



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
"Московский технологический университет"

**МИРЭА**

---

---

Филиал МИРЭА в г. Фрязино

Кафедра №137 «Электроника и микроэлектроника»

**ПРИНЯТО**  
на заседании кафедры №137  
(протокол № 3  
От «19» ноября 2015 г.)

**УТВЕРЖДАЮ**  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

---

**Д.А. КОВТУНОВ**

**ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Методические рекомендации для проведения практических занятий  
для студентов направления подготовки 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника»

## Практическое задание 1 к Лекции № 2. ОСНОВЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ.

### 1. Основные формулы

Закон Ома в дифференциальной форме имеет вид:

$$j = \sigma E, \quad (1.1)$$

где  $j$  – плотность тока;

$E$  – напряженность электрического поля;

$\sigma$  – удельная электропроводность материала.

В свою очередь можно записать:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = en\mu, \quad (1.2)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала;

$n$  – концентрация носителей заряда;

$\mu$  – подвижность носителей заряда.  $\mu = \frac{v_{др}}{\varepsilon}$ , где  $v_{др}$  – дрейфовая скорость

электронов проводимости  $\varepsilon$  – напряженность электрического поля.

Вероятность состояния электронов подчиняется функции Ферми-Дирака:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}, \quad (1.3)$$

В случае больших энергий  $\frac{E - E_F}{kT} \gg 1$  распределение электронов по состояниям с различной энергией переходит в классическую функцию распределения Максвелла-Больцмана:

$$f_{M-B}(E) = e^{-\frac{E - E_F}{kT}} = e^{-\frac{E_F}{kT}} \cdot e^{-\frac{E}{kT}}. \quad (1.4)$$

Температура вырождения электронного газа:

$$T_B = \frac{E_F}{k} = \frac{\hbar^2}{2mk} \left( \frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3} \quad (1.5)$$

При  $T < T_B$  электронный газ вырожден, при  $T > T_B$  – невырожден.

$E_F(0)$  – уровень Ферми в металле при  $T = 0$

$$E_F(0) = \left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{2/3} \frac{h^2}{2m}. \quad (1.6)$$

Средняя энергия свободных электронов в металле:

$$\bar{E}_0 = \frac{3}{5} E_F(0) = \frac{3h^2}{10m} \left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{2/3} \quad \text{при } T = 0 \text{ К}, \quad (1.7)$$

Максимальная  $v_{\max}$  и среднеквадратичная  $v_{\text{ср.кв}}$  скорости движения свободных электронов в металле при абсолютном нуле:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2E_F(0)}{m^*}}; \quad (1.8)$$

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{2\bar{E}_0}{m^*}}; \quad (1.9)$$

Удельная электрическая проводимость металлов:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{e^2 n \lambda}{m v_F} = \frac{e^2 n \tau}{m^*} \quad (1.10)$$

$\lambda$ ,  $v_F$ ,  $\tau$  - средняя длина свободного пробега, скорость и время релаксации электронов, обладающих энергией, близкой к энергии Ферми, соответственно.

## 2. Примеры решения задач по ФОП

**Пример 1.** Определить температуру, при которой в проводнике вероятность найти электрон с энергией 0,5 эВ над уровнем Ферми равна 2%.

$k = 1.381 \times 10^{-23}$  Дж/ К - постоянная Больцмана

**Решение:** Вероятность состояния электронов подчиняется функции распределения Ферми-Дирака:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1},$$

Подставляем исходные данные в данное выражение:

$$0,02 = \frac{1}{\exp\left(\frac{0,5 \cdot 1,9 \cdot 10^{-19}}{1,32 \cdot 10^{-23} \cdot T}\right) + 1}$$

Проведя необходимые вычисления, получим:

$$T = 1490 \text{ К}.$$

**Пример 2.** Плотность металла  $\gamma = 8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, молярная масса  $M = 63,5$ , валентность – 1. Найти концентрацию электронного газа и энергию Ферми ( $T = 0$ ).

**Решение:** Определим концентрацию носителей заряда:

$$n = \frac{N_a}{V} = \frac{N_a \gamma}{M}$$

Энергия Ферми определим из соотношения (1.6):

$$E_F(0) = \left( \frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3} \frac{h^2}{2m} = \left( \frac{3M}{8\pi N_a \gamma} \right)^{2/3} \frac{h^2}{2m}.$$

Подставляя необходимые данные и проведя расчеты, получим искомые результаты:

$$n = 8,44 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3},$$

$$E_F = 1,13 \cdot 10^{18} \text{ Дж} = 7,06 \text{ эВ}.$$

### 3. Задачи для самостоятельного решения.

1. Каков физический смысл функции распределению Ферми-Дирак?
2. В чем состоит физический смысл энергии Ферми?
3. Какими свойствами обладает газ в состоянии вырождения?
4. Чему равна вероятность  $P$  того, что в состоянии с энергией, равной энергии Ферми  $E_F$ , будет находиться свободный электрон?
5. Почему при образовании твердого тела энергетические уровни атомов расщепляются в энергетические зоны?
6. Чем отличаются зонные структуры металла, полупроводника и диэлектрика?
7. От чего зависит ширина разрешенной зоны и число энергетических уровней в ней?
8. Зависит ли средняя энергия свободных электронов в кристалле от числа атомов, образующих кристалл?
9. Что происходит с энергетическим спектром свободных электронов при увеличении числа  $N$  атомов, образующих кристалл в  $\eta$  раз?
10. Что происходит с интервалом между соседними уровнями энергии свободных электронов в металле при увеличении объема металла в 3 раза?

11. Используя понятие энергетических зон, объясните, почему металлы непрозрачны для видимого света. Длины волн видимого диапазона заключены в пределах  $\lambda = (0,4 - 0,76)$  мкм.
12. Определить вероятность заполнения электронами энергетического уровня в металле, расположенного на  $5 kT$  выше уровня Ферми.
13. Определить температуру, при которой в проводнике вероятность найти электрон с энергией  $E = 0,5$  эВ над уровнем Ферми в металле равна 4%.  
 $k = 1,381 \times 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана
14. При каких условиях квантовомеханическая функция распределению Ферми-Дирак приближается к классической функции распределения частиц по энергии (распределение Больцмана)?
15. Определить, как и во сколько раз изменится вероятность заполнения электронами в металле энергетического уровня, расположенного на 0,1 эВ выше уровня Ферми, если температуру металла повысить с 300 до 1000 К?
16. Какова вероятность заполнения электронами уровней расположенных на  $kT$ ;  $2kT$ ;  $3kT$  выше и ниже уровня Ферми.
17. На каком расстоянии (в единицах  $kT$ ) от уровня Ферми находятся уровни, вероятность заполнения которых 0,1 и 0,9.
18. Найти разницу энергий (в единицах  $kT$ ) между электроном, находящимся на уровне Ферми, и электронами, находящимися на уровнях, вероятность заполнения которых равны 0,2 и 0,8.
19. Кристаллический образец содержит 0,17 моля некоторого химически простого вещества. Ширина разрешенной зоны энергии  $\Delta E = 10$  эВ. Чему равно среднее значение интервала между соседними энергетическими уровнями  $\langle \epsilon \rangle$ ?
20. Энергия Ферми в кристалле серебра оставляет 5,5 эВ. Найти максимальную  $v_{\max}$  и среднеквадратичную  $v_{\text{ср.кв}}$  скорости движения электронов проводимости при температуре вблизи абсолютного нуля. Принять эффективную массу электронов равной массе свободного электрона.
21. Положению уровня Ферми для алюминия при  $T = 0$  К соответствует энергия 11,7 эВ. Определить число свободных электронов, приходящихся на один атом. Эффективную массу электронов проводимости принять равной массе свободного электрона. Плотность алюминия  $\rho = 2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.
22. Энергия Ферми калия (К)  $E_F = 2,7$  эВ, а удельная проводимость  $\sigma = 1,6 \cdot 10^7$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>. Рассчитать с помощью этих данных длину свободного пробе-

га  $\lambda$  электронов проводимости, полагая эффективную массу электронов проводимости равной массе свободного электрона.

23. Рассчитать дрейфовую скорость электронов проводимости в серебре, если его удельное электросопротивление  $\rho = 1,54 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, а концентрация электронов проводимости  $n = 5,8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ , напряженность электрического поля  $\varepsilon$  принять равной 100 В/м.

24. Рассчитать дрейфовую скорость электронов проводимости в серебре, если его удельное электросопротивление  $\rho = 1,54 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, а концентрация электронов проводимости  $n = 5,8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ , напряженность электрического поля  $\varepsilon$  принять равной 100 В/м.

## **Практическое занятие 2 к лекции № 3 ПОЛУПРОВОДНИКИ С СОБСТВЕННОЙ, ЭЛЕКТРОННОЙ И ДЫРОЧНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ**

### **1. Определение параметров полупроводникового материала**

Каждый электрон, входящий в состав атома, обладает определенной энергией или занимает определенный энергетический уровень. В твердом теле, благодаря взаимодействию атомов в кристаллической решетке, энергетические уровни расщепляются и образуют энергетические зоны, состоящие из отдельных близко расположенных по энергии уровней, число которых соответствует числу однородных атомов в данном кристаллическом теле. Энергетические уровни валентных электронов при расщеплении образуют валентную зону. Разрешенные уровни, свободные от электронов в невозбужденном состоянии атома образуют одну или несколько свободных зон, нижнюю из которых называют зоной проводимости. Между разрешенными зонами находятся запрещенные зоны. т.е. области значений энергий, которыми не могут обладать электроны в идеальном кристалле. Формально к полупроводникам относят вещества с шириной запрещенной зоны  $\Delta E \leq 0.05...3$  эВ. В нижеприведенных формулах энергия понимается в смысле ее значения, нормированного к элементарному электрическому заряду. Для отличия энергетических величин от потенциалов размерность энергий принято обозначать «эВ».

1.1. При температурах  $T > 200...250$  К ширина запрещенной зоны изменяется по линейному закону:

$$\Delta E = \beta - \alpha \cdot T, \text{ эВ} \quad (2.1)$$

где  $\beta$  - экстраполированный член, а  $\alpha$  - коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны.  $T$  - абсолютная температура ( $T[\text{K}] = t^\circ\text{C} + 273$ ). Числовые значения этих коэффициентов приведены в таб.1

Таблица 1

Материал	Германий (Ge)	Кремний (Si)	Арсенид галлия (GaAs)
$\beta$ , эВ	0,782	1,205	1,549
$\alpha$ , эВ / К	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$2.84 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$

1.2. Эффективные массы электронов  $m_n$  и дырок  $m_p$  учитывают сложный характер взаимодействия электрона с кристаллической решеткой при его движении под действием силы внешнего электрического поля. Определить их можно, используя данные таблицы 2.

Таблица 2

Материал	Германий (Ge)	Кремний (Si)	Арсенид галлия (GaAs)
$m_n/m_0$	0,55	1,084	0,067
$m_p/m_0$	0,388	0,56	0,48
Масса покоя электрона $m_0$	$9,109 \times 10^{-31}$ кг		

## 2. Определение концентрации носителей заряда в кристаллах.

Приводимость любых твердых тел определяется прежде всего концентрацией носителей заряда. Концентрация носителей заряда должна зависеть от температуры, поскольку с увеличением температуры возрастает тепловая энергия решетки и, следовательно, вероятность того, что какая то часть валентных связей будет нарушена и соответственно возникнут электроны и дырки.

Основные положения модели, которая используется для расчета концентрации носителей заряда в кристаллах, следующие:

- кристалл является квантовой системой, поэтому поведение всех находящихся в нем электронов (и дырок) подчиняется закономерностям квантовой механики, т.е. как локализованные (привязанные к атомам), так и “свободные” (способные перемещаться по кристаллу) электроны находятся в определенных квантовых состояниях, характеризующихся соответствующими энергетическими уровнями;

- в кристалле имеются состоящие из большого количества ( $10^{22}$  эВ<sup>-1</sup>см<sup>-3</sup>) близко расположенных уровней зоны (расстояние между уровнями порядка  $10^{-22}$  эВ);

- на одном энергетическом уровне в соответствии с принципом запрета Паули не может находиться более двух электронов с разным значением спина, т.е. электроны не могут перемещаться по состояниям занятым другими электронами;

- в термодинамическом равновесии электроны распределяются по энергетическим состояниям в соответствии с функцией распределения Ферми - Дирака:

$$f(E, T) = \frac{1}{e^{\frac{E-F}{kT}} + 1}, \quad (2.2), \text{ где } f(E, T) \text{ – вероятность нахождения электрона в состоянии с энергией } E, T \text{ – температура системы (в градусах К), } k \text{ – постоянная Больцмана, } F \text{ – энергия уровня Ферми (это характеристическая энергия системы ниже которой при } T = 0\text{К все состояния заполнены выше пустые);}$$

поскольку энергетические уровни в разрешенных зонах очень близко расположены друг друга можно дискретное распределение состояний по энергиям заменить непрерывным  $N(E)$ .

