cdot 10^{-4} = 0,0252 \text{ B}$$

И ТОК

$$I_{0(20 \circ C)} = k_1 (293)^2 e^{-0.785/0.0252} = k_1 (293)^2 e^{-31.1}.$$

Тогда отношение токов для Ge

$$\frac{I_{0(80 \circ C)}}{I_{0(20 \circ C)}} = \frac{k_1 (353)^2 e^{-25.8}}{k_1 (293)^2 e^{-31.1}} = \frac{1.24 \cdot 10^5 \cdot 6.2 \cdot 10^{-12}}{0.86 \cdot 10^5 \cdot 3.1 \cdot 10^{-14}} = 288,$$

то есть при повышении температуры с 20 до 80 °С ток в Ge диоде увеличивается почти в 290 раз.

Для Si диода:

$$I_0 = k_2 T^{1,5} \mathrm{e}^{-1,21/2\varphi_T} \,.$$

При 150 °С или 423 К имеем:

$$\varphi_T = \frac{kT}{e} = 0,86 \cdot 10^{-4} \cdot 423 = 0,0364 \text{ B},$$

И ТОК

$$I_{0(150 \circ \text{C})} = k_2 (423)^{1.5} \text{ e}^{-1.21/2 \cdot 0.0364} = k_2 (423)^{1.5} \text{ e}^{-16.6}$$

При 20 °С или 293 К $\phi_T = 0,0253$ В и ток соответственно

$$I_{0(20 \circ C)} = k_2 (293)^{1.5} e^{-1.21/2 \cdot 0.0253} = k_2 (293)^{1.5} e^{-23.9}.$$

Тогда отношение токов для Si диода

$$\frac{I_{0(150 \,^{\circ}\text{C})}}{I_{0(20 \,^{\circ}\text{C})}} = \frac{k_2 (423)^{1.5} \,\text{e}^{-16.6}}{k_2 (293)^{1.5} \,\text{e}^{-23.9}} = \frac{8.7 \cdot 10^3 \cdot 6.2 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10^3 \cdot 4.2 \cdot 10^{-11}} = 2568,$$

то есть для Si диода при повышении температуры с 20 до 150 °C обратный ток насыщения увеличится почти в 2570 раз.

Тема 4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ВАРИКАПЫ

Цель – изучение основных характеристик и свойств полупроводниковых диодов, обучение практическому расчету режимов работы, параметров диодов и варикапов.

Примеры и задачи

1. Обратный ток насыщения полупроводникового диода $I_0 = 10^{-6}$ А при 300 К. Определить сопротивление диода постоянному и переменному токам при прямом напряжении 0,15 В.

2. Полупроводниковый диод имеет прямой ток 0,8 А при напряжении 0,3 В и температуре 310 К. Определить обратный ток насыщения, дифференциальные сопротивления при прямом напряжении 0,2 В и обратном 1 В.

3. При изменении прямого напряжения на 0,1 В прямой ток Ge диода изменяется на 10 мА, а при изменении обратного напряжения на 10 В обратный ток изменяется на 40 мкА. Определить дифференциальные сопротивления диода при прямом и обратном напряжениях.

4. Определить, во сколько раз изменится сопротивление постоянному току и дифференциальное сопротивление диода Д305: а) при изменении прямого напряжения от 0,4 до 0,6 В при T = 20 °C; б) при изменении температуры от 20 до 125 °C для напряжений +0,6 и -50 В.

5. Обратный ток насыщения диода Шоттки равен 2 мкА. Диод соединен последовательно с резистором и источником постоянного напряжения E = 0,2 В так, что на диод подается прямое напряжение. Определить сопротивление резистора, если падение напряжения на нём равно 0,1 В при 300 К. 6. Определить ток идеализированного диода, текущий в цепи (рис. 3), если E = 5 B, R = 1 кОм, обратный ток насыщения $I_0 = 10^{-12}$ A при 300 K.



7. Идеализированнный диод включен в схему, изображенную на рис. 4.



Определить выходное напряжение.

8. Определить выходное напряжение в схеме на рис. 5.



Кремниевый диод, имеющий обратный ток насыщения $I_0 = 10^{-5}$ А, работает при 300 К.

9. Пользуясь справочником, определить, можно ли использовать диод Д109 для выпрямления синусоидального напряжения с амплитудой 85 В.

10. Пользуясь справочником, выбрать тип диода, пригодного для выпрямления переменного синусоидального напряжения с амплитудой $U_m = 400$ В и рассчитанного на выпрямленный ток 250 мА.

11. Составить и рассчитать выпрямительную цепочку, позволяющую получить выпрямленный ток $I_{\text{выпр}} = 400$ мA, если используются диоды Д226.

12. Пользуясь ВАХ стабилитрона Д813, определить при 20 °С: напряжение стабилизации (по справочнику) и максимально допустимый ток стабилитрона, если максимально допустимая рассеиваемая мощность равна 125 мВт.

