

**Н.В. Бурбаева
Т.С. Днепровская**

**СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ
ЭЛЕКТРОНИКЕ**

*Допущено Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению подготовки
дипломированных специалистов
“Информатика и вычислительная техника”*



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ
2004

УДК 621.382

ББК 32.852

Б 91

Бурбаева Н. В., Днепровская Т. С. **Сборник задач по полупроводниковой электронике.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 168 с. — ISBN 5-9221-0402-0.

Настоящее учебное пособие представляет собой сборник задач по курсу «Основы полупроводниковой электроники», читаемому в технических университетах и ВУЗах. Сборник разделен на 6 глав: физические основы работы р-п-перехода, биполярные транзисторы и усилители, транзисторные ключи, операционные усилители, логические элементы, полупроводниковые генераторы. В начале каждой главы даётся краткий теоретический материал по соответствующей теме и разбираются типичные задачи. В конце каждой главы приведены ответы для всех задач. В приложениях даны характеристики наиболее часто применяемых транзисторов и проведены трудоёмкие математические расчеты.

Задачник рассчитан на студентов, обучающихся по соответствующим специальностям, и может быть полезен преподавателям при подготовке к занятиям.

ISBN 5-9221-0402-0

© ФИЗМАТЛИТ, 2004

© Н. В. Бурбаева, Т. С. Днепровская,
2004, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Свойства $p-n$ перехода. Полупроводниковые диоды	6
§ 1.1. Основные свойства $p-n$ перехода	6
§ 1.2. Полупроводниковые диоды	16
§ 1.3. Стабилитроны	24
Глава 2. Биполярные транзисторы и усилители на их основе	29
§ 2.1. Точка покоя биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (режим класса А)	30
§ 2.2. Расчет резисторного усилителя переменного тока	35
§ 2.3. Расчет трансформаторного усилителя	46
§ 2.4. Двухтактный эмиттерный повторитель	49
Глава 3. Транзисторный ключ на биполярном транзисторе и статический триггер на его основе	57
§ 3.1. Транзисторный ключ на биполярном транзисторе	57
§ 3.2. Статический триггер на биполярных транзисторах	62
Глава 4. Применение операционного усилителя (ОУ) для выполнения математических операций	68
§ 4.1. Суммирование при подаче сигналов на инвертирующий вход при заземленном неинвертирующем входе (инвертирующая схема)	69
§ 4.2. Суммирование при подаче сигналов на неинвертирующий вход при заземленном инвертирующем входе (неинвертирующая схема)	70
§ 4.3. Суммирование при подаче сигналов на оба входа ОУ	72
§ 4.4. Интегрирование сигналов с помощью операционных усилителей	77

Глава 5. Логические элементы	86
§ 5.1. Транзисторно–транзисторная логика (ТТЛ)	86
§ 5.2. Транзисторно–транзисторная логика с диодами Шоттки (ТТЛШ)	91
§ 5.3. Логические элементы на комплементарных транзисторах с изолированным затвором (КМДП или КМОП)	92
§ 5.4. Логические элементы ТТЛ. Задачи	93
§ 5.5. Логические элементы на КМОП-транзисторах	111
Глава 6. Генераторы	119
§ 6.1. Блокинг-генератор	119
§ 6.2. Генераторы на операционных усилителях	128
§ 6.3. Генераторы на логических элементах	142
Приложение I	155
Приложение II	161
Список литературы	167

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник задач соответствует курсу «Основы полупроводниковой электроники». Он включает задачи по физике полупроводников и по основам полупроводниковой *схемотехники*. Книга разбита на шесть глав, в которых представлены задачи по физическим основам работы *p-n* перехода, полупроводниковым усилителям, генераторам сигналов, транзисторным ключам, аналоговым и цифровым элементам. Не все главы равноценны по объему и количеству задач. В такой широкой и быстро развивающейся области, как полупроводниковая электроника, трудно выделить необходимый круг рассматриваемых вопросов. Авторы исходили из стандартной программы и собственных представлений о важности тех или иных задач.