Концентрация электронов в зоне проводимости будет определяться величиной

$$n(T) = 2 \int_{(E)} f(E, T) N_c(E) dE \quad (2.3), \text{ где } f(E, T) \text{ -}$$

функция вероятности заполнения электроном уровня с энергией  $E$  при температуре  $T$ ;

$N_c$  - эффективная плотность энергетических состояний в зоне проводимости (количество уровней, отнесенных к единице объема).



Цифра 2 в выражении (2.1) отражает тот факт, что на каждом уровне в соответствии с принципом Паули может находиться два электрона.

Интегрирование необходимо провести от дна зоны проводимости  $E_c$  до ее потолка. Учитывая резкую зависимость  $f(E,T)$  от энергии, верхний предел можно положить равным бесконечности, так что

$$n = 2 \int_{E_c}^{\infty} N(E) f(E,T) dE, \quad (2.4)$$

1.3. Эффективные плотности состояний в зоне проводимости  $N_c$  и в валентной зоне  $N_v$  имеют смысл концентраций разрешенных состояний в энергетической полосе  $kT$  у границ соответственно зоны проводимости или валентной зоны и определяются выражениями:

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}; \quad N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2} m^{-3}, \quad (2.5)$$

где  $m_n, m_p$  - эффективная масса электрона и дырки, соответственно;  $m$  - масса электрона ( $m = 9 \cdot 10^{-31}$  кг);  $k, h$  - постоянные Больцмана и Планка соответственно; где  $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана;  $h = 6.6262 \cdot 10^{-34}$  Дж · с - постоянная Планка;  $\pi = 3.14159$ ;  $T$  - температура.

Среднее геометрическое значение эффективных плотностей энергетических состояний в зоне проводимости и валентной зоне  $N$ :

$$N = \sqrt{N_c N_v} = 2 \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} (m_n m_p)^{3/4} m^{-3} \quad (2.6)$$

## 2.1. Определение концентрации носителей заряда в собственных полупроводниках

Свойства полупроводников сильно зависят от концентрации и вида примесей. Полупроводник без примесей или с очень низкой их концентрацией, которая не оказывает существенного влияния на удельную проводимость, называется собственным.

В собственных и слаболегированных примесных полупроводниках электронный (дырочный) газ является невырожденным, распределение электронов по энергиям описывается классической функцией распределения Максвелла-Больцмана:

$$f(E) = \exp(E_F / kT) \cdot \exp(-E / kT). \quad (2.7)$$

Интегрирование выражения (2.3) дают формулы для расчета концентрации свободных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне собственного полупроводника:

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - F}{kT}\right) \quad (2.8)$$

$$p_0 = N_v \exp\left(-\frac{F - E_v}{kT}\right) \quad (2.9)$$

С учетом электронейтральности для концентрации носителей в собственном полупроводнике можно получить следующее выражение:

$$n = p = n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{E_g (\text{эВ}) e (\text{Кл})}{2kT}\right), \quad (2.10)$$

где  $E_g = E_c - E_v$  – ширина запрещенной зоны.

$e = -1.602 \cdot 10^{-19}$  Кл - абсолютное значение заряда электрона.

Экспоненциальный множитель обуславливает резкое увеличение  $n_i$  при возрастании температуры или уменьшении ширины запрещенной зоны.

Закон действующих масс

$$n \cdot p = N_c N_v \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2. \quad (2.11)$$

Закон действующих масс: произведение концентраций электронов и дырок в полупроводнике не зависит от его легирования, а зависит только от температуры; это произведение равно квадрату концентрации носителей в собственном полупроводнике.

## 2.2. Определение концентраций носителей заряда в примесных полупроводниках

Примесные полупроводники кроме основных валентных атомов содержат в кристаллической решетке атомы других элементов с валентностью ниже или выше валентности основных. Например, введение пятивалентных примесей (P, As, Sb) в четырехвалентные Ge и Si, и шестивалентных для соединений GaAs, образует электронный полупроводник - n-типа. Такие примеси называются донорными. Введение трехвалентных примесей (B, Al,

In) в четырехвалентные Ge и Si, и двухвалентных для соединения GaAs, образует дырочный полупроводник р-типа. Такие примеси называются акцепторными.

2.1. Носители зарядов, концентрация которых в данном полупроводнике больше (например, в полупроводнике n-типа - электроны, а в полупроводнике р-типа - дырки) называются основными. Концентрация электронов в электронном полупроводнике  $n_n$  зависит от концентрации донорных примесей:

$$n_n = n_i + N_d, \text{ м}^{-3}$$

концентрация дырок в дырочном полупроводнике  $p_p$  зависит от концентрации акцепторных примесей:

$$p_p = p_i + N_a = n_i + N_a, \text{ м}^{-3}$$

2.2. Концентрации неосновных носителей (дырок в электронном и электронов в дырочном полупроводниках) можно определить по формулам:

$$p_{p0}(T) = \frac{n_i^2(T)}{n_n} \cong \frac{n_i^2(T)}{N_D} \quad n_{p0}(T) = \frac{n_i^2(T)}{p_p} \cong \frac{n_i^2(T)}{N_A}, \text{ м}^{-3} \quad (2.12)$$

В рабочем диапазоне температур практически все атомы примеси оказываются ионизированными, поэтому с учётом того, что на практике концентрации примесей выбираются из условий  $N_d \gg n_i$  и  $N_a \gg p_i$  для концентраций основных носителей зарядов полупроводников n- и р- типов с весьма высокой степенью приближенности соответственно выполняются условия

$$n_n \approx N_d, \text{ м}^{-3} \quad \text{и} \quad p_p \approx N_a.$$

Существует связь между концентрацией основных и неосновных носителей:

$$n_n p_p = n_i^2.$$

### 3. Определение положения уровней Ферми в собственном и примесных полупроводниках.

Уровень Ферми - уровень энергии, которую могут иметь 50% всех носителей, находящихся в полупроводнике.

3.1. Положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости в собственном полупроводнике имеет следующее значение:

$$\mu_i = E_C - E_F = \frac{E_c - E_v}{2} - \frac{\kappa T}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = \frac{E_g}{2} - \frac{3}{4} kT \frac{m_p^*}{m_n^*}; \quad (2.13)$$

Уровень Ферми в собственном полупроводнике находится приблизительно в середине запрещённой зоны и, при условии  $E_c = 0$ , определяется выражением:

$$E_{Fi} = \frac{E_v - E_c}{2} - \frac{3kT}{4 \cdot e} \ln \frac{m_p}{m_n} = \frac{\Delta E_g}{2} - \frac{3kT}{4 \cdot e} \ln \frac{m_p}{m_n} (\text{эВ}) \quad (2.14)$$

3.2. Уровень Ферми в примесном полупроводнике р-типа (рис.2.1 а) определяется выражением:

$$E_{Fp} = \frac{\Delta E_g}{2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{n_i} = \frac{\Delta E_g}{2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a}{n_i} (\text{эВ}) \quad (2.15)$$

3.3. Уровень Ферми в примесном полупроводнике n-типа (рис.2.1 б) определяется выражением:

$$E_{Fn} = \frac{\Delta E_g}{2} - \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_i} = \frac{\Delta E_g}{2} - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_d}{n_i} (\text{эВ}) \quad (2.16)$$

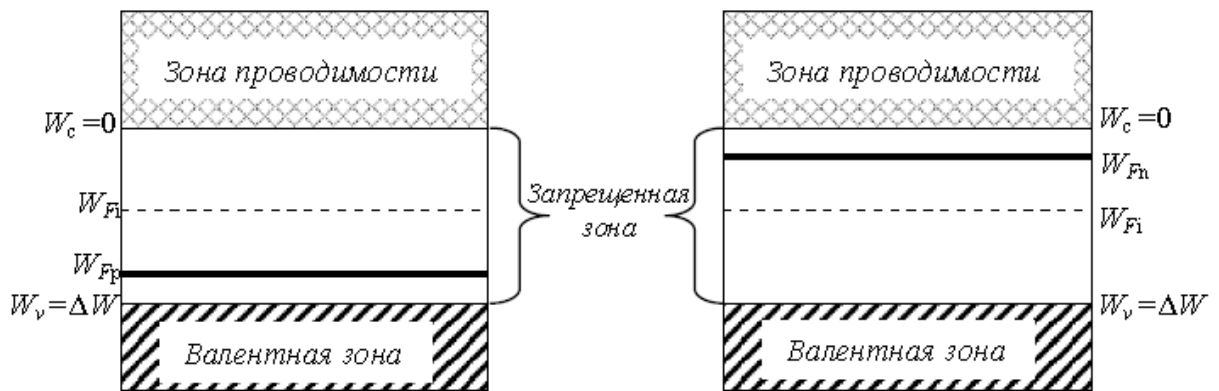


Рисунок 2.1 Энергетическая диаграмма полупроводникового материала р-типа (а) и полупроводникового материала n-типа (б).

#### 4. Примеры решения задач.

**Задача 1.** Определите следующие параметры чистого кремния при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ :

- ширину запрещенной зоны  $\Delta E$ ;
- эффективные массы электронов и дырок  $m_n$  и  $m_p$ ;

- эффективные плотности состояний в зоне проводимости  $N_c$  и в валентной зоне  $N_v$ ,
- равновесные концентрации подвижных носителей зарядов  $n_i = p_i$  в собственном полупроводнике.

### Решение

1.1. Переводим заданное значение температуры в градусы Кельвина

$$T[K] = t^{\circ}C + 273 = 20 + 273 = 293 K$$

1.2. Ширина запрещенной зоны при заданной температуре для Si

$$\Delta W = \beta - \alpha \cdot T = 1,205 - 2,84 \cdot 10^{-4} \cdot 293 = 1,1218 \text{ эВ}$$

где  $\beta$  – экстраполированный член,  $\alpha$  – коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны.

1.3. Эффективная масса электрона

$$m_n = m_0 \cdot 1,084 = 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 1,084 = 9,87 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

Эффективная масса дырки

$$m_p = m_0 \cdot 0,56 = 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 0,56 = 5,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$m_0$  – масса покоя электрона.

1.4. Среднее геометрическое значение эффективных плотностей энергетических состояний в зоне проводимости и валентной зоне  $N$

$$N = \sqrt{N_c N_v} = 2 \left( \frac{2\pi \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_n m_p)^{\frac{3}{4}} =$$

$$2 \left( \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{(6,626 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} (9,87 \cdot 10^{-31} \cdot 5,1 \cdot 10^{-31})^{\frac{3}{4}} =$$

$$2 \cdot (5,7878 \cdot 10^{46})^{3/2} (5,0337 \cdot 10^{-61})^{3/4} = 2 \cdot 1,39 \cdot 10^{70} \cdot 5,976 \cdot 10^{-46} = 1,664 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

1.5. Равновесные концентрации электронов и дырок  $n_i = p_i$  :

$$n_i = p_i = N \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W \cdot e}{2kT}\right) =$$

$$1,664 \cdot 10^{25} \exp\left(\frac{-1,1218 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}\right) = 1,661 \cdot 10^{25} e^{-22,2068} =$$

$$1,664 \cdot 10^{25} \cdot 2,268 \cdot 10^{-10} = 3,774 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

**Задача 2.** Образец кремния легирован атомами акцепторной и донорной примесей с концентрациями  $N_a = 10^{23} 1/\text{м}^3$  и  $N_d = 10^{22} 1/\text{м}^3$ .