13. Как зависит температурный коэффициент напряжения (ТКН) от вида пробоя *p* – *n*-перехода в полупроводниковом стабилитроне? Для каких напряжений пробоя *p* – *n*-перехода ТКН близок к нулю? Каким способом можно уменьшить ТКН полупроводниковых стабилитронов?

14. Для стабилизации напряжения в схеме подберите по справочнику полупроводниковый стабилитрон и рассчитайте необходимое сопротивление ограничительного резистора, если сопротивление нагрузки $R_{\rm H} = 500$ Ом. Необходимое напряжение стабилизации $U_{\rm cr} = 10$ В, напряжение источника питания E = 16 В.

15. Для стабилизации напряжения на нагрузке используется полупроводниковый стабилитрон с напряжением стабилизации $U_{ct} = 10$ В. Определить допустимые пределы изменения питающего напряжения, если максимальный ток стабилитрона $I_{ct max} = 30$ мА, минимальный $I_{ct min} = 1$ мА, сопротивление нагрузки $R_{\rm H} = 1$ кОм, сопротивление ограничительного резистора $R_{\rm orp} = 0.5$ кОм.

16. Для условий, сформулированных в предыдущей задаче, определить пределы изменения сопротивления резистора нагрузки, если напряжение источника питания E = 30 В.

17. Стабилитрон с напряжением стабилизации $U_{ct} = 13$ B, максимальным током стабилизации $I_{ct max} = 20$ мA, минимальным $I_{ct min} = 1$ мA подключен к резистору $R_{\rm H} = 2,2$ кOм. Найти сопро-

тивление ограничительного резистора, если напряжение источника меняется от $E_{\min} = 16$ В до $E_{\max} = 24$ В. Определить, будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменений *E*.

18. Стабилитрон с напряжением стабилизации $U_{ct} = 50$ В, максимальным током стабилизации $I_{ct max} = 40$ мА и минимальным током $I_{ct min} = 5$ мА подключен к нагрузке $R_{\rm H}$, ток через которую меняется от $I_{\rm H} = 0$ до $I_{\rm H max}$. Определить максимальный ток нагрузки $I_{\rm H max}$, если напряжение источника питания E = 200 В.

19. Используя значение сопротивления ограничительного резистора, найденное в предыдущей задаче, найти возможные пределы изменения питающего напряжения, если ток нагрузки постоянен $I_{\rm H} = 25$ мА.

20. Барьерная ёмкость диода равна 200 пФ при обратном напряжении 2 В. Какое требуется обратное напряжение, чтобы уменьшить ёмкость до 50 пФ, если контактная разность потенциалов резкого p - n-перехода $\varphi_k = 0.82$ В?

Решение

Барьерная ёмкость *р* – *n*-перехода определяется по формуле

$$C_{\text{foap}}\left(U_{\text{ofp}}\right) = C_{\text{foap}}\left(0\right) \cdot \left(\frac{\varphi_{k}}{\varphi_{k} + U_{\text{ofp}}}\right)^{\frac{1}{n}}$$

где $C_{\text{бар}}(0)$ – ёмкость p-n-перехода при нулевом напряжении; φ_k – контактная разность потенциалов; $U_{\text{обр}}$ – обратное напряжение; n = 2 – для резких p-n-переходов, n = 3 – для плавных p-n-переходов.

Для нашего случая (резкий *p* – *n*-переход)

$$C_{\text{foap}}\left(U_{\text{ofp}}\right) = C_{\text{foap}}\left(0\right) \cdot \frac{\varphi_k^{1/2}}{\sqrt{\varphi_k + U_{\text{ofp}}}} = \frac{k_1}{\sqrt{\varphi_k + U_{\text{ofp}}}},$$

где k_1 – некая постоянная, равная $C_{\text{бар}}(0) \cdot \varphi_k^{1/2}$.

При обратном напряжении $U_{o\delta p} = 2 \text{ B} C_{\delta a p} = 200 \text{ пФ}$, тогда $k_1 = C_{\delta a p} \cdot \sqrt{\varphi_k + U_{o\delta p}}$, $k_1 = 200 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{0.82 + 2} = 335 \cdot 10^{-12} \text{ } \Phi \cdot \text{B}^{1/2}$. Найдём обратное напряжение, при котором $C_{\text{бар}} = 50 \text{ п} \Phi$.

$$50 \cdot 10^{-12} = \frac{335 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{0.82 + U_{\text{obp}}}}$$

или

$$\begin{split} \sqrt{0,82+U_{\rm o \delta p}} &= 6,7\,,\\ 0,82+U_{\rm o \delta p} &= 44,9\,, \end{split}$$

то есть $U_{\text{обр}} \cong 45$ В.

21. Вычислить барьерную ёмкость германиевого полупроводникового диода с площадью поперечного сечения p - n-перехода $S = 1 \text{ мм}^2$ и шириной запирающего слоя $2 \cdot 10^{-3}$ мм.

Решение

Для вычисления ёмкости воспользуемся формулой

$$C_{\text{foap}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l_0} \sqrt{\frac{\varphi_k}{\varphi_k + |U_{\text{ofp}}|}},$$

где $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \, \Phi/m$ – диэлектрическая проницаемость свободного пространства; $\varepsilon = 16$ – относительная диэлектрическая проницаемость Ge.