Задачник рассчитан на лиц, знакомых с общим курсом полупроводниковой электроники или изучающих его. Для облегчения решения задач в начале каждой главы даны краткие теоретические сведения и сводка необходимых формул. Наиболее подробно изложен тот материал, который меньше освещен в литературе. Выводы некоторых формул и характеристики приборов даны в приложениях. Решения типовых и наиболее сложных задач разобраны подробно. Задачи для самостоятельной работы снабжены ответами и, если необходимо, указаниями.

Авторы благодарны профессору А. Э. Юновичу за рецензирование рукописи и ценные замечания и В. Г. Монахову за предоставление материала для гл. 4.

Авторы будут признательны всем читателям за отзывы, пожелания и критические замечания, которые можно направлять в редакцию.

СВОЙСТВА $p-n$ ПЕРЕХОДА. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

§ 1.1. Основные свойства $p-n$ перехода

$p-n$ переход — это контакт двух одинаковых полупроводников с разным типом проводимости. n -область легирована донорной примесью с концентрацией доноров N_D , а p -область — акцепторной примесью с концентрацией акцепторов N_A . В равновесии высота потенциального барьера между p - и n - областями определяется формулой [1]

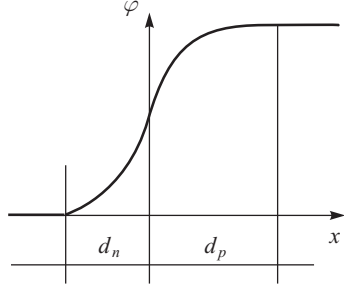
$$\varphi_K = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n p_p}{n_i^2}. \quad (1.1)$$

Здесь n_n и p_p — концентрации основных носителей соответственно в n - и p - областях,

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right) \quad (1.2)$$

— собственная концентрация носителей в данном материале, k — постоянная Больцмана, T — температура, e — заряд электрона, ΔW — ширина запрещенной зоны полупроводника. При комнатной температуре в кремнии,

германии и арсениде галлия вся примесь ионизована, а концентрация собственных носителей пренебрежимо мала, поэтому концентрация основных носителей равна концентрации примесей: $n_n = N_D$; $p_p = N_A$. Ширина $p-n$ перехода в равновесии, т.е. при отсутствии внешнего напряжения, равна



$$d = d_n + d_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e} \varphi_K \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}, \quad (1.3)$$

Рис. 1.1. Распределение потенциала вблизи $p-n$ перехода

где d_n и d_p — соответственно ширина $p-n$ перехода со стороны n - и p -областей, отсчитываемая от металлургической границы (см. рис. 1.1).

Поскольку внутри $p-n$ перехода общий отрицательный заряд ионизованных акцепторов равен общему положительному заряду ионизованных доноров, то

$$d_n N_D S = d_p N_A S, \quad (1.4)$$

здесь S — площадь поперечного сечения $p-n$ перехода. Отсюда следует

$$\frac{d_n}{d_p} = \frac{N_A}{N_D} = \frac{p_p}{n_n}. \quad (1.5)$$

Напряженность электрического поля в $p-n$ переходе максимальна на металлургической границе и равна

$$E_{\max} = \frac{2\varphi_K}{d}. \quad (1.6)$$

При приложении к $p-n$ переходу внешнего напряжения U высота потенциального барьера изменяется на величину приложенного напряжения: $\varphi(U) = \varphi_K - U$.

Величина барьера уменьшается при положительном (прямом) напряжении U , т. е. когда «+» приложен к p -области, и увеличивается при отрицательном (обратном) напряжении. Соответственно изменяется и ширина $p-n$ перехода. При прямых напряжениях $p-n$ переход сужается:

$$d(U_{\text{пр}} > 0) = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e}(\varphi_K - U_{\text{пр}}) \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}, \quad (1.7a)$$

а при обратных напряжениях — расширяется:

$$d(U_{\text{обр}} < 0) = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e}(\varphi_K + |U_{\text{обр}}|) \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}. \quad (1.7b)$$

Вольт-амперная характеристика $p-n$ перехода выражает зависимость между током I (или плотностью тока j) через $p-n$ переход и приложенным напряжением U [1]:

$$j = \left(\frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p p_n}{L_p} \right) \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) = j_s \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \quad (1.8)$$

Здесь j_s — плотность обратного тока насыщения, D_n и D_p — коэффициенты диффузии, соответственно, электронов и дырок, L_n и L_p — соответствующие диффузионные длины, n_p , p_n — концентрации неосновных носителей. Для невырожденных полупроводников

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (1.9a)$$

— концентрация электронов в p -области;

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (1.9b)$$

— концентрация дырок в n -области.