При заданной температуре  $t = 20^{\circ}\text{C}$  определить концентрации основных ( $n_n, p_p$ ) и неосновных носителей ( $p_n, n_p$ ) при легировании полупроводникового кристалла донорными или акцепторными примесями

## Решение

2.1. Концентрация основных носителей (электронов) в электронном полупроводнике

$$n_n = n_i + N_D = 3,774 \cdot 10^{15} + 10^{22} = 10^{22} \text{ м}^{-3}$$

2.2. Концентрация неосновных носителей (дырок) в электронном полупроводнике

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(3,774 \cdot 10^{15})^2}{10^{22}} = \frac{1,4243 \cdot 10^{31}}{10^{22}} = 1,424 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$$

2.3. Концентрация основных носителей (дырок) в дырочном полупроводнике

$$p_p = n_i + N_a = 3,774 \cdot 10^{15} + 10^{23} = 10^{23} \text{ м}^{-3}$$

2.4. Концентрация неосновных носителей (электронов) в дырочном полупроводнике

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_a} = \frac{(3,774 \cdot 10^{15})^2}{10^{23}} = \frac{1,4243 \cdot 10^{31}}{10^{23}} = 1,424 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$$

**Задача 3.** Определить положение уровня Ферми в собственном  $F_i$ , электронном  $F_n$  и дырочном  $F_p$  полупроводниках. Построить энергетические (зонные) диаграммы полупроводников в масштабе по оси энергий, принимая за начало отсчета нижний уровень зоны проводимости ( $E_c=0$ ).

## Решение

3.1. Уровень Ферми в собственном полупроводнике находится приблизительно в середине запрещенной зоны и, при условии  $W_c = 0$ , определяется выражением:

$$W_{F_i} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{3kT}{4 \cdot e} \ln \frac{m_p}{m_n} = \frac{1,1218}{2} - \frac{3 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{4 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{51 \cdot 10^{-31}}{9,87 \cdot 10^{-31}} =$$

$$0,5609 - 0,01894 \cdot \ln 0,516717 = 0,5609 + 0,01894 \cdot 0,66 = 0,5609 + 0,0125 = 0,5734 \text{ эВ}$$

3.2. Уровень Ферми в примесном полупроводнике *p*-типа определяется выражением:

$$W_{Fp} = \frac{\Delta W}{2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{n_i} = \frac{1,1218}{2} + \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{23}}{3,774 \cdot 10^{15}} =$$

$$0,5609 + 0,02526 \cdot \ln 2,65 \cdot 10^7 = 0,5609 + 0,02526 \cdot 17,0925 = 0,5609 + 0,43175 =$$

$$= 0,9926 \text{ эВ}$$

3.3. Уровень Ферми в примесном полупроводнике *n*-типа определяется выражением:

$$W_{Fn} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_i} = \frac{1,1218}{2} - \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{22}}{3,774 \cdot 10^{15}} =$$

$$0,5609 - 0,02526 \cdot \ln 2,65 \cdot 10^6 = 0,5609 + 0,02526 \cdot 14,7899 =$$

$$0,5609 - 0,3736 = 0,1873 \text{ эВ}$$

3.4. Энергетические диаграммы приведены на рисунке 2.2.

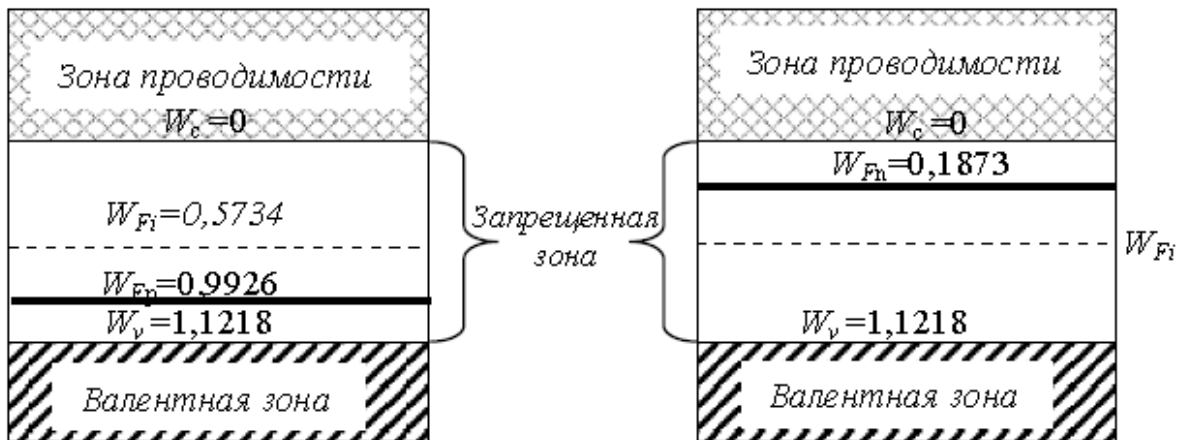


Рисунок 2.2. Энергетические диаграммы полупроводника *p*-типа (а) и *n*-типа (б)

## 5. Вопросы и задачи для самостоятельного решения.

1. Наибольшим (наименьшим) удельным сопротивлением (удельной проводимостью, шириной запрещенной зоны) обладают
  - диэлектрики;
  - полупроводники;
  - проводники.

2. Полупроводник, в котором концентрация дырок (электронов) превышает концентрацию электронов проводимости (дырок), относится к полупроводникам
  - i-типа,
  - n-типа;
  - p-типа.
3. Атомы алюминия (бора, галлия, индия, мышьяка, сурьмы, фосфора) в кристалле кремния или германия образуют:
  - акцепторную примесь;
  - донорную примесь.
4. При ионизации акцепторного (донорного) атома возникает подвижный носитель заряда -
  - акцепторный ион;
  - валентный электрон;
  - дырка;
  - электрон проводимости.
5. С увеличением концентрации акцепторной примеси концентрации дырок и электронов проводимости в полупроводнике изменятся следующим образом.
  - концентрации дырок и электронов проводимости не изменятся;
  - концентрация дырок увеличится, концентрация электронов проводимости не изменится;
  - концентрация дырок увеличится, концентрация электронов проводимости уменьшится;
  - концентрация дырок уменьшится, концентрация электронов проводимости увеличится.
6. На диаграмме энергетических уровней в полупроводнике n-типа [p-типа] примесная энергетическая зона расположена:
  - в запрещённой зоне вблизи верхней границы валентной зоны;
  - в запрещённой зоне вблизи нижней границы зоны проводимости;
  - в середине запрещённой зоны.
7. Больше подвижностью в полупроводнике обладают носители заряда -
  - дырки;
  - электроны проводимости.
8. С увеличением концентрации акцепторной [донорной] примеси [температуры] в полупроводнике уровень Ферми
  - не изменится;



— приблизится к дну зоны проводимости;

— приблизится к потолку валентной зоны.

9. Векторы скорости дрейфа дырок [электронов] и напряжённости электрического поля:

— направлены противоположно;

— сонаправлены.

10. Чем объясняется различие в температурной зависимости электропроводности полупроводников и металлов.

11. Существует ли принципиальное различие между электронами проводимости в полупроводниках (металлах) и свободными электронами.

12. При комнатной температуре средняя энергия тепловых колебаний атомов существенно меньше ширины запрещенной зоны полупроводников. Каким образом электроны из валентной зоны могут переходить в зону проводимости в собственном полупроводнике?

13. В кристалл германия в небольшой пропорции введена сурьма. Является ли кристалл полупроводником n-типа [p-типа]?

14. В кристалл германия в небольшой пропорции введен индий. Является ли кристалл полупроводником n-типа [p-типа]?

15. Каковы свойства полупроводников с компенсированными примесями?

16. [С:\объясните](#) Объясните, какая из дырок обладает большей энергией: в центре валентной зоны или у ее потолка?

17. При каком условии энергетические уровни примеси можно считать дискретными?

18. Ширина запрещенной зоны в кремнии равна 1.1 эВ, а в алмазе 6 эВ. Рассмотрите вопрос о прозрачности этих веществ для видимого света. Длины волн видимого света заключены в диапазоне 0,40-0,76 мкм.

Задание 1. Для заданного полупроводникового материала при заданной температуре, приведенными в таблице 3, решить задачи №№ 1-3 из раздела 4.

Таблица 3.

вар.	Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$N_d, 1/\text{м}^3$	$N_a, 1/\text{м}^3$
01	Si	45	$7 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{22}$
02	Si	30	$7 \times 10^{22}$	$1 \times 10^{19}$
03	Si	20	$3,5 \times 10^{22}$	$2 \times 10^{23}$

04	Si	15	$8 \times 10^{22}$	$2 \times 10^{20}$
05	GaAs	41	$5 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{22}$
06	GaAs	33	$5 \times 10^{20}$	$9 \times 10^{20}$
07	GaAs	23	$9 \times 10^{17}$	$1,5 \times 10^{23}$
08	GaAs	13	$6 \times 10^{22}$	$9 \times 10^{21}$
09	Ge	43	$6 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{22}$
10	Ge	25	$8 \times 10^{23}$	$2 \times 10^{22}$
11	Ge	30	$9 \times 10^{20}$	$3 \times 10^{23}$
12	Ge	15	$6 \times 10^{18}$	$3 \times 10^{20}$

## Практическое занятие 2 к лекции № 3 ПОЛУПРОВОДНИКИ С СОБСТВЕННОЙ, ЭЛЕКТРОННОЙ И ДЫРОЧНОЙ ЭЛЕКТРОПРО- ВОДНОСТЬЮ

### 1. Определение параметров полупроводникового материала

Каждый электрон, входящий в состав атома, обладает определенной энергией или занимает определенный энергетический уровень. В твердом теле, благодаря взаимодействию атомов в кристаллической решетке, энергетические уровни расщепляются и образуют энергетические зоны, состоящие из отдельных близко расположенных по энергии уровней, число которых соответствует числу однородных атомов в данном кристаллическом теле. Энергетические уровни валентных электронов при расщеплении образуют валентную зону. Разрешенные уровни, свободные от электронов в невозбужденном состоянии атома образуют одну или несколько свободных зон, нижнюю из которых называют зоной проводимости. Между разрешенными зонами находятся запрещенные зоны, т.е. области значений энергий, которыми не могут обладать электроны в идеальном кристалле. Формально к полупроводникам относят вещества с шириной запрещенной зоны  $\Delta E \leq 0.05...3$  эВ. В нижеприведенных формулах энергия понимается в смысле ее значения, нормированного к элементарному электрическому заряду. Для отличия энергетических величин от потенциалов размерность энергий принято обозначать «эВ».

1.1. При температурах  $T > 200...250$  К ширина запрещенной зоны изменяется по линейному закону:

$$\Delta E = \beta - \alpha \cdot T, \text{ эВ} \quad (2.1)$$

где  $\beta$  - экстраполированный член, а  $\alpha$  - коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны.  $T$  - абсолютная температура ( $T[\text{K}] = t^{\circ}\text{C} + 273$ ). Числовые значения этих коэффициентов приведены в таб.1

Таблица 1

Материал	Германий (Ge)	Кремний (Si)	Арсенид галлия (GaAs)
$\beta$ , эВ	0,782	1,205	1,549
$\alpha$ , эВ / К	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$2.84 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$

1.2. Эффективные массы электронов  $m_n$  и дырок  $m_p$  учитывают сложный характер взаимодействия электрона с кристаллической решеткой при его движении под действием силы внешнего электрического поля. Определить их можно, используя данные таблицы 2.

Таблица 2

Материал	Германий (Ge)	Кремний (Si)	Арсенид галлия (GaAs)
$m_n/m_0$	0,55	1,084	0,067
$m_p/m_0$	0,388	0,56	0,48
Масса покоя электрона $m_0$	$9,109 \times 10^{-31}$ кг		

## 2. Определение концентрации носителей заряда в кристаллах.

Приводимость любых твердых тел определяется прежде всего концентрацией носителей заряда. *Концентрация носителей заряда* должна зависеть от температуры, поскольку с увеличением температуры возрастает тепловая энергия решетки и, следовательно, вероятность того, что какая то часть валентных связей будет нарушена и соответственно возникнут электроны и дырки.

Основные положения модели, которая используется для расчета концентрации носителей заряда в кристаллах, следующие:

- кристалл является квантовой системой, поэтому поведение всех находящихся в нем электронов (и дырок) подчиняется закономерностям квантовой механики, т.е. как локализованные (привязанные к атомам), так и “свободные” (способные перемещаться по кристаллу) электроны находятся в определенных квантовых состояниях, характеризующихся соответствующими энергетическими уровнями;

- в кристалле имеются состоящие из большого количества ( $10^{22}$  эВ<sup>-1</sup>см<sup>-3</sup>) близко расположенных уровней зоны (расстояние между уровнями порядка  $10^{-22}$  эВ);

- на одном энергетическом уровне в соответствии с принципом запрета Паули не может находиться более двух электронов с разным значением спи-

на, т.е. электроны не могут перемещаться по состояниям занятым другими электронами;

- в термодинамическом равновесии электроны распределяются по энергетическим состояниям в соответствии с функцией распределения Ферми - Дирака:

$$f(E, T) = \frac{1}{e^{\frac{E-F}{kT}} + 1}, \quad (2.2), \text{ где } f(E, T) - \text{вероятность нахождения электрона в состоянии с энергией } E, T - \text{температура системы (в градусах К), } k - \text{постоянная Больцмана, } F - \text{энергия уровня Ферми (это характеристическая энергия системы ниже которой при } T = 0\text{К все состояния заполнены выше пустые);}$$

поскольку энергетические уровни в разрешенных зонах очень близко расположены друг друга можно дискретное распределение состояний по энергиям заменить непрерывным  $N(E)$ .