Тогда при $U_{\text{обр}} = 0$

$$C_{\text{foap}} = \frac{16 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}} \cong 71 \,\mathrm{m}\Phi \,.$$

22. Найти барьерную ёмкость германиевого p - n-перехода, если удельное сопротивление p-области $\rho_p = 3,5 \cdot 10^2$ Ом·м, контактная разность потенциалов $\varphi_k = 0,35$ В, приложенное обратное напряжение $U_{\text{обр}} = 5$ В, площадь поперечного сечения p - n-перехода $S = 1 \text{ мм}^2$.

Решение

Удельная проводимость определяется как $\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$, удельная проводимость *p*-слоя $\sigma_p \approx ep\mu_p \approx eN_a\mu_p$.

Ширина p-n-перехода при $N_{\rm d} >> N_{\rm a} l_0 \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 \varphi_k}{eN_{\rm a}}}$.

Заменяя $eN_a = \sigma_p/\mu_p$, получаем

$$l_0 \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 \varphi_k \mu_p}{\sigma_p}} = \sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0 \varphi_k \mu_p \rho_p} ,$$

 $l_0 \cong \sqrt{2 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 16 \cdot 0,35 \cdot 0,19 \cdot 3,5 \cdot 10^{-2}} = 8,12 \cdot 10^{-7}$ м = 0,8 мкм. Барьерная ёмкость *p* – *n*-перехода при обратном напряжении 5 В:

$$C_{\text{foap}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l_0} \sqrt{\frac{\varphi_k}{\varphi_k + |U_{\text{ofp}}|}} = \frac{8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 16 \cdot 10^{-6}}{0,81 \cdot 10^{-6}} \sqrt{\frac{0,35}{5,35}} \approx 45 \text{ m}\Phi.$$

23. Удельная проводимость *p*-области Ge с резким p-n-переходом $\sigma_p = 10^4$ См/м, *n*-области – $\sigma_n = 10^2$ См/м. Высота потенциального барьера в равновесном состоянии $\varphi_k = 0,358$ В, площадь поперечного сечения p - n-перехода S = 0,5 мм².

Определить барьерную ёмкость p - n-перехода и её величину при обратных напряжениях $U_{\text{обр}} = 5$ и 10 В.

Решение

Поскольку проводимость *n*-области на два порядка меньше, чем *p*-области, то можно считать, что $N_{\rm d} \ll N_{\rm a}$ и область с меньшей проводимостью и будет определять ширину и барьерную ёмкость *p* – *n*-перехода.

Ширина перехода в равновесном состоянии

$$l_0 \simeq \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 \varphi_k \mu_n}{\sigma_n}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 16 \cdot 0,39 \cdot 0,358}{10^2}} = 6,3 \cdot 10^{-7} \text{ M} = 0,63 \text{ MKM}.$$

Барьерная ёмкость *р* – *n*-перехода

$$C_{\text{foap}} = \frac{16 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}{0,63 \cdot 10^{-6}} \approx 112,5 \,\,\mathrm{m}\Phi.$$

Барьерные ёмкости при обратных напряжениях $U_{\text{обр}} = 5$ и 10 В соответственно:

$$\begin{split} C_{\text{foap1}} &= C_{\text{foap}}\left(0\right) \sqrt{\frac{\varphi_k}{\varphi_k + \left|U_{\text{ofp1}}\right|}} = 112,5 \sqrt{\frac{0,358}{5,358}} \approx 29 \; \text{m}\Phi \,, \\ C_{\text{foap2}} &= C_{\text{foap}}\left(0\right) \sqrt{\frac{\varphi_k}{\varphi_k + \left|U_{\text{ofp2}}\right|}} = 112,5 \sqrt{\frac{0,358}{10,358}} \approx 21 \; \text{m}\Phi \,. \end{split}$$

Тема 5. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Цель – изучение основных характеристик и свойств транзисторов, привитие навыков практического расчета режимов работы и параметров транзисторов и использования математических моделей при расчете простейших схем.

Теоретические основы

Биполярный транзистор (БТ) представляет собой полупроводниковый прибор с тремя областями чередующейся электропроводности, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. Биполярные транзисторы могут быть типа p - n - p и n - p - n, а в зависимости от того, какой из электродов транзистора является общим для входного и выходного сигналов, различают три схемы включения БТ – с общей базой (ОБ), общим коллектором (ОК) и общим эмиттером (ОЭ).

Для определения аналитических зависимостей между токами и напряжениями идеализированный транзистор представляют моделью Эберса – Молла, такая модель для *p* – *n* – *p*-транзистора представлена на рис. 6.