Формула (1.8) выводится в предположении, что все внешнее напряжение U приложено только к области $p-n$ перехода. Проводимость квазинейтральной p -области

$$\sigma_p = ep_p\mu_p, \quad (1.10)$$

и квазинейтральной n -области

$$\sigma_n = en_n\mu_n \quad (1.11)$$

намного больше проводимости обедненной области $p-n$ перехода. Поэтому падение напряжения на квазинейтральных областях пренебрежимо мало. В формулах (1.10) и (1.11) μ_p и μ_n — подвижности дырок и электронов соответственно.

$p-n$ переход служит основой полупроводниковых диодов — приборов, обладающих односторонней проводимостью тока.

ЗАДАЧИ

Задача 1.1.1. Определить:

- 1) контактную разность потенциалов φ_K ,
- 2) ширину $p-n$ перехода со стороны n - и p - областей d_n и d_p , а также полную ширину перехода $d = d_n + d_p$,
- 3) максимальную величину напряженности контактного поля E_m . Известны проводимости в n - и p - областях $\sigma_n = 8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и $\sigma_p = 2,4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, а также подвижности электронов и дырок $\mu_n = 500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\mu_p = 300 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Как изменится высота потенциального барьера φ , если к $p-n$ переходу приложить внешнее напряжение: а) $U_1 = +0,5 \text{ В}$? б) $U_2 = -5 \text{ В}$?

Собственная концентрация примесей в кремнии $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$; $\varepsilon = 12$; заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$; постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$; температура $T = 300 \text{ К}$.

Решение. Определим сначала концентрации основных носителей тока в n - и p - областях, воспользовавшись выражениями для электронной и дырочной проводимостей

$$\sigma_n = e \cdot n_n \mu_n,$$

$$\sigma_p = e \cdot p_p \mu_p.$$

Отсюда получим

$$n_n = \frac{\sigma_n}{e \mu_n} = \frac{8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 500} = 10^{17} \text{ см}^{-3},$$

$$p_p = \frac{\sigma_p}{e \mu_p} = \frac{2,4}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 300} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Высота потенциального барьера при отсутствии внешнего напряжения φ_K определяется по формуле (1.1):

$$\varphi_K = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n p_p}{n_i^2} = 0,026 \ln \frac{10^{17} \cdot 5 \cdot 10^{16}}{(1,4 \cdot 10^{10})^2} = 0,803 \text{ В}.$$

Ширину $p-n$ перехода можно определить, воспользовавшись выражением (1.3):

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e} \varphi_K \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)} = \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,6 \cdot 10^{-19}} 0,803 \frac{1,5 \cdot 10^{17}}{5 \cdot 10^{33}}} = 0,179 \text{ мкм}. \end{aligned}$$

Из формулы (1.4) следует

$$\frac{d_n}{d_p} = \frac{N_A}{N_D} = \frac{p_p}{n_n} = \frac{5 \cdot 10^{16}}{10^{17}} = 0,5.$$

Воспользовавшись равенством $d = d_n + d_p$, получим

$$d_p = \frac{d}{1 + d_n/d_p} = \frac{0,179 \text{ мкм}}{1 + 0,5} \approx 0,119 \text{ мкм.}$$

Далее, $d_n = d - d_p = 0,179 - 0,119 = 0,06 \text{ мкм.}$

Максимальная напряженность электрического поля равна (1.6)

$$E_M = \frac{2\varphi_K}{d} = \frac{2 \cdot 0,803 \text{ В}}{0,179 \cdot 10^{-4} \text{ см}} = 89720 \text{ В/см.}$$

Если к $p-n$ переходу приложено прямое напряжение $U_1 = 0,5 \text{ В}$, то потенциальный барьер уменьшится на $0,5 \text{ В}$: $\varphi = \varphi_K - U_1 = 0,803 - 0,5 = 0,303 \text{ В.}$