Концентрация электронов в зоне проводимости будет определяться величиной

$$n(T) = 2 \int_{(E)} f(E, T) N_c(E) dE \quad (2.3), \text{ где } f(E, T) -$$

функция вероятности заполнения электроном уровня с энергией  $E$  при температуре  $T$ ;

$N_c$  - эффективная плотность энергетических состояний в зоне проводимости (количество уровней, отнесенных к единице объема).

Цифра 2 в выражении (2.1) отражает тот факт, что на каждом уровне в соответствии с принципом Паули может находиться два электрона.

Интегрирование необходимо провести от дна зоны проводимости  $E_c$  до ее потолка. Учитывая резкую зависимость  $f(E, T)$  от энергии, верхний предел можно положить равным бесконечности, так что

$$n = 2 \int_{E_c}^{\infty} N(E) f(E, T) dE, \quad (2.4)$$

1.3. Эффективные плотности состояний в зоне проводимости  $N_c$  и в валентной зоне  $N_v$  имеют смысл концентраций разрешенных состояний в энергетической полосе  $kT$  у границ соответственно зоны проводимости или валентной зоны и определяются выражениями:

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}; \quad N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2} m^{-3}, \quad (2.5)$$

где  $m_n, m_p$  - эффективная масса электрона и дырки, соответственно;  $m$  - масса электрона ( $m = 9 \cdot 10^{-31}$  кг);  $k, h$  - постоянные Больцмана и Планка соответственно; где  $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К - постоянная Больцмана;  $h = 6.6262 \cdot 10^{-34}$  Дж · с - постоянная Планка;  $\pi = 3.14159$ ;  $T$  - температура.

Среднее геометрическое значение эффективных плотностей энергетических состояний в зоне проводимости и валентной зоне  $N$ :

$$N = \sqrt{N_c N_v} = 2 \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} (m_n m_p)^{3/4} m^{-3} \quad (2.6)$$

## 2.1. Определение концентрации носителей заряда в собственных полупроводниках

Свойства полупроводников сильно зависят от концентрации и вида примесей. Полупроводник без примесей или с очень низкой их концентрацией, которая не оказывает существенного влияния на удельную проводимость, называется собственным.

В собственных и слаболегированных примесных полупроводниках электронный (дырочный) газ является невырожденным, распределение электронов по энергиям описывается классической функцией распределения Максвелла-Больцмана:

$$f(E) = \exp(E_F / kT) \cdot \exp(-E / kT). \quad (2.7)$$

Интегрирование выражения (2.3) дают формулы для расчета концентрации свободных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне собственного полупроводника:

$$n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - F}{kT}\right) \quad (2.8)$$

$$p_0 = N_v \exp\left(-\frac{F - E_v}{kT}\right) \quad (2.9)$$

С учетом электронейтральности для концентрации носителей в собственном полупроводнике можно получить следующее выражение:

$$n = p = n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{E_g (\text{эВ}) e(Kл)}{2kT}\right), \quad (2.10)$$

где  $E_g = E_c - E_v$  – ширина запрещенной зоны.

$e = -1.602 \cdot 10^{-19}$  Кл - абсолютное значение заряда электрона.

Экспоненциальный множитель обуславливает резкое увеличение  $n_i$  при возрастании температуры или уменьшении ширины запрещенной зоны.

Закон действующих масс

$$n \cdot p = N_c N_v \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2. \quad (2.11)$$

Закон действующих масс: произведение концентраций электронов и дырок в полупроводнике не зависит от его легирования, а зависит только от температуры; это произведение равно квадрату концентрации носителей в собственном полупроводнике.

## 2.2. Определение концентраций носителей заряда в примесных полупроводниках

Примесные полупроводники кроме основных валентных атомов содержат в кристаллической решетке атомы других элементов с валентностью ниже или выше валентности основных. Например, введение пятивалентных примесей (P, As, Sb) в четырехвалентные Ge и Si, и шестивалентных для соединений GaAs, образует электронный полупроводник - n-типа. Такие примеси называются донорными. Введение трехвалентных примесей (B, Al, In) в четырехвалентные Ge и Si, и двухвалентных для соединения GaAs, образует дырочный полупроводник -p-типа. Такие примеси называются акцепторными.

2.1. Носители зарядов, концентрация которых в данном полупроводнике больше (например, в полупроводнике n-типа - электроны, а в полупроводнике p-типа -дырки) называются основными. Концентрация электронов в электронном полупроводнике  $n_n$  зависит от концентрации донорных примесей:

$$n_n = n_i + N_d, M^{-3}$$

концентрация дырок в дырочном полупроводнике  $p_p$  зависит от концентрации акцепторных примесей:

$$p_p = p_i + N_a = n_i + N_a, \text{ м}^{-3}$$

2.2. Концентрации неосновных носителей (дырок в электронном и электронов в дырочном полупроводниках) можно определить по формулам:

$$p_{p0}(T) = \frac{n_i^2(T)}{n_n} \cong \frac{n_i^2(T)}{N_D} \quad n_{p0}(T) = \frac{n_i^2(T)}{p_p} \cong \frac{n_i^2(T)}{N_A}, \text{ м}^{-3} \quad (2.12)$$

В рабочем диапазоне температур практически все атомы примеси оказываются ионизированными, поэтому с учётом того, что на практике концентрации примесей выбираются из условий  $N_d \gg n_i$  и  $N_a \gg p_i$  для концентраций основных носителей зарядов полупроводников n- и p- типов с весьма высокой степенью приближенности соответственно выполняются условия

$$n_n \approx N_d, \text{ м}^{-3} \quad \text{и} \quad p_p \approx N_a.$$

Существует связь между концентрацией основных и неосновных носителей:

$$n_n p_p = n_i^2.$$

### 3. Определение положения уровней Ферми в собственном и примесных полупроводниках.

Уровень Ферми - уровень энергии, которую могут иметь 50% всех носителей, находящихся в полупроводнике.

3.1. Положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости в собственном полупроводнике имеет следующее значение:

$$\mu_i = E_C - E_F = \frac{E_c - E_v}{2} - \frac{\kappa T}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = \frac{E_g}{2} - \frac{3}{4} kT \frac{m_p^*}{m_n^*}; \quad (2.13)$$

Уровень Ферми в собственном полупроводнике находится приблизительно в середине запрещённой зоны и, при условии  $E_c = 0$ , определяется выражением:

$$E_{Fi} = \frac{E_v - E_c}{2} - \frac{3kT}{4 \cdot e} \ln \frac{m_p}{m_n} = \frac{\Delta E_g}{2} - \frac{3kT}{4 \cdot e} \ln \frac{m_p}{m_n} (\text{эВ}) \quad (2.14)$$



3.2. Уровень Ферми в примесном полупроводнике р-типа (рис.2.1 а) определяется выражением:

$$E_{Fp} = \frac{\Delta E_g}{2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{n_i} = \frac{\Delta E_g}{2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a}{n_i} (\text{эВ}) \quad (2.15)$$

3.3. Уровень Ферми в примесном полупроводнике n-типа (рис.2.1 б) определяется выражением:

$$E_{Fn} = \frac{\Delta E_g}{2} - \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_i} = \frac{\Delta E_g}{2} - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_d}{n_i} (\text{эВ}) \quad (2.16)$$

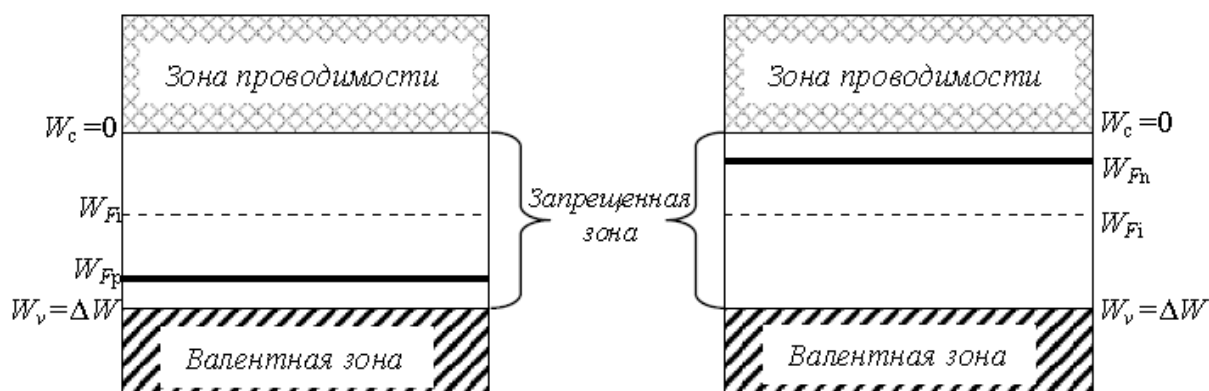


Рисунок 2.1 Энергетическая диаграмма полупроводникового материала р -типа (а) и полупроводникового материала n -типа (б).

#### 4. Примеры решения задач.

**Задача 1.** Определите следующие параметры чистого кремния при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ :

- ширину запрещенной зоны  $\Delta E$ ;
- эффективные массы электронов и дырок  $m_n$  и  $m_p$ ;
- эффективные плотности состояний в зоне проводимости  $N_c$  и в валентной зоне  $N_v$ ,
- равновесные концентрации подвижных носителей зарядов  $n_i = p_i$  в собственном полупроводнике.

#### Решение

1.1. Переводим заданное значение температуры в градусы Кельвина

$$T[K] = t^{\circ}C + 273 = 20 + 273 = 293 K$$

1.2. Ширина запрещенной зоны при заданной температуре для Si

$$\Delta W = \beta - \alpha \cdot T = 1,205 - 2,84 \cdot 10^{-4} \cdot 293 = 1,1218 \text{ эВ}$$

где  $\beta$  – экстраполированный член,  $\alpha$  – коэффициент температурного изменения ширины запрещенной зоны.

1.3. Эффективная масса электрона

$$m_n = m_0 \cdot 1,084 = 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 1,084 = 9,87 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

Эффективная масса дырки

$$m_p = m_0 \cdot 0,56 = 9,109 \cdot 10^{-31} \cdot 0,56 = 5,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$m_0$  - масса покоя электрона.

1.4. Среднее геометрическое значение эффективных плотностей энергетических состояний в зоне проводимости и валентной зоне  $N$ :

$$N = \sqrt{N_c N_v} = 2 \left( \frac{2\pi \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_n m_p)^{\frac{3}{4}} =$$

$$2 \left( \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{(6,626 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} (9,87 \cdot 10^{-31} \cdot 5,1 \cdot 10^{-31})^{\frac{3}{4}} =$$

$$2 \cdot (5,7878 \cdot 10^{46})^{3/2} (5,0337 \cdot 10^{-61})^{3/4} = 2 \cdot 1,39 \cdot 10^{70} \cdot 5,976 \cdot 10^{-46} = 1,664 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

1.5. Равновесные концентрации электронов и дырок  $n_i = p_i$  :

$$n_i = p_i = N \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W \cdot e}{2kT}\right) =$$

$$1,664 \cdot 10^{25} \exp\left(\frac{-1,1218 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}\right) = 1,661 \cdot 10^{25} e^{-22,2068} =$$

$$1,664 \cdot 10^{25} \cdot 2,268 \cdot 10^{-10} = 3,774 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-3}.$$

**Задача 2.** Образец кремния легирован атомами акцепторной и донорной примесей с концентрациями  $N_a = 10^{23} 1/\text{м}^3$  и  $N_d = 10^{22} 1/\text{м}^3$ .