Puc. 6

Токи эмиттера и коллектора выражаются следующим образом (формулы Эберса – Молла):

$$I_{\mathfrak{H}} = I_{\mathfrak{H}} \left(e^{\frac{U_{\mathfrak{H}}}{\varphi_{T}}} - 1 \right) - \alpha_{I} I_{\mathsf{K} \mathsf{K} \mathsf{K}} \left(e^{\frac{U_{\mathsf{K} \mathsf{K}}}{\varphi_{T}}} - 1 \right),$$
$$I_{\mathsf{K}} = \alpha_{N} I_{\mathfrak{H} \mathsf{K} \mathsf{K}} \left(e^{\frac{U_{\mathfrak{H} \mathsf{K}}}{\varphi_{T}}} - 1 \right) - I_{\mathsf{K} \mathsf{K} \mathsf{K}} \left(e^{\frac{U_{\mathsf{K} \mathsf{K}}}{\varphi_{T}}} - 1 \right),$$

где $I_{35\kappa}$ и $I_{\kappa5\kappa}$ – тепловые токи эмиттерного и коллекторного переходов при коротком замыкании при $U_{\kappa5} = 0$ и $U_{35} = 0$ соответственно; α_N – коэффициент передачи тока эмиттера в активном режиме; α_I – коэффициент передачи тока коллектора при инверсном включении; U_{35} , $U_{\kappa5}$ – напряжения на эмиттерном и коллекторном переходах соответственно; $\phi_T = \frac{kT}{e} \approx \frac{T}{11600}$ – температурный потенциал.

Чаще всего используются токи $I_{\kappa 60}$ и I_{360} – обратные токи эмиттерного и коллекторного переходов, измеряемые соответственно при обрыве эмиттера и коллектора. Они связаны с тепловыми токами переходов соотношениями:

$$I_{\rm K \bar{0} \bar{K}} = \frac{I_{\rm K \bar{0} \bar{0}}}{1 - \alpha_I \alpha_N};$$
$$I_{\rm S \bar{0} \bar{K}} = \frac{I_{\rm S \bar{0} \bar{0}}}{1 - \alpha_I \alpha_N}.$$

Из формул Эберса – Молла можно получить выражения для входных и выходных ВАХ транзистора. Входная характеристика $U_{36} = f(I_3)$ имеет вид

$$U_{\Im\delta} = \varphi_T \ln \left[\frac{I_{\Im}}{I_{\Im\delta0}} + 1 + \alpha_N \left(e^{\frac{U_{\kappa\delta}}{\varphi_T}} - 1 \right) \right].$$

Выходная характеристика

$$I_{\kappa} = \alpha_N I_{\mathfrak{H}} - I_{\kappa \mathfrak{f} \mathfrak{0}} \left(e^{\frac{U_{\kappa \mathfrak{f}}}{\varphi_T}} - 1 \right).$$

Примеры и задачи

1. Изобразите схемы включения биполярного транзистора типов p - n - p и n - p - n. Покажите полярности напряжений при работе транзистора в режимах: активном, отсечки, насыщения, инверсном. Покажите также направления токов I_3 , I_6 , I_{κ} для каждого из режимов.

2. Транзистор типа p - n - p включен по схеме с общим эмиттером. Пояснить, в каком режиме работает транзистор, если:



a) $U_{69} = -0.4$ B, $U_{K9} = -0.3$ B; b) $U_{69} = -0.4$ B; $U_{K9} = -10$ B; b) $U_{69} = 0.4$ B, $U_{K9} = -10$ B. Peweenue

Для того чтобы определить, в каком U_{κ_3} режиме работает транзистор, надо определить, в каком направлении смещены эмиттерный и коллекторный переходы. Поскольку напряжение U_{κ_3} распределяется между двумя переходами, то воспользуемся соотношениями (рис. 7):

$$\begin{split} U_{\mathrm{K}\mathfrak{H}} = & U_{\mathrm{d}\mathfrak{H}} + U_{\mathrm{K}\mathrm{d}} = U_{\mathrm{d}\mathfrak{H}} - U_{\mathrm{d}\mathrm{K}}, \\ & U_{\mathrm{d}\mathrm{K}} = U_{\mathrm{d}\mathfrak{H}} - U_{\mathrm{K}\mathfrak{H}}; \end{split}$$

а) $U_{59} < 0$, что соответствует прямому смещению эмиттерного перехода,

$$U_{\rm K} = -0.4 - (-0.3) = -0.1 \,\mathrm{B},$$

что также соответствует прямому смещению коллекторного перехода. Оба перехода смещены в прямом направлении, это соответствует режиму насыщения;

б) $U_{59} < 0$, то есть эмиттерный переход смещен в прямом направлении

$$U_{\text{6K}} = -0, 4 - (-10) = +9, 6 \text{ B},$$

то есть коллекторный переход смещен в обратном направлении, что соответствует активному режиму работы;

в) $U_{69} > 0$, это соответствует обратному смещению эмиттерного перехода,

$$U_{\rm K} = 0, 4 - (-10) = +10, 4 \,\mathrm{B},$$

что соответствует обратному смещению коллекторного перехода. Оба перехода смещены в обратном направлении, а это режим отсечки.