Если к $p-n$ переходу приложено обратное напряжение $U_2 = -5 \text{ В}$, то потенциальный барьер увеличится на 5 В : $\varphi = \varphi_K - U_1 = 0,803 + 5 = 5,803 \text{ В.}$

О т в е т: $\varphi_K = 0,803 \text{ В}$; $d = 0,179 \text{ мкм}$; $d_p = 0,119 \text{ мкм}$; $d_n = 0,06 \text{ мкм}$; $E_M = 89720 \text{ В/см}$; $\varphi_1 = 0,303 \text{ В}$; $\varphi_2 = 5,803 \text{ В.}$

З а д а ч а 1.1.2. Определить:

1) контактную разность потенциалов φ_K $p-n$ перехода кремниевого диода,

2) ширину $p-n$ перехода со стороны n - и p - областей d_n и d_p , а также полную ширину перехода $d = d_n + d_p$,

3) максимальную величину напряженности контактного поля E_M .

Известны величины: $\sigma_n = 3,2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и $\sigma_p = 4,8 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; $\mu_n = 800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\mu_p = 250 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $T = 300 \text{ К}$. Как изменится высота потенциального барьера φ , если к $p-n$ переходу приложить внешнее напряжение: а) $U_1 = +0,3 \text{ В}$? б) $U_2 = -2 \text{ В}$?

З а д а ч а 1.1.3. Определить:

1) контактную разность потенциалов φ_K $p-n$ перехода кремниевого диода,

2) ширину $p-n$ перехода со стороны n - и p - областей — d_n и d_p , а также полную ширину перехода $d = d_n + d_p$,

3) максимальную величину напряженности контактного поля E_M .

Известны величины: $\sigma_n = 3,2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и $\sigma_p = 0,64 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; $\mu_n = 800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $\mu_p = 400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; $T = 300 \text{ К}$. Как изменится высота потенциального барьера φ , если к $p-n$ переходу приложить внешнее напряжение: а) $U_1 = +0,4 \text{ В}$? б) $U_2 = -4 \text{ В}$?

Задача 1.1.4. Определить:

1) контактную разность потенциалов φ_K $p-n$ перехода кремниевого диода,

2) ширину $p-n$ перехода со стороны n - и p - областей d_n и d_p , а также полную ширину перехода $d = d_n + d_p$,

3) максимальную величину напряженности контактного поля E_M .

Известны величины: $\sigma_n = 1,6 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ и $\sigma_p = 2,4 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$; $\mu_n = 1000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; $\mu_p = 300 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; $T = 300 \text{ К}$. Как изменится высота потенциального барьера φ , если к $p-n$ переходу приложить внешнее напряжение: а) $U_1 = +0,1 \text{ В}$? б) $U_2 = -1,5 \text{ В}$?

Задача 1.1.5. Определить:

1) контактную разность потенциалов φ_K $p-n$ перехода кремниевого диода,

2) ширину $p-n$ перехода со стороны n - и p - областей d_n и d_p , а также полную ширину перехода $d = d_n + d_p$,

3) максимальную величину напряженности контактного поля E_M .

Известны величины: $\sigma_n = 8 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ и $\sigma_p = 0,008 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$; $\mu_n = 500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; $\mu_p = 500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; $T = 300 \text{ К}$. Как изменится высота потенциального барьера φ , если к $p-n$ переходу приложить внешнее напряжение: а) $U_1 = +0,3 \text{ В}$? б) $U_2 = -3 \text{ В}$?

Задача 1.1.6. Определить:

1) контактную разность потенциалов φ_K $p-n$ перехода кремниевого диода,

2) ширину $p-n$ перехода со стороны n - и p - областей d_n и d_p , а также полную ширину перехода $d = d_n + d_p$,

3) максимальную величину напряженности контактного поля E_M .

Известны величины: $\sigma_n = 0,024 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ и $\sigma_p = 4,8 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$; $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; $\mu_p = 250 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; $T = 300 \text{ К}$. Как изменится высота потенциального барьера φ , если к $p-n$ переходу приложить внешнее напряжение: а) $U_1 = +0,6 \text{ В}$? б) $U_2 = -7 \text{ В}$?