При заданной температуре  $t = 20^{\circ}\text{C}$  определить концентрации основных ( $n_n, p_p$ ) и неосновных носителей ( $p_n, n_p$ ) при легировании полупроводникового кристалла донорными или акцепторными примесями

**Решение**

2.1. Концентрация основных носителей (электронов) в электронном полупроводнике

$$n_n = n_i + N_D = 3,774 \cdot 10^{15} + 10^{22} = 10^{22} \text{ м}^{-3}$$

2.2. Концентрация неосновных носителей (дырок) в электронном полупроводнике

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(3,774 \cdot 10^{15})^2}{10^{22}} = \frac{1,4243 \cdot 10^{31}}{10^{22}} = 1,424 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$$

2.3. Концентрация основных носителей (дырок) в дырочном полупроводнике

$$p_p = n_i + N_A = 3,774 \cdot 10^{15} + 10^{23} = 10^{23} \text{ м}^{-3}$$

2.4. Концентрация неосновных носителей (электронов) в дырочном полупроводнике

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(3,774 \cdot 10^{15})^2}{10^{23}} = \frac{1,4243 \cdot 10^{31}}{10^{23}} = 1,424 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$$

**Задача 3.** Определить положение уровня Ферми в собственном  $F_i$ , электронном  $F_n$  и дырочном  $F_p$  полупроводниках. Построить энергетические (зонные) диаграммы полупроводников в масштабе по оси энергий, принимая за начало отсчета нижний уровень зоны проводимости ( $E_c=0$ ).

### Решение

3.1. Уровень Ферми в собственном полупроводнике находится приблизительно в середине запрещенной зоны и, при условии  $W_c = 0$ , определяется выражением:

$$W_{F_i} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{3kT}{4 \cdot e} \ln \frac{m_p}{m_n} = \frac{1,1218}{2} - \frac{3 \cdot 1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{4 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{51 \cdot 10^{-31}}{9,87 \cdot 10^{-31}} =$$

$$0,5609 - 0,01894 \cdot \ln 0,516717 = 0,5609 + 0,01894 \cdot 0,66 = 0,5609 + 0,0125 =$$

$$= 0,5734 \text{ эВ}$$

3.2. Уровень Ферми в примесном полупроводнике *p*-типа определяется выражением:

$$W_{Fp} = \frac{\Delta W}{2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{n_i} = \frac{1,1218}{2} + \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{23}}{3,774 \cdot 10^{15}} =$$

$$0,5609 + 0,02526 \cdot \ln 2,65 \cdot 10^7 = 0,5609 + 0,02526 \cdot 17,0925 = 0,5609 + 0,43175 =$$

$$= 0,9926 \text{ эВ}$$

3.3. Уровень Ферми в примесном полупроводнике *n*-типа определяется выражением:

$$W_{Fn} = \frac{\Delta W}{2} - \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_i} = \frac{1,1218}{2} - \frac{1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,602 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{10^{22}}{3,774 \cdot 10^{15}} =$$

$$0,5609 - 0,02526 \cdot \ln 2,65 \cdot 10^6 = 0,5609 + 0,02526 \cdot 14,7899 =$$

$$0,5609 - 0,3736 = 0,1873 \text{ эВ}$$

3.4. Энергетические диаграммы приведены на рисунке 2.2.

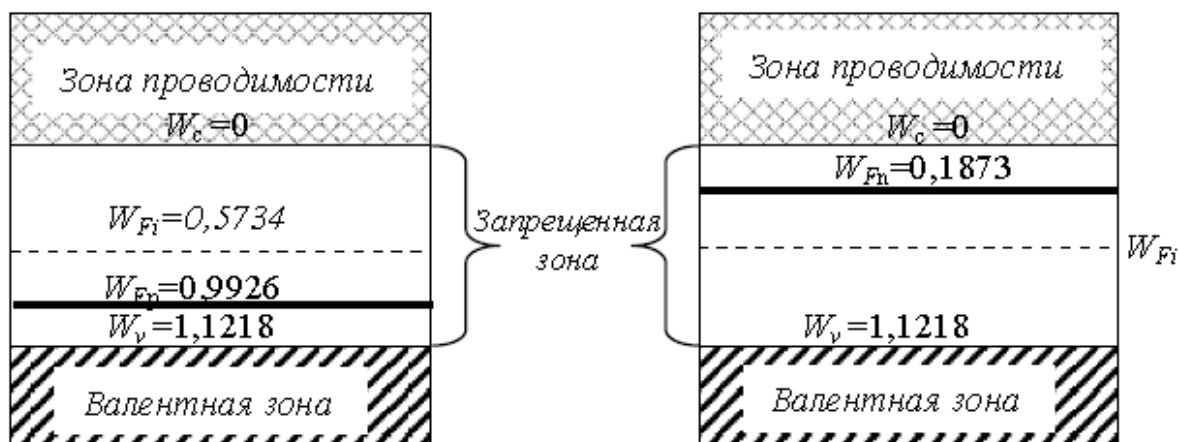


Рисунок 2.2. Энергетические диаграммы полупроводника *p*-типа (а) и *n*-типа (б)

## 5. Вопросы и задачи для самостоятельного решения.

1. Наибольшим (наименьшим) удельным сопротивлением (удельной проводимостью, шириной запрещенной зоны) обладают
  - диэлектрики;
  - полупроводники;
  - проводники.

2. Полупроводник, в котором концентрация дырок (электронов) превышает концентрацию электронов проводимости (дырок), относится к полупроводникам
  - i-типа,
  - n-типа;
  - p-типа.
3. Атомы алюминия (бора, галлия, индия, мышьяка, сурьмы, фосфора) в кристалле кремния или германия образуют:
  - акцепторную примесь;
  - донорную примесь.
4. При ионизации акцепторного (донорного) атома возникает подвижный носитель заряда -
  - акцепторный ион;
  - валентный электрон;
  - дырка;
  - электрон проводимости.
5. С увеличением концентрации акцепторной примеси концентрации дырок и электронов проводимости в полупроводнике изменятся следующим образом.
  - концентрации дырок и электронов проводимости не изменятся;
  - концентрация дырок увеличится, концентрация электронов проводимости не изменится;
  - концентрация дырок увеличится, концентрация электронов проводимости уменьшится;
  - концентрация дырок уменьшится, концентрация электронов проводимости увеличится.
6. На диаграмме энергетических уровней в полупроводнике n-типа [p-типа] примесная энергетическая зона расположена:
  - в запрещённой зоне вблизи верхней границы валентной зоны;
  - в запрещённой зоне вблизи нижней границы зоны проводимости;
  - в середине запрещённой зоны.
7. Большей подвижностью в полупроводнике обладают носители заряда -
  - дырки;
  - электроны проводимости.
8. С увеличением концентрации акцепторной [донорной] примеси [температуры] в полупроводнике уровень Ферми
  - не изменится;

— приблизится к дну зоны проводимости;

— приблизится к потолку валентной зоны.

9. Векторы скорости дрейфа дырок [электронов] и напряжённости электрического поля:

— направлены противоположно;

— сонаправлены.

10. Чем объясняется различие в температурной зависимости электропроводности полупроводников и металлов.

11. Существует ли принципиальное различие между электронами проводимости в полупроводниках (металлах) и свободными электронами.

12. При комнатной температуре средняя энергия тепловых колебаний атомов существенно меньше ширины запрещенной зоны полупроводников. Каким образом электроны из валентной зоны могут переходить в зону проводимости в собственном полупроводнике?

13. В кристалл германия в небольшой пропорции введена сурьма. Является ли кристалл полупроводником n-типа [p-типа]?

14. В кристалл германия в небольшой пропорции введен индий. Является ли кристалл полупроводником n-типа [p-типа]?

15. Каковы свойства полупроводников с компенсированными примесями?

16. [С:\объясните](#) Объясните, какая из дырок обладает большей энергией: в центре валентной зоны или у ее потолка?

17. При каком условии энергетические уровни примеси можно считать дискретными?

18. Ширина запрещенной зоны в кремнии равна 1.1 эВ, а в алмазе 6 эВ. Рассмотрите вопрос о прозрачности этих веществ для видимого света. Длины волн видимого света заключены в диапазоне 0,40-0,76 мкм.

Задание 1. Для заданного полупроводникового материала при заданной температуре, приведенными в таблице 3, решить задачи №№ 1-3 из раздела 4.

Таблица 3.

вар.	Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$N_d, 1/\text{м}^3$	$N_a, 1/\text{м}^3$
01	Si	45	$7 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{22}$
02	Si	30	$7 \times 10^{22}$	$1 \times 10^{19}$
03	Si	20	$3,5 \times 10^{22}$	$2 \times 10^{23}$

04	Si	15	$8 \times 10^{22}$	$2 \times 10^{20}$
05	GaAs	41	$5 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{22}$
06	GaAs	33	$5 \times 10^{20}$	$9 \times 10^{20}$
07	GaAs	23	$9 \times 10^{17}$	$1,5 \times 10^{23}$
08	GaAs	13	$6 \times 10^{22}$	$9 \times 10^{21}$
09	Ge	43	$6 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{22}$
10	Ge	25	$8 \times 10^{23}$	$2 \times 10^{22}$
11	Ge	30	$9 \times 10^{20}$	$3 \times 10^{23}$
12	Ge	15	$6 \times 10^{18}$	$3 \times 10^{20}$

## Практическое занятие 3 к лекции № 4 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИ-ОД

### Примеры решения задач

**Пример 4.1.** Имеется сплавной р-п переход с концентрацией  $N_D = 10^3 \cdot N_A$ , причем на каждые  $10^8$  атомов приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов ( $T=300$  К). Плотность атомов  $N = 4,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

*Решение:*

Определим концентрацию примесных акцепторных атомов

$$N_a = N / 10^8 = 4,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3};$$

$N = 4,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  — концентрация атомов германия).

Концентрация атомов доноров

$$N_D = 4,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}.$$

Контактную разность потенциалов определим из (24), следовательно

$$U_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_D}{n_i^2} = 0,33 \text{ В}.$$

**Пример 4.2.** Определить ширину р-п перехода в кремнии при температуре 350 К в отсутствие внешнего напряжения, если концентрация дырок и электронов соответственно  $1,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$   $2,0 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$ .

*Решение:* Используем модель резкого перехода.

Ширина области объемного заряда (25)

$$\delta_0 = \delta_{p0} + \delta_{n0} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varphi_{k0} (N_A + N_D)}{e N_A N_D}}$$

Контактная разность потенциалов

$$\varphi_{k0} = eU_k = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_n p_p}{n_i^2} \right) = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

Подставляем необходимые данные и проводим вычисления

$$\delta_0 = 3,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

**Пример 4.3.** Имеется идеализированный р-п-переход при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$ , о котором известно, что концентрация донорной примеси составляет  $N_D = 2,5 \cdot 10^{15} \text{ атомов/см}^3$ , акцепторной примеси  $N_A = 2 \cdot 10^{18} \text{ атомов/см}^3$ , а собственная концентрация носителей в кристалле, из которого изготовлен пере-



ход, равна  $N_i = 3,5 \cdot 10^{14}$  атомов/см<sup>3</sup>.

Определить прямой ток  $I_{пр}$  и контактную разность потенциалов  $U$  при приложенном к зажимам диода напряжении  $U_{пр} = 0,6$  В и токе  $I_0 = 1$  мкА.

Прямой ток

$$I = I_0 (e^{U/\varphi_T} - 1) = 10^{-6} (e^{0,6/0,025} - 1) = 0,054 = 54 \text{ мА.}$$

Контактная разность потенциалов на идеализированном переходе, образованная приграничными зарядами.

$$U_\varphi = \varphi_T \ln \frac{N_D N_A}{N_i^2} = 0,025 \ln \frac{2,5 \cdot 10^{15} \cdot 2 \cdot 10^{18}}{(3,5 \cdot 10^{14})^2} \approx \\ \approx 0,025 \ln(4,08 \cdot 10^4) = 0,265 \text{ мВ.}$$

Разность напряжений  $\Delta U = U_{пр} - U_\varphi = 0,335$  В, объясняется падением напряжения на сопротивлениях n- и p-областей полупроводника.