3. Транзистор n - p - n-типа включен по схеме ОБ. Напряжение $U_{36} = -0,5$ В, $U_{\kappa \delta} = 12$ В. Определить $U_{\kappa 3}$. Какой режим работы БТ?

Решение

$$U_{\rm K3} = U_{\rm K6} + U_{\rm 63} = U_{\rm K6} - U_{\rm 36} = 12 - (-0,5) = +12,5 \,\mathrm{B}$$

Активный режим работы.

4. Транзистор p - n - p-типа включен по схеме ОЭ. Напряжение $U_{59} = -0.8$ В, $U_{K9} = -10$ В. Определить U_{K0} и режим работы транзистора.

Решение

$$U_{\rm K\Im} = U_{\rm K\Im} + U_{\rm G\Im},$$
$$U_{\rm K\Im} = U_{\rm K\Im} - U_{\rm G\Im} = -10 - (-0,8) = -9,2 \text{ B}$$

5. Выводы электродов транзистора маркированы A, B, C. Токи, протекающие через эти выводы в активном режиме работы транзистора, равны $I_A = 1$ мА, $I_B = 20$ мкА, $I_C = 1,02$ мА. Определить, с какими выводами транзистора соединены выводы A, B, C и каков коэффициент передачи постоянного тока базы транзистора.

Решение

Токи в транзисторе связаны соотношением $I_3 = I_{\kappa} + I_6$, то есть ток эмиттера самый большой $I_3 = I_C = 1,02$ мА. Ток $I_{\kappa} \approx I_3$, значит, $I_{\kappa} = I_A = 1$ мА и $I_6 = I_B = 20$ мкА.

Коэффициент передачи

$$\beta = \frac{I_{\rm K}}{I_{\rm O}} = \frac{1}{0.02} = 50.$$

6. Нарисуйте энергетические диаграммы p - n - p- и n - p - n-транзисторов при отсутствии напряжений между выводами, а также при работе в активном режиме.



Puc. 8

 $U_{69} = +0,62$ В, очевидно, что эмиттерный переход смещен в прямом на-

правлении, $U_{6\kappa} = -U_{\kappa 6} = -5$ В – обратное смещение коллекторного перехода. Таким образом, режим работы БТ – активный.

Ток коллектора

$$I_{\rm K} = \alpha_N I_{\rm 96.06p} \left(e^{\frac{U_{69}}{\varphi_T}} - 1 \right) - I_{\rm K6.06p} \left(e^{\frac{U_{6\kappa}}{\varphi_T}} - 1 \right),$$
$$I_{\rm K} = 0,995 \cdot 10^{-14} \left(e^{\frac{0.62}{0.25}} - 1 \right) + 10^{-13} \left(e^{\frac{-5}{0.25}} - 1 \right) \approx 5,86 \cdot 10^{-4} \, \rm A.$$

Ток эмиттера

$$I_{3} = I_{36.06p} \left(e^{\frac{U_{63}}{\varphi_{T}}} - 1 \right) - \alpha_{I} I_{K6.06p} \left(e^{\frac{U_{6K}}{\varphi_{T}}} - 1 \right),$$
$$I_{3} = 10^{-14} \left(e^{24.8} - 1 \right) + 0.1 \cdot 10^{-13} \approx 5.89 \cdot 10^{-4} \text{ A}.$$
$$I_{4} = I_{4} = (5.80 - 5.86) \cdot 10^{-4} = 0.02 \cdot 10^{-4} = 2.10^{-6} \text{ A}.$$

Тогда $I_6 = I_9 - I_{\kappa} = (5,89 - 5,86) \cdot 10^{-4} = 0,03 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-6}$ А.

Коэффициент передачи тока базы

$$\beta = \frac{I_{\rm K}}{I_{\rm 0}} = \frac{5,86 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-6}} \approx 195$$

8. При достаточно большом напряжении на коллекторном p - n-переходе его обедненный слой проникает сквозь базу и коллектор сливается с эмиттером. Это явление, называемое проколом базы, произошло в Ge транзисторе при обратном напряжении на коллекторном переходе 30 В. Определить ширину базы при отсутствии напряжения на переходе, если концентрация примесей в базе $N_{\rm d} = 20^{21}$ м⁻³, для Ge $\varepsilon = 16$.

Решение

Ширина перехода при обратном смещении увеличивается

$$l = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\left(\Delta\varphi_k + |U|\right)}{eN_{\mathcal{A}}}},$$

где *U* – приложенное напряжение; *N*_д – концентрация примесей в высокоомном слое (базе).

При напряжении $U_{\kappa\delta} = 30$ В можно пренебречь контактной разностью потенциалов, и увеличение ширины перехода будет равняться ширине базы (до прокола базы). Тогда

$$w \approx l = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\left(\left|U_{\text{obp}}\right|\right)}{eN_{\text{A}}}} = \sqrt{\frac{2\cdot8,86\cdot10^{-12}\cdot16\cdot30}{1,6\cdot10^{-19}\cdot10^{21}}} = 7,3 \text{ MKM}.$$

9. У кремниевого сплавного p - n - p-транзистора ширина базы w = 1 мкм, удельное сопротивление базы $\rho_6 = 5 \cdot 10^{-3}$ Ом·м, удельное сопротивление коллектора значительно меньше. Вычислить напряжение прокола базы.