Задача 1.1.7. Определить плотность тока насыщения j_s в идеальном кремниевом переходе, если $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$; $D_n = 40 \text{ см}^2/\text{с}$; $D_p = 15 \text{ см}^2/\text{с}$; $L_n = 100 \text{ мкм}$; $L_p = 60 \text{ мкм}$; $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Решение. Определим сначала концентрации неосновных носителей в n - и p - областях:

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{1,4^2 \cdot 10^{20}}{10^{15}} = 1,96 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3},$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{1,4^2 \cdot 10^{20}}{10^{17}} = 1,96 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}.$$

Плотность тока j_s определяется согласно формуле (1.8):

$$j_s = 1,6 \cdot 10^{-19} \left(\frac{15 \cdot 1,96 \cdot 10^5}{6 \cdot 10^{-3}} + \frac{40 \cdot 1,96 \cdot 10^3}{10^{-2}} \right) \frac{A}{\text{см}^2} = 7,96 \cdot 10^{-11} A / \text{см}^2.$$

Ответ: $j_s = 7,96 \cdot 10^{-11} A / \text{см}^2$.

Задача 1.1.8. Определить плотность тока насыщения j_s в идеальном германиевом $p-n$ переходе, если $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $D_n = 100 \text{ см}^2/\text{с}$; $D_p = 50 \text{ см}^2/\text{с}$; $L_n = 300 \text{ мкм}$; $L_p = 200 \text{ мкм}$; $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Задача 1.1.9. Два диода с идеальными $p-n$ переходами имеют одинаковую геометрию и сделаны из одного материала. Но в первом диоде концентрации примесей N_A и N_D в 10 раз меньше, чем во втором диоде. Определить отношение плотностей токов j_1/j_2 при одинаковом внешнем напряжении U . Предположить, что коэффициенты диффузии носителей D_n и D_p , а также диффузионные длины L_n и L_p одинаковы для обоих диодов.

Решение. Перепишем формулу (1.8), подставив в нее n_p и p_n из формул (1.9а) и (1.9б). Тогда

$$j = en_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \quad (1.12)$$

Отсюда

$$j_1 = en_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_{A1}} + \frac{D_p}{L_p N_{D1}} \right) \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (1.13)$$

$$j_2 = en_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_{A2}} + \frac{D_p}{L_p N_{D2}} \right) \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \quad (1.14)$$

Из (1.13) и (1.14) имеем:

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{\left(\frac{D_n}{L_n N_{A1}} + \frac{D_p}{L_p N_{D1}} \right)}{\left(\frac{D_n}{L_n \cdot 10 \cdot N_{A1}} + \frac{D_p}{L_p \cdot 10 \cdot N_{D1}} \right)} = 10.$$

Ответ: $j_1/j_2 = 10$.

Задача 1.1.10. Концентрация доноров в n -области диода с идеальным $p-n$ переходом равна концентрации акцепторов в p -области. Как изменится плотность тока через такой переход, если концентрацию доноров увеличить в 5 раз? Принять, что отношения $D_n/D_p = 3$, $L_n/L_p = 1,5$ не изменились при изменении уровня легирования.

Задача 1.1.11. Плотность тока через идеальный $p-n$ переход при некотором внешнем напряжении U равна $j_1 = 0,2 A/\text{см}^2$. Известно, что концентрация акцепторов в p -области в 10 раз больше, чем концентрация

доноров в n -области. Найти плотность тока j_2 через аналогичный переход, но с меньшей в 2 раза концентрацией акцепторов, если внешнее напряжение осталось равным U . Принять, что отношения $D_n/D_p = 2$, $L_n/L_p = 1,2$ не изменились при изменении уровня легирования.

Задача 1.1.12. В полупроводниковом идеальном диоде $D_n \approx D_p$, $L_n \approx L_p$, $N_A = 20N_D$. Определить соотношение между дырочной и электронной компонентами тока через $p-n$ переход, то есть отношение j_p/j_n .

Решение. Воспользуемся формулой (1.12). Общая плотность тока есть сумма электронной и дырочной компонент: $j = j_n + j_p$, причем

$$j_n = en_i^2 \frac{D_n}{L_n N_A} \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (1.15)$$

$$j_p = en_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D} \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \quad (1.16)$$

Учитывая равенство коэффициентов диффузии и диффузионных длин, имеем

$$\frac{j_p}{j_n} = \frac{N_A}{N_D} = 20.$$

Ответ: $j_p/j_n = 20$.