#### Вопросы и задания для самостоятельного решения.

**Вопрос 4.1.** Какими зарядами создастся запирающий слой p-n-перехода и внутреннее электрическое поле перехода?

**Вопрос 4.2.** Объясните зависимость ширины запирающего слоя p-n-перехода от полярности приложенного напряжения.

**Вопрос 4.3.** Какие типы диодов вы знаете? Изобразите их условные обозначения.

**Вопрос 4.4.** Как определяют статические и динамические сопротивления диодов и транзисторов?

**Вопрос 4.5.** Какие виды пробоев p-n-перехода вы знаете и в чем их отличие?

**Задача 4.1.** Кремниевый p-n переход находится при температуре 300К; p-область легирована атомами бора (III группа) с  $N_a = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ , n-область легирована атомами фосфора (V группа) с  $N_D = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Вычислите:

а) высоту потенциального барьера  $U_0$ , если  $U = 0$ ;  $n_i = 1,5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ;

б) координаты границ обедненной области с каждой стороны перехода при приложенном напряжении  $U = -10$  В. Параметр  $\varepsilon = 1,062 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{см}}$ ;

в) барьерную емкость при напряжении  $U = -10$ В, если площадь поперечного сечения перехода  $10^{-8} \text{ м}^2$ ;

г) напряжение лавинного пробоя  $U_{прб}$ , если данное явление наступает при напряженности электрического поля  $E = 1,5 \cdot 10^7 \frac{В}{м}$ .

**Задача 4.2.** Имеется резкий p-n переход, изготовленный из кремния, и находящийся при температуре 300 К. Сначала напряжение смещения отсутствует. Затем к переходу прикладывают такое отрицательное смещение, что ток через диод становится равным 1 мА. Концентрация легирующих примесей по обе стороны перехода составляет  $10^{21} м^{-3}$ . Площадь поперечного сечения перехода  $10^{-6} м^2$ . Вычислите время, за которое напряжение смещения возрастет до  $-10 В$ . Задано:  $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} м^{-3}$ ;  $\varepsilon = 1,062 \cdot 10^{-12} \frac{Ф}{см}$ .

**Задача 4.3.** Области p и n диода с резким p-n переходом имеют удельное сопротивление 0,013 и 44,5 Ом·см соответственно. В условиях термодинамического равновесия, при  $T = 300 К$  определите высоту потенциального барьера  $U_0$ .  $\varepsilon = 1,062 \cdot 10^{-12} \frac{Ф}{см}$ .

Известно, что  $\mu_p = 480 \frac{см^2}{В \cdot с}$   $\mu_n = 1400 \frac{см^2}{В \cdot с}$   $n_i = 1,6 \cdot 10^{10} см^{-3}$ .

**Задача 4.4.** Имеется два диода, один из которых выполнен из кремния, а другой из германия. Вычислите для обоих диодов:

а) Высоту потенциального барьера  $U_0$ , считая, что концентрации легирующих примесей в них равны  $N_a = 10^{17} см^{-3}$ ,  $N_d = 10^{14} см^{-3}$ .

б) Толщину области перехода.  $\varepsilon = 1,062 \cdot 10^{-12} \frac{Ф}{см}$ .

**Задача 4.5.** При изменении прямого напряжения на  $\Delta U = 0,1 В$  прямой ток германиевого диода изменяется на  $\Delta I_{пр} = 10 мА$ , а при изменении обратного напряжения на  $\Delta U_{обр} = 10 В$ , обратный ток изменяется на 40 мкА. Определить дифференциальные сопротивления диода при прямом и обратном напряжении.

**Задача 4.6.** В германиевом p-n переходе подвижности электронов и дырок равны  $\mu_n = 0,39$ ,  $\mu_p = 0,19 м^2/(В \cdot с)$ . Концентрация носителей при  $T = 300 К$ ,  $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} м^{-3}$ ,  $p_n = 3,91 \cdot 10^{17} м^{-3}$ . Найти: а) плотность обратного тока насыщения, а также отношение дырочной составляющей обратного тока насыщения

к электронной, если  $L_p=L_n=1\cdot 10^{-3}$  м, б) напряжение, при котором плотность прямого тока  $j=10\text{А/м}^2$ .

**Задача 4.7.** Рассчитать величину тока  $I$  в кремниевом р-п переходе при внешнем напряжении  $U = + 0,5\text{В}$  и  $U=-0,5\text{ В}$ . Уровни легирования:  $N_A = 10^{16}\text{ см}^{-3}$ ,  $N_D = 10^{14}\text{ см}^{-3}$ , площадь  $S = 1\text{ мм}^2$ .

**Задача 4.8.** Выпрямительный диод марки Д102 А имеет ток  $I_{\text{нас}} = 0,1\text{ мкА}$ . Используя уравнение Шокли  $I = I_{\text{нас}}(e^{U/U_T} - 1)$ , где  $U_T = \frac{kT}{e} = \frac{T}{11600}$ , определить падение напряжения на нем при  $I = 1\text{ мА}$ , при температуре  $25\text{ }^\circ\text{С}$ . Найти мощность, выделившуюся на диоде.

**Задача 4.9.** Выпрямительный германиевый диод имеет ток  $I_{\text{нас}} = 1\text{ мкА}$ . Используя уравнение Шокли  $I = I_{\text{нас}}(e^{qU/kT} - 1)$  определить падение напряжения на нем при  $I = 100\text{ мА}$ , при температуре  $T=293\text{К}$ . Найти мощность, выделившуюся на диоде.  $e = 1.602\cdot 10^{-19}$ ;  $k=1.38\cdot 10^{-23}$

**Задача 4.10.** Выпрямительный кремниевый диод имеет ток  $I_{\text{нас}} = 10^{-8}\text{А}$ . Используя уравнение Шокли  $I = I_{\text{нас}}(e^{qU/kT} - 1)$  определить падение напряжения на нем при  $I = 100\text{ мА}$ , при температуре  $T=293\text{К}$ . Найти мощность, выделившуюся на диоде.  
 $e = 1.602\cdot 10^{-19}$ ;  $k=1.38\cdot 10^{-23}$

**Задача 4.11.** Выпрямительный германиевый диод имеет ток  $I_{\text{нас}} = 25\text{ мкА}$ . Используя уравнение Шокли  $I = I_{\text{нас}}(e^{qU/kT} - 1)$ , определить сопротивление диода по постоянному току  $R_{\text{п}}$  и дифференциальное сопротивление  $r_D$  при  $U_{\text{пр}}=0,1\text{ В}$  и температуре  $T=300\text{ К}$ .

**Задача 4.12.** Полупроводниковый диод и резистор соединены последовательно (см. рис. 4.1 ). Диод имеет ток насыщения  $I_{\text{нас}} = 0,1\text{ мкА}$ . При величине приложенного напряжения  $E=0,2\text{ В}$  и температуре  $T=300\text{ К}$  падение напряжения на сопротивлении составляет  $U_R=0,1\text{ В}$ . Определите величину сопротивления  $R$ .

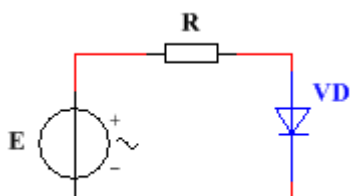


Рисунок 4.1

**Задача 4.13.** Полупроводниковый диод и резистор соединены последовательно (см. рис. 4.2). Величина приложенного напряжения  $E = -15$  В. Сопротивления резистора  $R = 1$  кОм. Определите значение выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ .

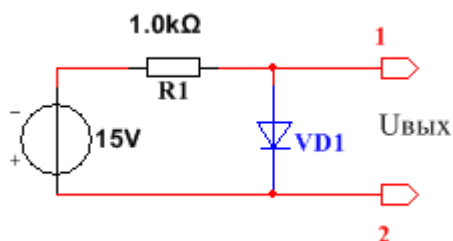


Рисунок 4.2

**Задача 4. 14.** Определить выходное напряжение в схеме, изображенной на рис. 4.3, если при комнатной температуре используется кремниевый диод, имеющий обратный ток насыщения  $I_{\text{нас}} = 10$  мкА.

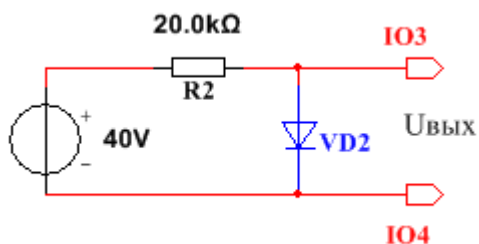


Рисунок 4.3

**Задача 4.15.** Рассчитать высоту потенциального барьера в p-n переходе n-Ge-p-Ge с объемным сопротивлением  $\rho = 2$  Ом · см. Как изменится высота потенциального барьера на границе при изменении напряжения от  $V = +0,15$  В до  $V = -5$  В. Нарисовать зонные диаграммы.

**Задача 4.16.** Обратный ток полупроводникового диода при температуре 300 К равен 1 мкА. Определить сопротивление диода постоянному току и его дифференциальное сопротивление при прямом напряжении 150 мВ.

**Задача 4.17.** Удельное сопротивление р-области германиевого р-п-перехода  $\rho_p = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , удельное сопротивление п-области  $\rho_n = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Вычислить контактную разность потенциалов (высоту потенциального барьера) при  $T = 300 \text{ К}$ , если подвижности электронов и дырок в германии соответственно равны  $\mu_n = 0,39$  и  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

**Задача 4. 18.** Определить максимальную напряженность электрического поля р-п перехода в кремнии, если концентрация донорной и акцепторной примесей  $1,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Ширина р-п перехода 0,3 мкм. Примесь полностью ионизирована.

**Задача 4.19.** Германиевый сплавной р-и-переход имеет обратный ток насыщения  $I_0 = 1 \text{ мкА}$ , а кремниевый с такими же размерами — ток  $I_0 = 10^{-8} \text{ А}$ . Вычислить и сравнить прямые напряжения на переходах при  $T = 293 \text{ К}$ , если через каждый диод протекает ток 100 мА.

**Задача 4. 20.** Кремниевый р-и-переход имеет следующие данные: ширина р-п-перехода  $\delta = 10^{-3} \text{ см}$ , концентрация акцепторных примесей  $N_a = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , концентрация донорных примесей  $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , площадь поперечного сечения  $\Pi = 10^{-4} \text{ см}^2$ , длина областей  $\delta_n = 10^{-4} \text{ см}$ ,  $\delta_p = 10^{-3} \text{ см}$ , коэффициенты диффузии неосновных носителей  $D_p = 8 \text{ см}^2/\text{с}$ ;  $D_n = 25 \text{ см}^2/\text{с}$ , концентрация собственных носителей заряда  $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Определить: а) обратный ток насыщения  $I_0$   
б) прямой ток и падение напряжения на объемах р- и п-областей при прямом напряжении, равном 0,65 В.

**Задача 4.21.** Германиевый диод, имеющим обратный ток насыщения  $I_0 = 25 \text{ мкА}$ , работает при прямом напряжении, равном 0,1 В, и  $T=300 \text{ К}$ . Определить сопротивление диода постоянному току  $R_0$  и дифференциальное сопротивление  $r_{\text{диф}}$ .

**Задача 4.22.** Для идеального р-п-перехода определить: а) напряжение, при котором обратный ток будет достигать 90% значения обратного тока насыщения при  $T = 300 \text{ К}$ ; б) отношение тока при прямом напряжении, равном  $0,05 \text{ В}$ , к току при том же значении обратного напряжения.

**Задача 4.23.** В некотором идеальном р-п-переходе обратный ток насыщения  $I_0 = 10^{-14} \text{ А}$  при  $T = 300 \text{ К}$  и  $I_0 = 10^{-9} \text{ А}$  при  $T = 125 \text{ °С}$ . Определить напряжения на р-п-переходе в обоих случаях, если прямой ток равен  $1 \text{ мА}$ .

**Задача 4.24.** Барьерная емкость диода равна  $200 \text{ пФ}$  при обратном напряжении  $2 \text{ В}$ . Какое требуется обратное напряжение, чтобы уменьшить емкость до  $50 \text{ пФ}$ , если контактная разность потенциалов  $\phi_k = 0,82 \text{ В}$ ?

**Задача 4.25.** Обратный ток насыщения диода с барьером Шоттки равен  $2 \text{ мкА}$ . Диод соединен последовательно с резистором и источником постоянного напряжения смещения  $E = 0,2 \text{ В}$  так, что на диод подается прямое напряжение. Определить сопротивление резистора, если падение напряжения на нем равно  $0,1 \text{ В}$ . Диод работает при  $T = 300 \text{ К}$ .