10. Сплавной транзистор типа *p* – *n* – *p* включен в схему, изображенную на рис. 9.

Определить коллекторный ток, если известно, что коэффициент передачи тока эмиттера $\alpha = 0,98$, обратный ток коллекторного перехода $I_{\kappa 60} = 10$ мкА (при разомкнутом выводе эмиттера).

Решение

Воспользуемся известным соотношением для токов транзистора в активном режиме $I_{\rm K} = \alpha I_{\rm 3} + I_{\rm KOO}$.





Поскольку цепь базы разорвана, то $I_{\kappa} = I_{\mathfrak{I}}$. Следовательно,

$$I_{\kappa} = \alpha I_{\kappa} + I_{\kappa \delta 0}, \ I_{\kappa} (1 - \alpha) = I_{\kappa \delta 0},$$
$$I_{\kappa} = \frac{I_{\kappa \delta 0}}{(1 - \alpha)} = I_{\kappa \delta 0} (1 + \beta).$$

Этот ток обозначается символом $I_{\kappa > 0}$ и называется обратным током коллектор – эмиттер при разомкнутом выводе базы.

Подставляя числовые значения, получим:

$$I_{\rm K} = \frac{10}{(1-0.98)} = 500 \,\,{\rm mkA}$$

Этот ток в $(1 + \beta)$ раз больше обратного тока коллектора $I_{\kappa 60}$ (при разомкнутом выводе эмиттера). Большое значение тока $I_{\kappa 90}$ снижает устойчивость работы транзистора в схеме с ОЭ и может привести к тепловому пробою. Поэтому при эксплуатации транзисторов не допускается отключение и разрыв цепи базы при наличии напряжения на других электродах.

Кроме того, здесь дан простой и точный способ измерения коэффициента передачи тока эмиттера α . Сначала надо измерить ток коллекторного перехода $I_{\kappa 0}$ (включая батарею между коллектором и базой так, чтобы коллекторный переход был смещен в обратном направлении), а затем измерить коллекторный ток $I_{\kappa 90}$, как показано на рис. 10. Величина

$$1 - \alpha = \frac{I_{\rm KOO}}{I_{\rm KOO}}.$$

11. В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, ток коллектора $I_{\kappa} = 1$ мА, ток базы $I_{6} = 20$ мкА, обратный ток коллектора $I_{\kappa 0} = 10^{-8}$ А. Определить коэффициенты передачи по постоянному току α , β и обратный ток коллектора $I_{\kappa 0}$.

12. Пользуясь схемой замещения Эберса – Молла для транзистора, включенного по схеме ОБ, установить зависимость между собственными параметрами и параметрами системы *h*.

Решение

Преобразуем исходную модель Эберса – Молла для малого сигнала на средних частотах (рис. 10) в схему для режима корот-

кого замыкания на выходе по переменному току (рис. 11), так как параметры

$$h_{11\mathrm{E}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \text{ и } h_{21\mathrm{E}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}$$

определяются при $\dot{U}_2 = 0$.
Влиянием емкостей C_3 и C_{κ}
на средних частотах можно
пренебречь. Через парал-
лельное соединение рези-
сторов r_6 и r_{κ} протекает ток
 $\dot{I}' = \dot{I}_1 - \overline{\alpha}\dot{I}_1 = \dot{I}_1(1 - \overline{\alpha})$.
Напряжение на входе \dot{U}_1 $Puc. 10$

$$\dot{U}_{1} = r_{3}\dot{I}_{1} + (1 - \overline{\alpha})\dot{I}_{1}\frac{r_{6}r_{K}}{r_{6} + r_{K}},$$

входное сопротивление при $\dot{U}_2 = 0$.

$$h_{11\mathrm{B}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = r_3 + \frac{(1 - \overline{\alpha}) \cdot r_6 r_{\mathrm{K}}}{r_6 + r_{\mathrm{K}}}$$

Это точное выражение можно упростить с учетом того, что $r_{\rm k} >> r_{\rm d}$,

пренебречь.

Напряжение

 $h_{115} \cong r_{2} + r_{5}(1-\alpha).$

Теперь определим \dot{U}_1 \dot{I}_{r_0} h_{215} . Из схемы видно, что

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{r_{\kappa}} + \overline{\alpha}\dot{I}_1 = \frac{U}{r_{\kappa}} + \overline{\alpha}\dot{I}_1,$$



но напряжение на параллельном соединении резисторов r_б и r_к, в свою очередь, $\dot{U} = \dot{I}' \cdot (r_{\tilde{0}} || r_{\kappa}) = \dot{I}_1 (1 - \overline{\alpha}) \frac{r_{\tilde{0}} r_{\kappa}}{r_{\tilde{0}} + r_{\kappa}}.$ $\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_1(1-\overline{\alpha})r_{\overline{0}}}{r_1+r} + \overline{\alpha}\dot{I}_1.$

$$h_{215} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \alpha + \frac{(1-\alpha)r_5}{r_5 + r_K} = \frac{\alpha + (r_5 / r_K)}{1 + (r_5 / r_K)}.$$

Если $(r_{\rm d} / r_{\rm k}) \ll 1$, то $h_{21\rm b} \approx \alpha$.