Задача 1.1.13. В полупроводниковом диоде коэффициент диффузии электронов вдвое больше коэффициента диффузии дырок. Время жизни электронов вдвое меньше времени жизни дырок. Концентрация доноров в n -области в 10 раз меньше концентрации акцепторов в p -области. Определить соотношение между дырочной и электронной компонентами плотностей тока через $p-n$ переход.

Решение. Дырочная и электронная компоненты плотностей тока через переход определяются согласно формулам (1.15) и (1.16).

Учтем, что диффузионная длина носителей связана с коэффициентом диффузии и временем жизни формулой

$$L = \sqrt{D\tau}. \quad (1.17)$$

Согласно (1.17) $L_p = \sqrt{D_p\tau_p}$, а условия задачи позволяют выразить L_n через L_p :

$$L_n = \sqrt{D_n\tau_n} = \sqrt{2D_p \frac{\tau_p}{2}} = L_p.$$

Учитывая равенство диффузионных длин, получим согласно (1.15) и (1.16)

$$j_n = en_i^2 \frac{2D_p}{L_p N_A} \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right),$$

$$j_p = en_i^2 \frac{10D_p}{L_p N_A} \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right).$$

Искомое соотношение

$$\frac{j_p}{j_n} = \frac{10}{2} = 5.$$

Ответ: $j_p/j_n = 5$.

Задача 1.1.14. В полупроводниковом диоде коэффициент диффузии электронов в 4 раза больше коэффициента диффузии дырок. Времена жизни электронов и дырок равны. Концентрация акцепторов в p -области в 5 раз больше концентрации доноров в n -области. Определить отношение j_p/j_n .

Задача 1.1.15. В полупроводниковом диоде коэффициент диффузии электронов в 2 раза больше коэффициента диффузии дырок. Времена жизни электронов в 8 раз больше времени жизни дырок. Концентрация доноров в n -области в 10 раз больше концентрации акцепторов в p -области. Определить отношение j_p/j_n .

Задача 1.1.16. Два диода с идеальными $p-n$ переходами имеют одинаковую геометрию и сделаны из одного материала. Времена жизни электронов и дырок в каждом диоде одинаковы: $\tau_{n1} = \tau_{p1} = \tau_1$; $\tau_{n2} = \tau_{p2} = \tau_2$. В первом диоде время жизни (τ_1) в 4 раза меньше, чем во втором (τ_2). Концентрации примесей N_A и N_D в первом диоде в 10 раз больше, чем во втором. Определить отношение плотностей токов j_1/j_2 при одинаковом напряжении.

Решение. Воспользуемся формулой (1.12). Если диоды сделаны из одного материала, то приближенно можно считать, что коэффициенты диффузии носителей в них одинаковые. Однако из-за разных времен жизни диффузионные длины носителей $L = \sqrt{D\tau}$ в первом диоде в 2 раза меньше, чем во втором. Отсюда, с учетом разницы в концентрациях

$$j_1 = en_i^2 \left(\frac{D_n}{L_{n1}N_{A1}} + \frac{D_p}{L_{p1}N_{D1}} \right) \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right),$$

$$\begin{aligned} j_2 &= en_i^2 \left(\frac{D_n}{L_{n2}N_{A2}} + \frac{D_p}{L_{p2}N_{D2}} \right) \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) = \\ &= en_i^2 \left(\frac{D_n}{20L_{n1}N_{A1}} + \frac{D_p}{20L_{p1}N_{D1}} \right) \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right). \end{aligned}$$

Окончательно получим

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{1}{20} = 0,05.$$

Ответ: $j_1/j_2 = 0,05$.

Задача 1.1.17. Два диода с идеальными $p-n$ переходами имеют одинаковую геометрию и сделаны из одного материала. Диффузионные длины носителей в первом диоде в 2 раза больше, чем во втором; коэффициенты диффузии в обоих диодах одинаковые. Определить отношение обратных

токов j_{s1}/j_{s2} , если концентрация примесей в первом диоде в 4 раза меньше, чем во втором.