## Практическое занятие 4 к лекции 5 РАЗНОВИДНОСТИ ДИОДОВ. ОДНО- И ДВУХПОЛУПЕРИОДНАЯ СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ

### Вопросы и задания для самостоятельного решения

**Вопрос 5.1.** При каком включении стабилитрон работает как обычный выпрямительный диод?

**Вопрос 5.2.** В чем заключается особенность вольт-амперной характеристики полупроводникового стабилитрона?

**Вопрос 5.3.** Как изменение температуры окружающей среды влияет на работу стабилитрона?

**Задача 5.1.** Для стабилизации напряжения на нагрузке в цепи параметрического стабилизатора напряжения (рис. 5.1.) используется полупроводниковый стабилитрон с идеальной вольт-амперной характеристикой, напряжение стабилизации которого  $U_{ст}=10$  В. Определить допустимые пределы изменения питающего напряжения  $E_{min}$ ,  $E_{max}$ , если максимальный ток стабилитрона  $I_{ст max}=30$  мА, минимальный ток стабилитрона  $I_{ст min}=1$  мА, сопротивление нагрузки  $R_H=1$  кОм и сопротивление ограничительного резистора  $R_6=500$  Ом.

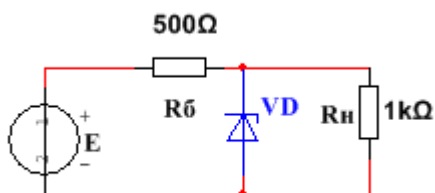


Рисунок 5.1.

**Задача 5.2.** Рассчитать сопротивление  $R_6$  балластного резистора в схеме параметрического стабилизатора напряжения (рис. 5.2, а), выполненного на кремниевом стабилитроне КС210Ж. Вольт-амперная характеристика стабилитрона дана на рис. 13.7, 6. Входное напряжение изменяется от  $U_{min} = 13$  В до  $U_{max} = 19$  В.

Сопротивление нагрузочного резистора  $R_H = 1,8$  кОм. Будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения входного напряжения? Чему равен коэффициент стабилизации?

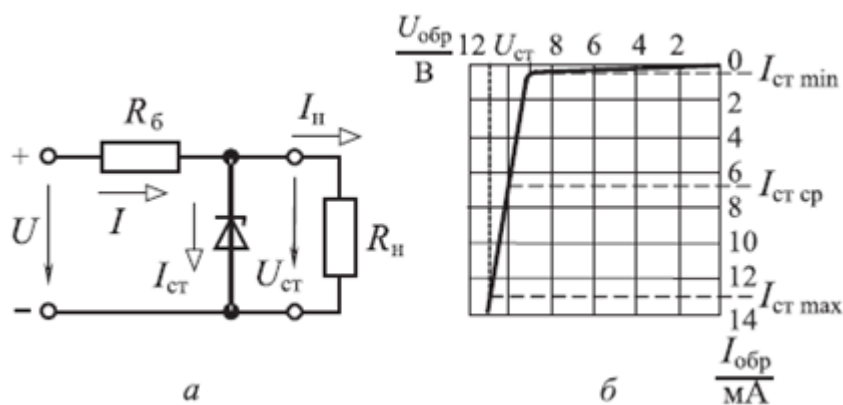


Рисунок 5.2.

**Задача 5.3.** Стабилитрон с идеальной вольт-амперной характеристикой используется в цепи параметрического стабилизатора напряжения (см. рис. 5.2, а). Известно, что  $U_{\text{вх}} = (16 \pm 1,6)$  В,  $U_{\text{ст}} = 9$  В,  $I_{\text{ст}} = 10$  мА,  $I_{\text{н}} = 8$  мА. Определите, чему равен ток на входе стабилизатора  $I_{\text{вх}}$  сопротивление балластного резистора  $R_6$ , а также пределы изменения тока стабилитрона.

**Задача 5.4.** Определите ток стабилитрона, входящего в состав параметрического стабилизатора (см. рис. 5.2, а), если ток на входе стабилитрона  $I_{\text{ст}} = 160$  мА, сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}} = 100$  Ом,  $U_{\text{ст}} = 10$  В.

### **Задача 5.5.**

В параметрическом стабилизаторе (см. рис. 5.2, а) установлены нагрузочный резистор  $R_{\text{н}} = 1000$  Ом, балластный резистор  $R_6 = 100$  Ом и стабилитрон VD с параметрами  $U_{\text{ст}} = 10$  В,  $I_{\text{ст min}} = 3$  мА,  $I_{\text{ст max}} = 33$  мА. В каких пределах можно менять подводимое к стабилизатору напряжение, чтобы напряжение на нагрузке было стабилизированным? В каких пределах можно менять ток нагрузки и ее сопротивление, если к стабилизатору подводится напряжение 13 В?

### **Задача 5.6.**

Определите, в каких пределах изменяется ток на входе стабилитрона (см. рис. 5.2, а), если ток стабилитрона  $I_{\text{ст}}$  изменяется в пределах от 10 до 20 мА, сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}} = 500$  Ом,  $U_{\text{вых}} = 6$  В.



## Практическое занятие 5 к Лекции № 6 Биполярный Транзистор.

### Примеры решения заданий.

**Пример 6.1.** Концентрация примесей в базе, эмиттере и коллекторе некоторого транзистора p-n-p и ширина базы контролируются так, что 1% дырок, инжектируемых из эмиттера, теряется при рекомбинации в базе.

Пренебрегая токами утечки, определить коэффициент передачи тока эмиттера, эффективность эмиттера, коэффициент переноса, если электронная составляющая тока эмиттера  $I_{Эн} = 0,01I_Э$ .

### Решение

1. Эффективность эмиттера (коэффициент инжекции) в соответствии с приведенными выше соотношениями

$$\gamma = I_{Эр} / (I_{Эр} + I_{Эн}) = 1 - I_{Эн} / I_Э = 0,99.$$

2. Коэффициент переноса

$$\chi = I_{Кр} / I_{Эр} = (I_{Эр} - 0,01 I_{Эр}) / I_{Эр} = 0,99.$$

3. Коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \gamma\chi = 0,98.$$

**Пример 6.2.** Транзистор p-n-p включен в схему с общей базой. Покажите, что дифференциальное сопротивление эмиттера можно приближенно вычислить

по формуле  $r_Э \cong \frac{kT}{eI_Э}$ , где  $I_Э$  — ток эмиттера. Вычислить  $r_Э$  при  $T = 300$  К. ес-

ли  $I_Э = 2$  мА.

**Решение.** Поскольку на эмиттерный переход подано прямое напряжение, ток эмиттера может быть определен следующим образом:

$$I_Э \approx I_{ЭБК} \exp \frac{eU_{ЭБ}}{kT}$$

$$\text{Тогда } r_Э = \left. \frac{dU_{ЭБ}}{dI_Э} \right|_{U_{КБ}=\text{const}} = \frac{kT}{eI_Э},$$

$$\text{и } r_Э \cong \frac{kT}{eI_Э}$$

При  $I_Э = 2$  мА и  $T = 300$  К

$$r_Э = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 130 \text{ Ом}$$

**Пример 6.3.** Используя характеристики, приведенные на рис. 1.21, определите коэффициент  $h_{12Б}$  биполярного транзистора, включенного по схеме с ОБ, если  $U_{КБ} = 10$  В,  $I_{Э1} = 1,0$  мА,  $I_{Э2} = 1,5$  мА.

Решение

По характеристике, представленной на рис. 1.21, б, определяем изменение тока в цепи коллектора при заданных изменении тока в цепи эмиттера и напряжении  $U_{КЭ}$  :

$$\Delta I_{Э} = I_{Э2} - I_{Э1} = 1,5 - 1,0 = 0,5 \text{ мА};$$

$$\Delta I_{К} = I_{К1} - I_{К2} = 1,3 - 1,0 = 0,3 \text{ мА}.$$

$$\text{Отсюда } h_{21Б} = \Delta I_{К} / \Delta I_{Э} = 0,3 / 0,5 = 0,6.$$

**Пример 6.4.** При изменении входного напряжения на  $\Delta U_{ЭБ} = 0,01$  В ток эмиттера изменился на  $\Delta I_{Э} = 0,6$  мА, ток коллектора — на  $\Delta I_{ЭК} = 0,50$  мА, выходное напряжение — на  $\Delta U_{КБ} = 8$  В. Определите входное и выходное сопротивления транзистора, включенного по схеме с ОБ, а также коэффициенты усиления тока, напряжения и мощности.

*Решение*

Коэффициент усиления тока транзистора, включенного по схеме с ОБ,

$$\alpha = \Delta I_{К} / \Delta I_{Э} = 0,5 / 0,6 = 0,83.$$

Коэффициент усиления напряжения

$$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = \Delta U_{КБ} / \Delta U_{ЭБ} = 8 / 0,01 = 800.$$

Коэффициент усиления мощности

$$K_P = \Delta P_{\text{вых}} / \Delta P_{\text{вх}} = \Delta I_{К} \Delta U_{КБ} / (\Delta I_{Э} \Delta U_{ЭБ}) = \alpha K_U = 0,83 \cdot 800 = 664.$$

Входное динамическое сопротивление

$$\Delta R_{\text{вх}} = \Delta U_{ЭБ} / \Delta I_{Э} = 0,01 / (0,6 \cdot 10^{-3}) = 16,6 \text{ Ом}.$$

Выходное динамическое сопротивление

$$\Delta R_{\text{вых}} = \Delta U_{КБ} / \Delta I_{К} = 8 / (0,5 \cdot 10^{-3}) = 16\,000 \text{ Ом} = 16 \text{ кОм}.$$

**Вопросы и задания для самостоятельного решения.**

**Вопрос 6.1.** В какой области биполярного транзистора находится наибольшая концентрация примесей и основных носителей заряда?

**Вопрос 6.2.** Как изменится положение выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ, если увеличится температура транзистора? Объясните смещение характеристик транзистора.

**Вопрос 6.3.** Как изменяется коэффициент передачи транзистора по току  $K_i$  (ОБ) при увеличении степени легирования базы

**Вопрос 6.4.** Как тепловой ток транзистора  $I_{к0}$  (обратный ток коллекторного перехода) зависит от ширины базы транзистора?

**Вопрос 6.5.** Как изменяется коэффициент передачи транзистора по току  $K_i$  (ОБ) при увеличении степени легирования базы

**Вопрос 6.6.** Почему не изготавливаются биполярные транзисторы на основе арсенида галлия (GaAs)?

Варианты ответа:

- у GaAs большая ширина запрещенной зоны.
- у GaAs не удастся получить необходимую концентрацию неосновных носителей заряда.
- у GaAs не удастся получить необходимую диффузионную длину неосновных носителей заряда.

**Задача 6.1.** Изобразить схемы включения транзистора ОБ для транзистора типа р-п-р и Показать полярности питающих напряжений для случаев работы транзистора: а) в активном режиме; б) в режиме отсечки; в) в режиме насыщения; г) при инверсном включении. На схемах показать направления токов эмиттера  $I_э$ , коллектора  $I_к$ , базы  $I_б$  для рассмотренных случаев.

**Задача 6.2.** Решить задачу 1 для транзисторов типа п-р-п.

**Задача 6.3.** На схемах рис. 6.1 укажите полярность источников питания, которые обеспечивают работу транзистора типа р-п-р, включенного по схеме с ОЭ, в следующих режимах: а) активный режим, б) режим отсечки, в) режим насыщения.

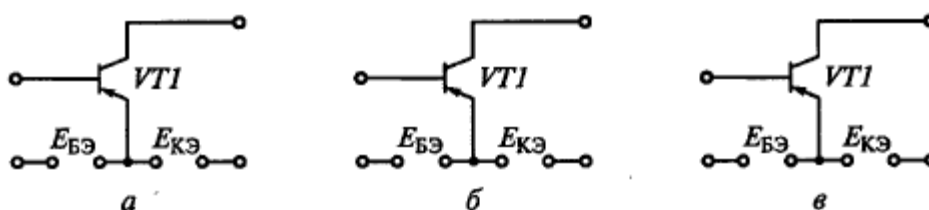


Рисунок 6.1. Схемы включения транзистора с ОЭ для работы в режимах активном (а), отсечки (б), насыщения (в)

На схемах показать направления токов эмиттера  $I_E$ , коллектора  $I_K$ , базы  $I_B$ .

**Задача 6.4.** Решить задачу 3 для транзисторов типа n-p-n.

**Задача 6.5.** Транзистор типа p-n-p включен по схеме ОЭ (рис 6. 2). В каком режиме работает транзистор, если: а) напряжение база-эмиттер  $U_{БЭ} = -0,4$  В и напряжение коллектор-эмиттер  $U_{КЭ} = -0,3$  В; б) напряжение  $U_{БЭ} = -0,4$  В и напряжение  $U_{КЭ} = -10$  В; в) напряжение  $U_{БЭ} = 0,4$  В и напряжение  $U_{КЭ} = -10$  В?