Преобразуем теперь исходную схему в схему для режима холостого хода на входе по переменному току (рис. 12), то есть



 $\dot{I}_1 = 0$ и $\alpha \dot{I}_1 = 0$. Коэффициент обратной передачи напряжения с выхода на вход в режиме \dot{U}_2 холостого хода

$$h_{125} = \frac{U_1}{\dot{U}_2} = \frac{I_2 r_5}{\dot{I}_2 (r_5 + r_{\rm K})} = \frac{r_5}{r_5 + r_{\rm K}} \approx \frac{r_5}{r_{\rm K}}$$

Puc. 12

Выходная проводимость в режиме холостого хода

$$h_{22\mathrm{E}} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_2 \left(r_{\mathrm{f}} + r_{\mathrm{K}}\right)} = \frac{1}{r_{\mathrm{f}} + r_{\mathrm{K}}} \approx \frac{1}{r_{\mathrm{K}}}.$$

Таким же образом можно установить соотношения для схем включения ОЭ и ОК.

13. Транзистор *p* – *n* – *p*-типа работает в активном режиме и включен по схеме на рис. 13.



Сопротивление R_3 значительно больше $h_{11\text{Б}}, r_{\text{K}} >> R_{\text{K}}, I_{\text{K}0} \approx 0,$ $R_{\text{H}} \rightarrow \infty$. Найти коэффициент усиления по напряжению K_u .



Источник питания для переменной составляющей представляет собой короткое замыкание (пунктир), и выходной сигнал при заданных условиях выделяется на резисторе R_{κ} .

$$\dot{U}_{\rm BMX} = \dot{I}_{\rm K} R_{\rm K}, \ \dot{I}_{\rm BMX} \approx \dot{U}_{\rm BX} / R_{\rm BM}, \ a \ \dot{I}_{\rm K} \approx \alpha \dot{I}_{\rm BM},$$

то есть

$$\dot{U}_{\rm BMX} = \alpha \dot{I}_{\Im} R_{\rm K} = \frac{\alpha \dot{U}_{\rm BX} R_{\rm K}}{R_{\Im}}.$$
$$\bar{K}_{u} = \frac{\dot{U}_{\rm BMX}}{\dot{U}_{\rm BX}} = \frac{\alpha \dot{U}_{\rm BX} R_{\rm K}}{\dot{U}_{\rm BX} R_{\Im}} = \alpha \frac{R_{\rm K}}{R_{\Im}}.$$

Если $\alpha \approx 1$, то можно считать, что

$$\overline{K}_{u} \approx \frac{R_{\rm K}}{R_{\rm 9}}$$
.
14. Транзистор $n - p - n$ -типа включен по схеме,
изображенной на рис. 14.
 $R_{\rm 9} = 5$ к, $R_{\rm K} = 10$ к, $E_{\rm 9} = 10$ В,
 $E_{\rm K} = 30$ В. Считая, что тран-
зистор работает в активном
режиме, определить напря-
жение $U_{\rm K6}$ для двух случаев:

1. $\alpha \approx 1$, $I_{\kappa 0} = 0$;

2.
$$\alpha \approx 0.98$$
, $I_{\kappa 0} = 2 \cdot 10^{-4}$ A.

Проанализировать

получившиеся результаты.

15. Кремниевый транзистор *p* – *n* – *p*-типа включен по схеме (рис. 15) и работает в активном режиме.

 $R_3 = 0,5 \text{ к}, R_6 = 25 \text{ к}, R_{\kappa} = 4 \text{ к}, E_3 = 2 \text{ B}, E_{\kappa} = 16 \text{ B}, \alpha \approx 0,98, I_{\kappa 0} \approx 0.$ Определить ток коллектора, напряжение $U_{\kappa 6}$ и уточнить режим работы транзистора.

16. И еще одна очень поучительная задача. Кремниевый транзистор n - p - n-типа включен по схеме (рис. 16).

 E_{κ} = 30 B, R_1 = 60 к, R_2 = 30 к, R_3 = 0,5 к, β = 19. Определить напряжение $U_{\text{вых}}$ на выходе схемы.









Решение

На первый взгляд, это схема эмиттерного повторителя и напряжение на выходе должно быть примерно равно потенциалу базы U_6 , а это около 10 В. На самом же деле здесь очень важную роль играет соотношение между токами базы I_6 и делителя $I_{д}$, а об этом пока ничего не известно. Поэтому преобразуем входную



цепь по теореме об эквивалентном генераторе (рис. 17).

$$E_{3KB} = \frac{E_{K}}{R_{1} + R_{2}} R_{2} = \frac{30}{30 + 60} 30 = 10 \text{ B.}$$
$$R_{3KB} = R_{1} \parallel R_{2} = \frac{60 \cdot 30}{60 + 30} = 20 \text{ K.}$$

Тогда по второму закону Кирхгофа $E_{3 \text{KB}} = I_{\vec{0}} R_{3 \text{KB}} + U_{\vec{0}3} + I_{3} R_{3}.$

Ток базы связан с током эмиттера соотношением

 $I_{\tilde{0}} = \frac{I_{\vartheta}}{1+\beta}.$

Puc. 17

Тогда можно записать

$$\begin{split} E_{\mathbf{3}\mathbf{K}\mathbf{B}} &= \frac{I_{\mathbf{3}}}{1+\beta} R_{\mathbf{3}\mathbf{K}\mathbf{B}} + U_{\mathbf{5}\mathbf{3}} + I_{\mathbf{3}} R_{\mathbf{3}}, \\ I_{\mathbf{3}} & \left(\frac{R_{\mathbf{3}\mathbf{K}\mathbf{B}}}{1+\beta} + R_{\mathbf{3}} \right) = E_{\mathbf{3}\mathbf{K}\mathbf{B}} - U_{\mathbf{5}\mathbf{3}}, \\ I_{\mathbf{3}} &= \frac{E_{\mathbf{3}\mathbf{K}\mathbf{B}} - U_{\mathbf{5}\mathbf{3}}}{\frac{R_{\mathbf{3}\mathbf{K}\mathbf{B}}}{1+\beta} + R_{\mathbf{3}}}. \end{split}$$

Выходное напряжение – это напряжение на резисторе R_3 , то есть

$$U_{\rm Bbix} = I_{\Im}R_{\Im} = \frac{E_{\Im KB} - U_{\Im}}{\frac{R_{\Im KB}}{1 + \beta} + R_{\Im}} \cdot R_{\Im} = \frac{10 - 0.7}{1 + 0.5} \cdot 0.5 = 3.1 \text{ B}.$$

Возникла существенная разница между полученным результатом и первоначальным предположением. Это говорит о том, что в данной схеме ток делителя сравним с током базы. Проверьте это.

приложение

Физические постоянные

Заряд электрона $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса свободного электрона $m = 9 \cdot 10^{-31}$ кг. Постоянная Планка $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = 4,14·10⁻¹⁵ эВ·с. Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град = 0,862·10⁻⁴ эВ/град.

Диэлектрическая проницаемость вакуума $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \, \Phi/M.$

Данные параметры приведены в таблице.

Парахотр	Материал		
Параметр	Ge	Si	GaAs
Плотность, кг/м ³	$5,32 \cdot 10^3$	$2,33 \cdot 10^3$	
Атомная масса	72,6	28,1	—
Плотность атомов, м ⁻³	$4,4.10^{28}$	$5 \cdot 10^{28}$	_
Диэлектрическая проницаемость	16	12	11
Эффективная масса:			
– электронов;	0,12	0,26	0,07
— дырок	0,28	0,49	0,5
Ширина запрещенной зоны*, эВ	0,72	1,12	1,4
Подвижность*, $m^2/B \cdot c$:			
– электронов;	0,39	0,14	1,1
— дырок	0,19	0,05	0,045
Собственная концентрация носителей*, м ⁻³	$2,5 \cdot 10^{19}$	10^{16}	$1,5 \cdot 10^{15}$
Собственное удельное сопротивление*,	0.68	2.10^{3}	4.10 ⁶
Ом·м	0,08	2.10	4.10
Коэффициент диффузии*, м ² /с:			
– электронов;	$9,9.10^{-3}$	$1,3\cdot10^{-3}$	$29 \cdot 10^{-3}$
— дырок	$4,7.10^{-3}$	$1,3.10^{-3}$	$1,2.10^{-3}$

Параметры полупроводниковых материалов

* При *T* = 300 К.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилов, И. А. Общая электротехника с основами электроники : учеб. пособие для студентов неэлектротехн. специальностей сред. спец. учеб. заведений / И. А. Данилов, П. М. Иванов. – М. : Высш. шк., 2000. – 752 с. – ISBN 5-06-003737-1.

2. Щука, А. А. Электроника : учеб. пособие / А. А. Щука ; под ред. А. С. Сигова. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 799 с. – ISBN 5-94157-461-4.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Тема 1. ЗОННАЯ СТРУКТУРА ПОЛУПРОВОДНИКОВ	4
Тема 2. НОСИТЕЛИ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ, ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ	14
Тема 3. БАРЬЕРЫ, КОНТАКТЫ И ПЕРЕХОДЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ	18
Тема 4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ВАРИКАПЫ	30
Тема 5. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ	36
ПРИЛОЖЕНИЕ	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	48

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ "ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА"

Составитель КАЛИНИН Евгений Авенирович

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор М.Ф. Руфицкий

Подписано в печать 30.03.07. Формат 60х84/16. Усл. печ. л. 2,56. Тираж 100 экз. Заказ Издательство Владимирского государственного университета. 600000, Владимир, ул. Горького, 87.