Задача 1.1.18. Определить, как изменится плотность обратного тока j_s через идеальный кремниевый $p-n$ переход при уменьшении температуры от $T_1 = 300$ К до $T_2 = 250$ К. Ширина запрещенной зоны кремния при 300 К $\Delta W = 1,12$ эВ. При изменении температуры ширина запрещенной зоны кремния изменяется по закону $\Delta W(T) = \Delta W(300 \text{ К}) - \alpha(T - 300 \text{ К})$, где $\alpha = 2,84 \cdot 10^{-4}$ эВ/К.

Решение. Подставим в формулу (1.12) выражение (1.2) для собственной концентрации n_i . Получим:

$$j = eN_C N_V \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right), \quad (1.18)$$

плотность обратного тока j_s равна

$$j_s = eN_C N_V \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right).$$

Параметры N_C , N_V , D_n , D_p , L_n и L_p слабо зависят от температуры. Поэтому основная температурная зависимость обратного тока определяется экспоненциальным множителем $\exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right)$. При $T_1 = 300$ К этот множитель равен $\exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{1,12 \text{ эВ}}{0,026 \text{ эВ}}\right) = 1,96 \cdot 10^{-19}$.

При $T_2 = 250$ К ширина запрещенной зоны

$$\Delta W(T_2) = \Delta W(T_1) + \alpha \cdot 50 \text{ К} = 1,1342 \text{ эВ},$$

а тепловая энергия $kT = 0,0216$ эВ.

Отсюда $\exp\left(-\frac{\Delta W(T_2)}{kT_2}\right) = 1,84 \cdot 10^{-23}$. Отношение обратных токов в основном определяется отношением этих экспонент, то есть

$$\frac{j_1}{j_2} \approx \frac{1,96 \cdot 10^{-19}}{1,84 \cdot 10^{-23}} \approx 10^4.$$

Ответ: $j_1/j_2 \approx 10^4$.

Задача 1.1.19. Определить, как изменится плотность обратного тока j_s через идеальный $p-n$ переход из арсенида галлия при уменьшении температуры с $T_1 = 300$ К до $T_2 = 250$ К. Ширина запрещенной зоны GaAs меняется по закону $\Delta W(T) = \Delta W(300 \text{ К}) - \alpha(T - 300 \text{ К})$, где $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$ эВ/К, $\Delta W(300 \text{ К}) = 1,42$ эВ.

Задача 1.1.20. Определить, как изменится плотность обратного тока j_s через идеальный германиевый $p-n$ переход при увеличении температуры с $T_1 = 300$ К до $T_2 = 350$ К. Ширина запрещенной зоны германия при $T = 300$ К $\Delta W = 0,665$ эВ. При изменении температуры ширина запрещенной зоны германия изменяется по закону $\Delta W(T) = \Delta W(300 \text{ К}) - \alpha(T - 300 \text{ К})$, где $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-4}$ эВ/К.

Задача 1.1.21. Ширина запрещенной зоны полупроводника PbSe равна 0,26 эВ при 300 К и изменяется с температурой по закону $\Delta(T) = \Delta W(300 \text{ К}) + 4 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}(T - 300) \text{ К}$. Определить, как изменится плотность тока через $p-n$ переход, сделанный из этого материала, если температура увеличивается с 300 К до 350 К. Считать, что остальные параметры не зависят от температуры, а напряжение на $p-n$ переходе равно 0,1 В.

Решение. Для решения задачи воспользуемся формулой (1.18). Поскольку по условию задачи параметры полупроводника не меняются с температурой, то зависимость плотности тока от температуры для прямого напряжения определяется выражением

$$j \propto \exp\left(-\frac{\Delta W - eU}{kT}\right). \quad (1.19)$$

Тогда для $T_1 = 300 \text{ К}$:

$$j_1 \propto \exp\left(-\frac{0,26 - 0,1}{0,026}\right) = 2,1 \cdot 10^{-3},$$

а для $T_2 = 350 \text{ К}$

$$j_2 \propto \exp\left(-\frac{0,28 - 0,1}{0,03}\right) = 2,48 \cdot 10^{-3}.$$

Отсюда $\frac{j_2}{j_1} = 1,18$.