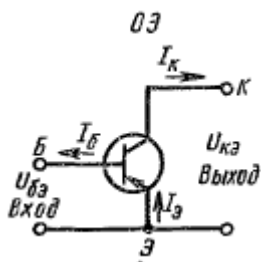


Рисунок 6.2.

**Задача 6.6.** Транзистор типа n-p-n включен по схеме ОБ. Напряжение эмиттер – база  $U_{ЭБ} = -0,5$  В, напряжение коллектор – база  $U_{КБ} = 12$  В. Определить напряжение коллектор – эмиттер.

**Задача 6.7.** Транзистор типа p-n-p включен по схеме ОЭ. Напряжение база – эмиттер  $U_{БЭ} = -0,8$  мВ, напряжение коллектор – эмиттер  $U_{КЭ} = -10$  В. Определить напряжение коллектор – база

**Задача 6.8.** Для некоторого транзистора типа p-n-p задано  $I_{Эр} = 1$  мА,  $I_{Эн} = 0,01$  мА.  $I_{Кр} = 0,98$  мА.  $I_{Кн} = 0,001$  мА. Вычислить: а) статический коэффициент переноса тока базы -  $\chi_B$  б) эффективность эмиттера (коэффициент инжекции -  $\gamma_{Э}$ ); в) ток базы и коэффициент передачи тока в схемах с ОБ -  $\alpha$  и ОЭ -  $\beta$ .

**Задача 6.9.** В биполярном транзисторе  $I_K = 10$  мА,  $I_{Э} = 10,5$  мА. Определить коэффициенты передачи тока  $\alpha$  и  $\beta$ , если тепловым током можно пренебречь.

**Задача 6.10.** Биполярный транзистор с  $\beta = 100$  имеет  $I_B = 10$  мкА. Определить  $I_K$  и  $I_{Э}$ , если тепловым током можно пренебречь. Сравнить токи  $I_K$  и  $I_{Э}$ .

**Задача 6.11.** В n-p-n -транзисторе концентрация доноров в эмиттере  $10^{24} \text{ м}^{-3}$ , а акцепторов в базе –  $10^{22} \text{ м}^{-3}$ . Считая, что подвижности электронов и дырок равны соответственно 0,4 и 0,2  $\text{м}^2/\text{В с}$ , определить отношение дырочного тока к электронному на переходе эмиттер-база.

**Задача 6.12.** Сплавной транзистор типа p-p-p включен в схему, изображенную на рис. 8.9. Определить коллекторный ток, если известно, что коэффициент передачи тока эмиттера транзистора  $\alpha = 0,98$  и обратный ток коллекторного перехода  $I_{КБ0} = 10 \text{ мкА}$ .

**Задача 6.13.** Транзистор, имеющий коэффициент передачи тока базы  $\beta = 100$ . обратный ток коллекторного перехода  $I_{КБ0} = 5 \text{ мкА}$ , включен в схему с общим эмиттером. Определите: а) ток эмиттера  $I_E$ ; б) ток базы  $I_B$ ; в) коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha$ ; г) обратный ток коллектора  $I_{КЭ0} = 5 \text{ мкА}$ , если ток коллектора  $I_K = 1 \text{ мА}$ .

**Задача 6.14.** По входным характеристикам транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 1.16, а), определить параметры  $h_{11Э}$  и  $h_{12Э}$  в рабочей точке с напряжениями  $U_{БЭ} = 350 \text{ мВ}$  и  $U_{КЭ} = 5 \text{ В}$ .

**Задача 6.15.** Пользуясь выходными характеристиками транзистора для схемы с общим эмиттером (рис. 1.16, б) в рабочей точке с напряжением  $U_{КЭ} = 25 \text{ В}$  и током базы 300 мкА, определить параметры  $h_{21Э}$  и  $h_{22Э}$

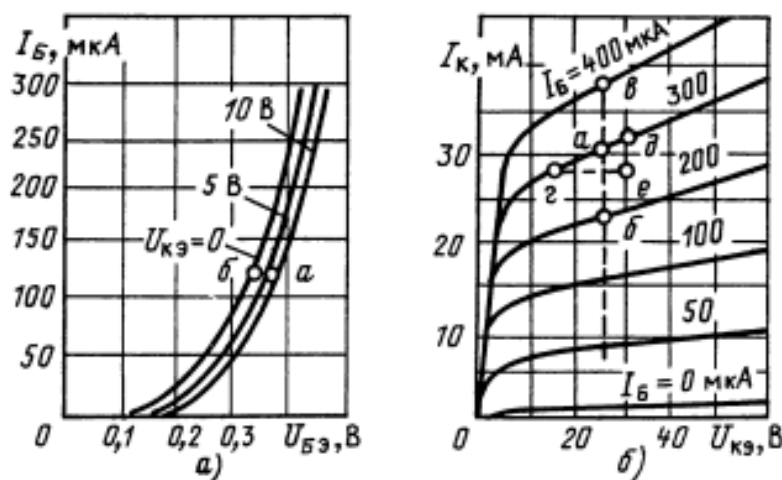


Рисунок 6.3. Входные (а) и выходные (б) вольт-амперные характеристики биполярного транзистора в схеме с ОЭ

**Задача 6.16.** При включении транзистора по схеме с ОБ коэффициент усиления тока  $\alpha = 0,97$ . Определите коэффициент усиления тока, если этот же транзистор включить по схеме с ОЭ.

**Задача 6.17.** Определите изменение тока коллектора биполярного транзистора, включенного по схеме с ОБ. если изменение эмиттерного тока на входе составляет  $I$  мА, а изменение напряжения на выходе равно 5 мВ,  $h_{21Б} = 0,98$ ,  $h_{22Б} = 0,001$  См.

**Задача 6.18.** Определите коэффициент передачи тока эмиттера транзистора, включенного по схеме с ОБ, если изменение тока коллектора на 3 мА вызвало изменение тока эмиттера на 3,7 мА.

**Задача 6.19.** Определите коэффициент усиления тока биполярного транзистора в схеме с ОБ, если коэффициент усиления тока в схеме с ОЭ  $\beta = 24$ .

**Задача 6.20.** Биполярный транзистор включен по схеме с ОБ. При изменении входного напряжения на 0,01 В ток эмиттера изменился на 0,5 мА. ток коллектора — на 0,48 мА, выходное напряжение — на 6 В. Определите входное и выходное динамические сопротивления транзистора, а также коэффициент усиления напряжения и мощности.

**Задача 6.21.** Используя характеристики транзистора, приведенные на рис. 1.26, постройте нагрузочную характеристику для случая, когда  $E_K = 20$  В,  $R_K = 400$  Ом, определите ток коллектора и напряжение  $U_{КЭ}$  для всех указанных на графике значений тока базы.

**Задача 6.22.** Используя семейство выходных характеристик, представленных на рис. 1.26, б, постройте нагрузочные характеристики для случая, когда  $E_K = 12$  В,  $R_{K1} = 1$  кОм,  $R_{K2} = 2$  кОм,  $R_{K3} = 3$  кОм. Объясните, как влияет величина  $R_K$  на наклон нагрузочной характеристики.

**Задача 6.23.** В биполярном р-п-р транзисторе ток утечки  $I_{к60} = 100$  нА. При включении по схеме с общим эмиттером для получения общего тока коллек-

тора 1 мА ток базы должен быть равен 10 мкА. Определить коэффициент усиления по постоянному току для этого транзистора и ток утечки  $I_{кэ0}$ .

**Задача 6.24.** Пусть биполярный p-n-p транзистор имеет следующие параметры: эффективность эмиттера 99%, коэффициент переноса 99,5%, коэффициент ударной ионизации 100% ( $M = 1$ ). Вычислить ток коллектора, если ток базы равен 20 мкА, а ток утечки коллектора – база при разомкнутой цепи эмиттера составляет 1 мкА.

**Задача 6.25.** В биполярном p-n-p транзисторе коэффициент усиления по постоянному току  $\alpha = 0,98$ . Между базой и эмиттером поддерживается такая разность потенциалов, при которой ток эмиттера равен 5 мА. Определить токи базы и коллектора, если  $I_{кб0} = 10$  мкА.

**Задача 6.26.** В биполярном p-n-p транзисторе коэффициент усиления по постоянному току  $\alpha = 0,98$ . Между базой и эмиттером поддерживается такая разность потенциалов, при которой ток эмиттера равен 5 мА. Определить токи базы и коллектора, если  $I_{кб0} = 10$  мкА.

**Задача 6.27.** В биполярном p-n-p транзисторе, включенном по схеме с общей базой, коэффициент усиления по постоянному току  $\alpha = 0,98$ . Определить ток эмиттера при котором ток базы будет равен нулю.

## Практическое занятие 6 к Лекции №7 ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ, ФОТОТРАНЗИСТОРЫ, ТИРИСТОРЫ.

### Вопросы и задания для самостоятельного решения.

**Вопрос 7.1.** Перечислите основные достоинства полевых транзисторов по сравнению с биполярными транзисторами.

**Вопрос 7.2.** Укажите полярность источников питания полевого транзистора, схема включения которого приведена на рис. 7.1.

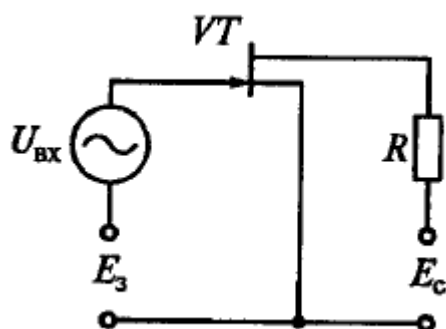


Рисунок 7.1. Схема включения полевого транзистора

**Вопрос 7.3.** Как влияет положительное напряжение на изолированном затворе МОП-транзистора на сечение канала и его сопротивление?

**Вопрос 7.4.** Как работает МОП-транзистор в режиме обогащения?

**Вопрос 7.5.** Какие носители заряда обеспечивают рабочий ток в полевых транзисторах?

**Вопрос 7.6.** Почему МОП-транзисторы получили в настоящее время большее распространение по сравнению с биполярными транзисторами?

**Вопрос 7.7.** Начертите схему включения с общим истоком полевого транзистора с индуцированным каналом, если транзистор выполнен на кристалле из полупроводника n-типа. Можно ли изменять полярность напряжения при включении этого транзистора?

**Задача 7.1.** Используя характеристики полевого транзистора с р – n- переходом и каналом n-типа (см. рис. 7.2), определите ток стока, если на затвор полевого транзистора подается напряжение  $U_{зи} = -4$  В.



**Задача 7.2.** Используя семейство входных характеристик (рис. 7.2, а), определите входное сопротивление полевого транзистора постоянному и переменному току, если  $U_{зи} = 3$  В (характеристика 4),  $U_{си} = 10$  В.

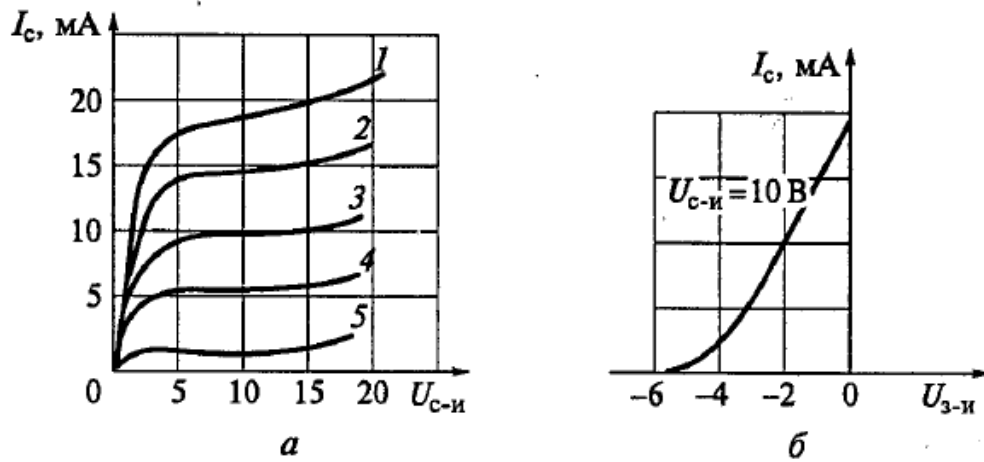


Рисунок 7.2. Входные и переходная характеристики полевого транзистора с р n-переходом и каналом n-типа .