Ответ: плотность тока увеличится в 1,18 раза.

Задача 1.1.22. Ширина запрещенной зоны полупроводника равна 0,62 эВ и не меняется с температурой. Определить, как изменится плотность тока через $p-n$ переход, сделанный из этого материала, если температура изменяется с $T_1 = 300 \text{ К}$ до $T_2 = 250 \text{ К}$? Считать, что параметры полупроводника не зависят от температуры, а напряжение на $p-n$ переходе равно 0,36 В.

Задача 1.1.23. Как изменится плотность тока через германиевый идеальный $p-n$ переход при изменении температуры от $T_1 = 300 \text{ К}$ до $T_2 = 350 \text{ К}$, если напряжение на $p-n$ переходе равно 0,4 В?

Ширина запрещенной зоны германия равна 0,665 эВ при 300 К и изменяется с температурой по закону $\Delta W(T) = \Delta W(300 \text{ К}) - \beta(T - 300 \text{ К})$, где $\beta = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$. Температурным изменением остальных параметров полупроводника пренебречь.

Задача 1.1.24. Два $p-n$ перехода имеют одинаковые концентрации примесей, но сделаны из разных материалов. Коэффициенты диффузии

и времена жизни носителей в обоих материалах примерно одинаковы. Ширина запрещенной зоны первого материала $\Delta W_1 = 1,0$ эВ, ширина запрещенной зоны второго $\Delta W_2 = 0,75$ эВ. Оценить отношение плотностей обратных токов j_{s1}/j_{s2} при комнатной температуре.

Решение. Для решения задачи используем формулу (1.18). Как следует из этого выражения, основная зависимость плотности тока от материала определяется величиной ширины запрещенной зоны ΔW , т. к. она стоит в экспоненте. Поэтому для оценки отношения плотностей токов достаточно вычислить отношение экспоненциальных множителей:

$$\frac{j_{s1}}{j_{s2}} \approx \frac{\exp\left(-\frac{\Delta W_1}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{\Delta W_2}{kT}\right)} = \frac{1,98 \cdot 10^{-17}}{2,97 \cdot 10^{-13}} = 6,66 \cdot 10^{-5}.$$

Ответ: $j_{s1}/j_{s2} = 6,66 \cdot 10^{-5}$.

Задача 1.1.25. Два $p-n$ перехода имеют одинаковые концентрации примесей, но сделаны из разного материала. Коэффициенты диффузии и времена жизни носителей в обоих материалах примерно одинаковые. Ширина запрещенной зоны первого материала $\Delta W_1 = 1,2$ эВ, второго — $\Delta W_2 = 0,67$ эВ. Оценить отношение плотностей токов при комнатной температуре и внешнем напряжении $U = 0,4$ В.

§ 1.2. Полупроводниковые диоды

Основой полупроводниковых диодов служит $p-n$ переход. Поэтому свойства диода и его вольт-амперная характеристика отражают особенности прохождения тока через $p-n$ переход.

Выражение (1.8) описывает вольт-амперную характеристику идеально го $p-n$ перехода. Вольт-амперные характеристики реальных кремниевых диодов отличаются от характеристики идеального перехода. Типичная ВАХ кремниевого диода представлена на рис. 1.2.

Характерная особенность ВАХ реальных диодов — отсутствие на рисунках токов через диод при отрицательных и малых положительных напряжениях, т. е. при $U < U_{\text{пор}}$ (см. рис. 1.2). Обратные токи в этих диодах малы, поэтому в инженерных расчетах их полагают равными нулю; заметный ток появляется только при $U > U_{\text{пор}}$. Область напряжений $0 < U < U_{\text{пор}}$ называется зоной умолчания. Иногда при анализе кремниевых интегральных схем ВАХ диода изображают в виде ступеньки (рис. 1.3), то есть представляют диод в виде идеального ключа.

К основным параметрам диода относятся сопротивление диода постоянному току R_n и дифференциальное сопротивление $R_{\text{диф}}$. Величина R_n определяется как отношение постоянного напряжения на диоде к току через него. Дифференциальное сопротивление характеризует наклон к оси абсцисс вольт-амперной характеристики при данном напряжении на диоде: