

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

## **ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления  
210100 – Электроника и микроэлектроника  
(Специальность 210105 – Электронные приборы и устройства)

2012

## **Орликов Леонид Николаевич**

Твердотельные приборы: методические указания к практическим занятиям для студентов направления 210100 – Электроника и микроэлектроника (Специальность 210105 – Электронные приборы и устройства)/ Л.Н. Орликов. Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. – 15 с.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 210100 – Электроника и микроэлектроника (Специальность 210105 – Электронные приборы и устройства) по курсу «Твердотельные приборы».

© Орликов Леонид Николаевич, 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов направления  
210100 – Электроника и микроэлектроника  
(Специальность 210105 – Электронные приборы и устройства)

Разработчик

\_\_\_\_\_ Л.Н. Орликов  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

## Содержание

1	Введение.....	5
2	Полупроводниковые диоды .....	5
2.1	Примеры решения задач по теме.....	5
2.2	Задачи для проработки темы.....	6
3	Биполярные транзисторы .....	6
3.1	Примеры решения задач по теме.....	6
3.2	Задачи для проработки темы.....	10
4	Полевые транзисторы .....	10
4.1	Примеры решения задач по теме.....	10
4.2	Задачи для проработки темы.....	11
5	Свервысокочастотные (СВЧ).....	11
5.1	Примеры решения задач по теме.....	11
5.2	Задачи для проработки темы.....	16
6	Фотоприемники .....	16
5.1	Основные понятия.....	16
5.2	Примеры решения задач по теме.....	17
5.3	Задачи для проработки темы.....	19

## 1 Введение

Настоящее пособие составлено с целью облегчить и углубить изучение электронных приборов и устройств на их основе. Задачи составлены на основе общих закономерностей протекания тока в электронных приборах. Формулы для вычислений взяты из лекционного материала. В ряде случаев рекомендуется проанализировать принцип работы электронного прибора.

В предлагаемом пособии приводится значительное число узловых задач с решениями. Решение задач позволяет уяснить физический смысл явлений, закрепляет навыки применения теоретических знаний. Это позволяет развить навыки самостоятельной работы и делать расчеты в условиях, приближенных к практике. Значительное место уделено полупроводниковым приборам, как основе для развития современной электроники. В пособии рассматриваются задачи на применение полупроводниковых диодов, биполярных и полевых транзисторов, приборов сверхвысоких частот, фотоэлектронных приборов.

## 2 Полупроводниковые диоды

### 2.1 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** Электронный прибор – идеальный диод включен в схему по рис.2.1. Входное напряжение  $U_{вх} = 40$  В. Сопротивление в цепи диода  $R = 20$  кОм. Определить выходное напряжение.

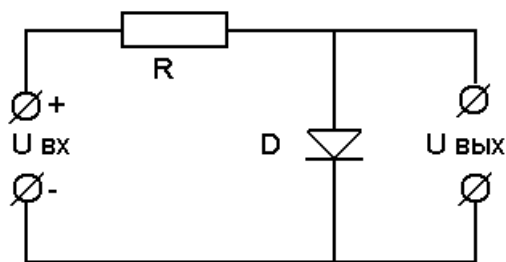


Рисунок 2.1– Схема включения диода

*Решение.* Поскольку на диод подано обратное смещение, то можно предположить, что обратное сопротивление диода составляет несколько сотен килоом. Следовательно, можно считать, что практически все напряжение падает на диоде, т. е.  $U_{вых} = 15$  В.

**Задача 2.** Определить выходное напряжение в схеме по рис. 2.1, если при комнатной температуре используется кремниевый диод, имеющий тепловой ток  $I_0 = 10$  мкА.

**Решение.**

Поскольку на диод подано прямое смещение, то сопротивление кремниевых диодов будет определяться в основном сопротивлением резистора  $R_H = 20 \text{ кОм}$ . Следовательно,  $I = 40 / 20 \cdot 10^3 = 2 \text{ мА}$ . Подставив это значение в уравнение для тока полупроводникового диода и решив его относительно  $U$ , получим следующее:

$$I = I_0 \cdot (e^{eU/kT} - 1); \quad 2 \text{ мА} = 10 \text{ мкА} \cdot (e^{eU/kT} - 1); \quad e^x = 201;$$

$$x = eU/kT = 5,31; \quad kT/e \approx 26 \text{ мВ}.$$

$$\text{Следовательно, } U = 5,31 \cdot 26 \text{ мВ} = 0,138 \text{ В} \approx 0,14 \text{ В}$$

**2.2 Задачи для проработки темы**

**Задача 2.1.** Построить вольт-амперную характеристику идеального полупроводникового диода при комнатной температуре, если тепловой ток  $I_0 = 15 \text{ мкА}$ . Расчет провести в интервале напряжения от 0 до 0,2 В (через 0,05 В).

**Задача 2.2.** Некоторый диод имеет тепловой ток  $I_0 = 10 \text{ мкА}$ , приложенное напряжение равно 0,5 В. Пользуясь упрощенным уравнением вольт-амперной характеристики, найти отношение прямого тока к обратному.

$$\text{Ответ: } 21,8 \times 10^7$$

**Задача 2.3.** Ступенчатый германиевый  $p-n$ - переход имеет площадь поперечного сечения  $\Pi = 1 \text{ мм}^2$ . Область  $p$  сильно легирована, так, что ее удельная проводимость в несколько раз больше удельной проводимости  $n$ -области. Удельное сопротивление  $n$ -области равно  $5 \text{ ом/см}$ , а время жизни носителей заряда равно  $\tau = 50 \text{ мкс}$ . Определить:

А) тепловой поток  $I_0$ ,

Б) прямое напряжение, при котором ток равен 1 мА.

$$\text{Ответ: } I_0 = 3,1 \text{ мкА}, \quad U_{\text{пр}} = 0,15 \text{ В}.$$

**Задача 2.4.** Определить высоту потенциального барьера кремниевого диода со ступенчатым  $p-n$ - переходом, если  $N_a = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $N_d = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$

$$\text{Ответ: } \phi_k = 0,359 \text{ В}$$

**3 Биполярные транзисторы****3.1 Примеры решения задач по теме**

**Задача 1.** В полупроводниковом приборе (транзисторе) на рис.3.1. приведено примерное распределение концентрации частиц.

В транзисторе  $n-p-n$  избыточная концентрация электронов на эмиттерном переходе равна  $10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Площади переходов одинаковы и равны

$1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Постройте график примерного распределения концентрации электронов в области базы и определите ток коллектора, если эффективная ширина базы  $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ , при  $T=300 \text{ К}$  подвижность электронов  $\mu = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

**Решение.** Предположим, что ширина базы много меньше диффузионной длины электронов (неосновных носителей), концентрация акцепторных примесей в базе значительно ниже концентрации донорных примесей в эмиттере и коллекторе, в базовой области отсутствует рекомбинация носителей, т. е. распределение электронов в базе линейное, концентрация неосновных носителей на коллекторном переходе равна нулю.

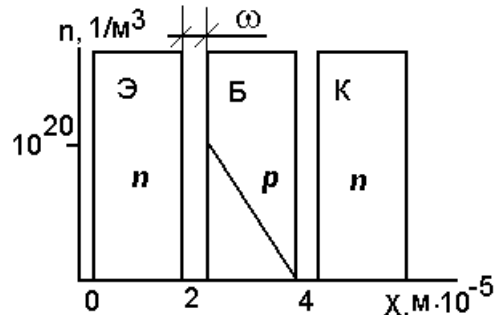


Рисунок 3.1 – Примерное распределение концентрации частиц в полупроводниковом приборе

Исходя из этих допущений, построим примерное распределение концентрации электронов в базе (рис. 3.1).

Плотность тока неосновных носителей заряда (электронов) в базе

$$j_n = e D_n \frac{dn_z}{dx}$$

Коэффициент диффузии вычислим из соотношения Эйнштейна:

$$D_n / \mu_n = kT / e$$

откуда

$$D_n = kT \mu_n / e = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 0,39 / (1,602 \cdot 10^{-19}) = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$$

Определим градиент концентрации электронов в базе:

$$\frac{dn_z}{dx} = -\frac{10^{20}}{4 \cdot 10^{-5}} = -0,25 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-4}$$

Принимая за положительное направление ток коллектора в активном режиме, имеем:

$$I_K \approx -j_n \Pi = -e D_n \frac{dn_z}{dx} \Pi = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,25 \cdot 10^{25} \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 4 \text{ мА}$$

**Задача 2.** В  $p-n-p$ -транзисторе площади  $\Pi$  эмиттерного и коллекторного переходов одинаковы и равны  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , коэффициент диффузии дырок в базе  $D_p = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ . При  $U_{КБ} = -1 \text{ В}$  распределение концентраций дырок в базе имеет вид, показанный на рис. 3.2.

Требуется: а) пренебрегая токами утечки, определить ток эмиттера, обусловленный дырками; б) вычислить дифференциальное сопротивление между коллектором и базой при  $U_{КБ} = -16 \text{ В}$ , если толщина обедненного носителями заряда слоя коллекторного перехода  $\omega_k = (1 + \sqrt{|U_{КБ}|}) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

Предположить, что условия на переходе эмиттер — база не изменяются и соответствуют условиям, показанным на рис. 3.2.

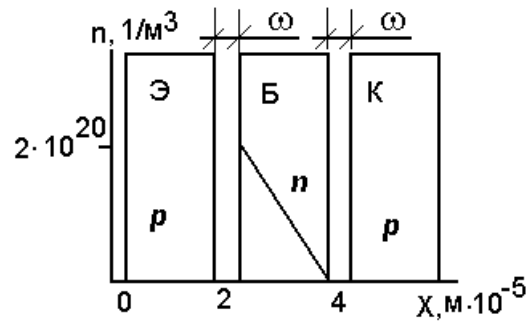


Рисунок 3.2 – Схема  $p-n-p$ -транзистора

**Решение.** Плотность дырочного тока в базе

$$j_p = -eD_p \frac{dp_p}{dx}$$

дырочный ток эмиттера

$$I_p = -eD_p \frac{dp_p}{dx} \Pi$$

Градиент концентрации дырок (см. рис. 2.2)

$$\frac{dp_p}{dx} = -\frac{p_p}{\omega} = -\frac{2 \cdot 10^{20}}{2 \cdot 10^{-5}} = -1 \cdot 10^{25} \text{ дырок/м}^4$$

Следовательно,

$$I_p = j_p \Pi = -eD_p \frac{dp_p}{dx} \Pi = 1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 4.7 \cdot 10^{-4} (1 \cdot 10^{25}) \cdot 10^{-6} = 7.5 \text{ мА}$$

Ток коллектора

$$I_K = eD_p \Pi p_p / (\omega_{\text{полн}} - \omega_K) = eD_p \Pi p_p / \omega$$

где  $\omega$  — эффективная ширина базы.

Следовательно,

$$\omega_{\text{полн}} = \omega + \omega_K = 2 \cdot 10^{-5} + (1 + \sqrt{|U_{\text{КБ}}|}) \cdot 10^{-6};$$

при  $U_{\text{КБ}} = -1 \text{ В}$   $\omega_{\text{полн}} = 2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-6} = 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ , тогда

$$I_K = \frac{eD_p \Pi p_p}{[\omega_{\text{полн}} - (1 + \sqrt{|U_{\text{КБ}}|}) \cdot 10^{-6}]}$$

Продифференцируем это выражение по  $U_{\text{КБ}}$ :

$$\left| \frac{dI_K}{dU_{\text{КБ}}} \right| = \frac{eD_p \Pi p_p (+|U_{\text{КБ}}|^{-1/2}/2) \cdot 10^{-6}}{[\omega_{\text{полн}} - (1 + \sqrt{|U_{\text{КБ}}|}) \cdot 10^{-6}]^2}$$

При  $U_{\text{КБ}} = -16 \text{ В}$

$$\left| \frac{dI_K}{dU_{\text{КБ}}} \right| = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 4.7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{20} (16^{1/2}/2) \cdot 10^{-6}}{[2.2 \cdot 10^{-5} - (1 + \sqrt{16}) \cdot 10^{-6}]^2} = \frac{1.88 \cdot 10^{-14}}{2.89 \cdot 10^{-10}} \text{ См.}$$



## Дифференциальное сопротивление

$$r_{кБ} = \left| \frac{dU_{кБ}}{dI_{кБ}} \right| = \frac{2.89 \cdot 10^{-10}}{1.88 \cdot 10^{-14}} \approx 15.4 \text{ кОм}$$

**Задача 3.** Прямой ток эмиттера транзистора *n-p-n* составляет  $I_э = 2$  мА, коллекторная цепь разорвана. Определить:

- напряжение на эмиттерном и коллекторном переходах;
- напряжение эмиттер–коллектор, полагая  $I_{кБ0} = 2$  мкА,  $I_{эБ0} = 1.6$  мкА,  $\alpha = 0.98$ . В каком режиме работает транзистор?

**Решение.**

$$1. \quad I_к = 0, I_э = 2 \text{ мА и } U_{БЭ} = U_T \ln(1 + I_э/I_{эБ0}),$$

откуда

$$U_{БЭ} = 0.026 \ln [1 + 2/(1.6 \cdot 10^{-3})] = 0.026 \ln (1250) = 0.1853 \text{ В.}$$

Напряжение база— коллектор

$$U_{БК} = U_T \ln(1 + \alpha I_э/I_{кБ0}) = 0.026 \ln \left( 1 + \frac{0.98 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-6}} \right) = 0.179 \text{ В}$$

Следовательно, транзистор работает в режиме насыщения.

2. Напряжение эмиттер — коллектор

$$U_{ЭК} = U_{БК} - U_{БЭ} = 0.179 - 0.1853 = -0.0063 \text{ В.}$$

**Задача 4.** Определить остаточное напряжение  $U_0$  транзистора, работающего при  $T = 300$  К и имеющего следующие параметры:  $I_к = 10$  мкА,  $I_Б = 20$  мкА;  $\alpha = 0.95$ ,  $\alpha_1 = 0.7$ .

Включение прямое, сопротивлениями объемов областей коллектора и эмиттера пренебречь.

**Решение.** Остаточное напряжение транзистора  $U_0$  — это напряжение между эмиттером и коллектором транзистора в режиме насыщения. Оно определяется разностью напряжений на открытых коллекторном и эмиттерном переходах. Остаточное напряжение

$$U_0 = U_{кЭ} = \frac{kT}{e} \ln \left[ \alpha_1 \frac{1 - I_к/(I_Б\beta) + I_{кБ0}/(I_Б\alpha)}{1 - I_к/[I_Б(1 + \beta)] + I_{эБ0}/I_Б} \right]$$

Учитывая, что

$$I_к/I_Б = 10/20 = 0.5, \beta = \alpha/(1 - \alpha) = 0.95/(1 - 0.95) = 19,$$

$$\beta_1 = \alpha_1/(1 - \alpha_1) = 0.7/(1 - 0.7) = 2.33$$

и пренебрегая членами уравнения, содержащими  $I_{кБ0}/I_Б$ ,  $I_{эБ0}/I_Б$ , получаем

$$U_0 = 26 \cdot 10^{-3} \ln (0.7 \cdot 0.974 / 1.15) = 14 \text{ мВ.}$$

**Задача 5.** В *n-p-n*-транзисторе концентрация доноров в эмиттере  $N_д = 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , концентрация акцепторов в базе  $N_а = 10^{22} \text{ м}^{-3}$ . Считая, что подвижность электронов и дырок равны  $0.4$  и  $0.2 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  соответственно, определить отношение дырочного тока к электронному на переходе эмиттер — база.

**Решение.** Отношение дырочного тока к электронному на *p-n*-переходе примерно равно отношению удельных проводимостей материалов базы и

эмиттера, которые составляют  $p$ - $n$ -переход, для любых напряжений смещения. Следовательно,

$$I_p/I_n = \sigma_p/\sigma_n = e\mu_p N_a / (e\mu_n N_d)$$

где  $N_a$  и  $N_d$ —концентрации акцепторов и доноров.

В рассматриваемом случае

$$I_p/I_n = 10^{22} \cdot 0,2 / (10^{24} \cdot 0,4) = 1/200.$$

### 3.2 Задачи для проработки темы

**Задача 3.1.** Какое влияние оказывает на эффективность эмиттера и коэффициент переноса увеличение проводимости области базы в двух случаях: а) при пропорциональном изменении проводимости эмиттерной области; б) при неизменной проводимости эмиттерной области.

**Задача 3.2.** Объясните, почему при изменении проводимости области базы изменяется коэффициент передачи тока эмиттера.

**Задача 3.3.** Покажите, что отношение дырочного тока к электронному  $I_{p3}/I_{n3}$  протекающих через эмиттерный переход, прямо пропорционально отношению проводимостей материала  $p$ -типа к проводимости  $n$ -типа.

## 4 Полевые транзисторы

### 4.1 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** В усилителе, показанном на рис. 4.1, при  $|U_{3И}| = 2$  В ток стока  $I_c = 1$  мА. Определить:

- сопротивление резистора  $R_{И}$ , если падением напряжения  $I_c R_3$  пренебречь;
- $E_c$ , если  $R_{И} = 10$  кОм,  $U_{СИ} = 4$  В.

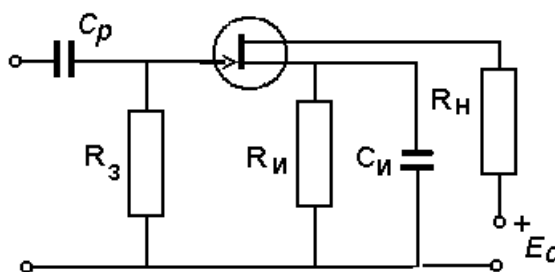


Рисунок 4.1 – Схема с полевым транзистором

**Решение:**

а)  $R_{И} = |U_{3И}| / I_c = 2,0 / (1 \cdot 10^{-2}) = 2$  кОм;

б)  $E_c = I_c R_{И} + U_{СИ} + I_c R_{И} = 10 + 4 + 2 = 16$  В.

**Задача 2.** В усилительном каскаде с общим истоком сопротивление нагрузки  $R_H = 20 \text{ кОм}$  (рис 4.1). Эффективное входное сопротивление полевого транзистора  $20 \text{ кОм}$ , рабочая крутизна  $S = 2 \text{ мА/В}$ . Определить коэффициент усиления каскада.

**Решение:**

$$Z_H = \frac{1}{1/20 + 1/20} = 10 \text{ кОм}$$

Результирующее сопротивление нагрузки

Коэффициент усиления каскада

$$K_u = SZ_H = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 20$$

## 4.2 Задачи для проработки темы

**Задача 4.1.** Выводы электродов полевого транзистора маркированы  $A, B, C$ . Сопротивление между выводами  $BC$  с оборванным проводом  $A$ , равно  $300 \text{ Ом}$  и не зависит от полярности напряжения. При напряжении  $-2 \text{ В}$ , приложенном к  $A$  и  $B$ , течет ток  $10^{-11} \text{ А}$ . Какой вывод соединен с затвором? Какого типа канал ( $n$  или  $p$ ) имеет данный транзистор.

Ответ:  $A$  – затвор, канал  $p$ - типа

**Задача 4.2.** Покажите, что если полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ - переходом работает при достаточно низком напряжении сток- исток, то его можно представить в виде резистора с сопротивлением:

$$R = R_0 [1 - (|U_{зи}| / U_{отс})^{0,5}]^{-1}$$

где  $R_0$ - сопротивление канала при нулевом напряжении затвор-исток.

**Задача 4.3.** Удельная проводимость канала  $n$ -типа полевого транзистора  $\delta = 20,9 \text{ См/м}$  и ширина канала  $\omega = 6 \text{ мкм}$  при напряжении затвор-исток, равном нулю. Найти напряжение отсечки  $U_{отс}$ , считая, что подвижность электронов  $\mu_n = 0,13 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , а относительная диэлектрическая проницаемость кремния  $\epsilon = 12$ .

## 5 Сверхвысокочастотные (СВЧ)

### 5.1 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** Для электронного прибора магнетрона записать векторное уравнение движения электрона в постоянных скрещённых электрическом и магнитном полях. Составить скалярные уравнения движения в декартовой системе координат. Привести начальные условия. Предложить метод решения системы скалярных уравнений.

**Решение.** Пусть имеется диод с плоскими электродами. Между анодом и катодом – вакуум. Между электродами приложено постоянное напряжение. Пусть имеются постоянное магнитное и электрическое поле. Выберем систему декартовых координат:

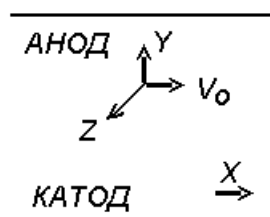


Рисунок 5.1 – Электрон в пространстве между катодом и анодом, под действием полей

Вычислим траекторию электрона, который вылетает из начала координат со скоростью  $V_0$ , которая направлена по оси  $x$ . Будем считать электрон точечной частицей, обладающей массой  $m$  зарядом  $e$ . Согласно классической механике запишем векторное уравнение движения электрона в векторной форме:

$$m \frac{dV}{dt} = -e(E + [VB]),$$

где  $m$  – масса электрона;  $e$  – заряд электрона;  $V$  – вектор скорости;  $\frac{dV}{dt}$  – ускорение;  $E$  – вектор электрического поля;  $[VB]$  – векторное произведение скорости на магнитную индукцию;  $eE$  – сила, действующая на электрон со стороны постоянного электрического поля (сила Кулона);  $e[VB]$  – сила, действующая на электрон со стороны постоянного магнитного поля (сила Лоренца).

Записанное выражение – дифференциальное уравнение первого порядка относительно скорости  $V$ .

Для любого дифференциального уравнения нужны начальные условия. Запишем их.

Пусть в начальный момент времени скорость электрона имеет единственную составляющую:

$$V = V_0; x = 0, y = 0, z = 0.$$

Решим это дифференциальное уравнение. Для этого запишем проекции этого векторного уравнения на декартовы оси координат. Мы имеем одно векторное уравнение. Оно эквивалентно трем скалярным уравнениям. Запишем скалярные уравнения – проекции левой и правой частей на оси  $x, y, z$ .

Точкой над символом обозначим производные.

На ось  $x$ :

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}, \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Сила, действующая на электрон со стороны магнитного поля определяется по правилу левой руки. Пусть электрон имеет составляющую в скорости по оси  $y$  -  $\dot{y}$ .

$$m\ddot{x} = e\dot{y}B$$

Электрон движется вверх, а вектор тока направлен в противоположную сторону.

На ось  $y$ :

$$m\ddot{y} = eE - e\dot{x}B$$

На ось  $z$ :

$$m\ddot{z} = 0$$

Запишем НУ при  $t = 0$  :

$$x = 0, y = 0, z = 0.$$

НУ для скоростей:

$$\dot{x} = V_0, \dot{y} = 0, \dot{z} = 0.$$

Решим эти дифференциальные уравнения с использованием начальных условий. Проинтегрируем уравнение  $m\ddot{z} = 0$ .

$$\int \ddot{z} dz = \int 0 dz \Rightarrow \dot{z} = 0,$$

$$\int \dot{z} dz = \int 0 dz \Rightarrow z = 0.$$

**Вывод:** электрон движется в плоскости  $xOy$ , а  $z$  всё время = 0.

Теперь необходимо решить два дифференциальных уравнения с использованием НУ:

$$m\ddot{x} = e\dot{y}B,$$

$$m\ddot{y} = eE - e\dot{x}B.$$

Чтобы решить эти уравнения введем комплексные переменные. Введем функцию  $u = jx + y$ , где  $j = \sqrt{-1}$ . Теперь мы можем записать первое уравнение и решить его. Введем циклотронную частоту (та частота, с которой вращается электрон в магнитном поле):

$$\omega_y = B \frac{e}{m}.$$

Запишем уравнения:

$$\ddot{x} = \dot{y}\omega_y,$$

$$\ddot{y} = \frac{e}{m}E - \omega_y\dot{x}.$$

Переходим к переменной  $U$ , равной:

$$U = jx + y$$

Заменим два дифференциальных уравнения одним. Для этого первое уравнение умножим на  $j$  и сложим со вторым:

$$\frac{d^2 U}{dt^2} - j\omega_y \frac{dU}{dt} = \frac{e}{m} E(*)$$

Мы получили одно дифференциальное уравнение второго порядка с правой частью.

$$\text{При } t = 0: u = 0, \dot{U} = jV_0$$

Как известно, линейное дифференциальное уравнение второго порядка с правой частью имеет решение – сумму частного и общего решения однородного уравнения. Запишем частное решение дифференциального уравнения:

$$U_1 = j \frac{E}{B} t + c,$$

где  $c$  – константа. Подставим в (\*):

$$0 - j\omega_y j \frac{E}{B} = \frac{e}{m},$$

$$\omega_y \frac{E}{B} = \frac{e}{m} E,$$

$$\frac{\omega_y}{B} = \frac{e}{m},$$

так как

$$\omega_y = B \frac{e}{m},$$

$$\frac{e}{m} = \frac{e}{m},$$

Получаем верное равенство. Теперь запишем общее решение:

$$U_2 = Ae^{j\omega_y t},$$

где  $A$  – произвольная постоянная. Решение уравнения примет вид:

$$U(t) = U_2 + U_1 = Ae^{j\omega_y t} + j \frac{E}{B} t + c.$$

Используя начальные условия определим постоянные интегрирования. Получим:

$$A = -C$$

$$A = \frac{1}{\omega_y} \left( V_0 - \frac{E}{B} \right) = -R.$$

Величина  $R = \frac{1}{\omega_y} \left( \frac{E}{B} - V_0 \right)$  имеет размерность длины. От функции

$U(t)$  вернемся к  $x(t)$ . Отделив мнимую и действительную части, получим:

$$x - \frac{E}{B} t = -R \sin(\omega_y t),$$

$$y - R = -R \cos(\omega_y t).$$

Это два уравнения – параметрические уравнения траектории электрона.

### Анализ траектории

Возведем в квадрат эти выражения и сложим:

$$\left(x - \frac{E}{B}t\right)^2 + (y - R)^2 = R^2 \text{ - это уравнение циклоиды.}$$

Мы получили уравнение плоской кривой, которую описывает точка, связанная с окружностью, центр которой перемещается вдоль прямой  $x$  со скоростью  $V_{ц} = E/B$ . Точка описывает окружность радиуса  $R$ .

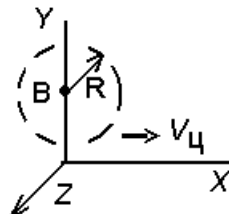


Рисунок 5.2 – Траектория движения электрона вокруг силовой линии магнитного поля

Переносная скорость центра диска

$$V_{ц} = E/B.$$

Она не зависит от начальной скорости  $V_0$ .

$R$  зависит от начальной скорости электрона.

$$\text{Введём радиус } r = \frac{V_{ц}}{\omega_{ц}} = \frac{E}{B} \cdot \frac{m}{B \cdot e} = \frac{m}{e} \cdot \frac{E}{B^2}.$$

Рассмотрим частные случаи движения электронов в скрещённых полях. Рассмотрим траекторию электронов при разных значениях начальной скорости.

Пример 1.  $V > 0$ ,  $R < r$

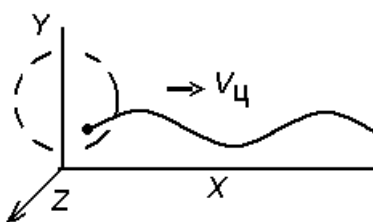


Рисунок 5.3– Траектория движения электрона при смещении точки входа электрона относительно силовой линии магнитного поля (укороченная циклоида).

Пример 2.  $V = 0$ ,  $R = r$

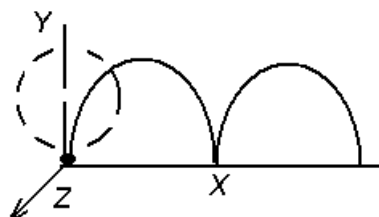


Рисунок 5.4 – Схема движения электрона при  $V = 0$ ,  $R = r$  (по циклоиде)

Пример 3.  $V < 0$ ,  $R > r$

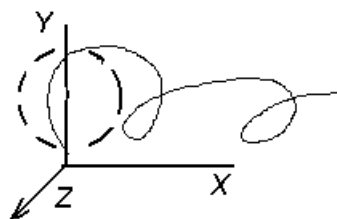


Рисунок 5.5 – Схема движения электрона при  $V < 0$ ,  $R > r$  (по удлинённой циклоиде)

Рассмотрим ещё один случай:

При  $V_0 = \frac{E}{B}$ ,  $R = 0$ , электрон будет двигаться по прямой вдоль электродов с постоянной скоростью  $V_0$ . Это условие используется в приборах М-типа ЛБВ.

## 5.2 Задачи для проработки темы

**Задача 5.1.** База в германиевом транзисторе типа  $n-p-n$  имеет ширину 0,025 мм. Определить:

- время, необходимое неосновным носителям для пролета базы,
- время, необходимое неосновным носителям для пролета базы, в аналогичном транзисторе типа  $p-n-p$ .

**Ответ:** а)  $3,1 \times 10^{-8}$  сек; б)  $6,38 \times 10^{-8}$  сек

## 6 Фотоприемники

### 5.1 Основные понятия

*Чувствительность фотоприемников (ФП)* – определяется тем, насколько сильно изменяются его характеристики при облучении светом:

- токовая чувствительность – это:

$$S_i = \Delta I_{\phi} / \Delta \Phi,$$

где  $\Delta \Phi$  [Вт · лм] - изменение потока излучения, падающего на прибор;

- вольтовая чувствительность – это:

$$S_v = U_{\phi} / \Phi.$$

Чувствительность зависит от  $G$  ( $G$  – скорость генерации пар).

*Квантовый выход внутреннего фотоэффекта.*  $\eta_1$  - определяет, сколько неравновесных носителей (пар), созданы каждым поглощенным фотоном.

*Определение скорости генерации пар  $G$ .* Пусть на единичную поверхность приемника по направлению  $x \perp$  этой поверхности, падает поток  $\Phi_1(x)$  (плотность потока излучения). Зная, что  $-d\Phi_1(x) = \alpha \Phi_1(x) dx$ , получим, что поглощаемая энергия в расчете на 1 см<sup>3</sup> составляет:

$$-\frac{d\Phi_1}{dx} = \alpha \Phi_1.$$



Число  $Q_I$  фотонов, поглощенных за 1с в  $1 \text{ см}^3$  на глубине  $x$  таково:

$$Q_I = \frac{\alpha \Phi_1}{h\nu}.$$

Число неравновесных носителей, возникающих в 1с в  $1 \text{ см}^3$  (скорость образования носителей):

$$G(x) = \eta_1 Q_I(x) = \eta_1 \frac{\alpha \Phi_1}{h\nu}.$$

В области собственного поглощения  $\eta_1 = 1$ , а  $Q_I \sim \frac{1}{V}$ , поэтому при  $\Phi_1 = \text{const}$  скорость генерации  $G$  уменьшается обратно пропорционально частоте, чем больше  $\nu$ , тем меньше  $G$ . У фотоприемника существует зависимость  $I_\phi = f(G)$ . В лавинных фотодиодах, фоторезисторах, фототранзисторах коэффициент усиления, зависит от  $E$ :

$$I_\phi = f [G(x) \cdot K_{yc}(E)], \quad K_{yc}(E)$$

Фотодиоды инерционны. Инерционность характеризуется постоянной времени нарастания и спада фототока. Фототок уменьшается по закону:

$$I_\phi = I_M \exp(-t/\tau_2),$$

где  $\tau_2$  - постоянная времени нарастания.

*Пороговая чувствительность* – это уровень светового потока  $\Phi_n$ , когда сигнал равен шуму, т. е.  $\bar{I}_\phi^2 = \Delta \bar{I}^2$ . Т. к.  $\sqrt{\Delta \bar{I}^2}$  и  $\Phi_n$  могут зависеть от площади  $S$  приемника и полосы  $\Delta f$ , то

$$\Phi_n^* = \frac{\Phi_n}{\sqrt{S \cdot \Delta f}},$$

где  $\Phi_n^*$  - приведенный пороговый ток.

## 5.2 Примеры решения задач по теме

**Задача 1.** Вычислить энергию фотонов для фотоэлемента. Работа выхода. Уравнение фотоэффекта Эйнштейна.

**Решение:**

- а) вычислим энергию фотонов в ультрафиолетовой (УФ) области спектра ( $\lambda=330$  и  $250 \text{ Нм}$ );
- б) желтого света ( $\lambda=580 \text{ Нм}$ );
- в) красного света ( $\lambda=644 \text{ Нм}$ ).

**Задача 2.** Свет падает на поверхность натрия, работа выхода которого равна  $2,11 \text{ эВ}$ . Найдите максимальные скорости всех фотоэлектронов, если длина волны падающего света принимает указанные выше значения.

**Решение:**

Подставив в формулу  $E=h \cdot \nu = hc/\lambda = 1,24/\lambda$  значения, получим:

- а)  $1,24/0,33=3,76 \text{ эВ}$ ;
- б)  $1,24/0,589=2,11 \text{ эВ}$ ,  $1,24/0,25=4,96 \text{ эВ}$ ;
- в)  $1,24/0,644=1,93 \text{ эВ}$ .

Скорости фотоэлектронов, обладающих наибольшей энергией, определяется из уравнения Эйнштейна

$$(1/2)mv_{\max}^2 = h\nu - \phi,$$

где  $\phi$  - фотоэлектрическая работа выхода данного материала, а  $h\nu$ -энергия падающего излучения.

При освещении красным светом электроны испускаться не будут.

На длине  $\lambda$  желтого света энергии равны (хотя электроны имеют достаточную энергию выхода для преодоления потенциального барьера, но они остаются на поверхности).

В УФ электроны эмигрируют с максимальными скоростями:

для  $\lambda=0,33$  мкм

$$v_{\max} = \sqrt{2(h\nu - \phi)m} = \sqrt{2(3,76 - 2,11) \cdot 1,6^{-19} / 9,11 \cdot 10^{-31}} = 0,76 \cdot 10^6 \text{ м/с},$$

для  $\lambda=0,25$  мкм

$$v_{\max}=1,0 \cdot 10^6 \text{ м/с} \quad v_{\max}=1,0 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

**Задача 3.** Уравнение фотоэффекта Эйнштейна. Фотоэлектрическая работа выхода для калия равна 2,0 эВ. На поверхность калия падает свет  $\lambda=0,35$  мкм.

Определить:

- запирающий потенциал  $V_s$ ;
- кинетическую энергию  $E_k$  самых быстрых электронов;
- скорости этих электронов;
- вычислить, насколько изменится запирающий потенциал, если длина волны уменьшится до 348 Нм.

**Решение:** Энергия фотона  $E=1,24/\lambda$  эВ,

$$E=1,24/0,35=3,54 \text{ эВ}.$$

Энергия эмитированного электрона ( $E_e$ ) представляет собой разность между энергией падающего излучения и работой выхода материала  $\phi$ , т.е.

$$E_e = E_{\text{изл}} - \phi = 3,54 - 2 = 1,54 \text{ эВ}.$$

Запирающий потенциал будет  $V_s=1,54$  эВ.

$E_k$  наиболее быстрых электронов также равна 1,54 эВ.

Скорость наиболее быстрых электронов определяется как

$$(1/2)mv^2 = 2,46 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$$v_{\max}=0,74 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Уравнение Эйнштейна

$$(1/2)mv^2 = h\nu - \phi \text{ или } e \cdot V_s = (hc/\lambda) - \phi,$$

предполагая, что  $\lambda$  мало, запишем в дифференциальной форме:

$$\delta V_s = hc/l - \delta\lambda/\lambda^2.$$

Поскольку  $\delta\lambda=348-350$  Нм, а  $\lambda=350$  Нм, получаем, что запирающий потенциал уменьшается на величину  $\delta V_s=20,4$  мВ.

### 5.3 Задачи для проработки темы

**Задача 5.1.** В девятикаскадном фотоэлектронном умножителе ток эмиссии фотокатода равен  $10^{-8}$  А, а выходной ток составляет 100 мА. Найти коэффициент вторичной эмиссии материала электродов.

Ответ: примерно 6.

**Задача 5.2.** Определить коэффициент вторичной эмиссии одного эмиттера фотоумножителя ФЭУ-19, состоящего из 13 каскадов, если известно, что общий коэффициент усиления составляет  $10^6$ .

Ответ: примерно 3.

**Задача 5.3.** Чувствительность фотоэлемента при рабочем анодном напряжении равна 14 мкА/лм, площадь окна фотоэлемента  $\Pi=10$  см<sup>2</sup>. Горизонтально направленная сила света лампы накаливания равна 100 кд. Определить:

а) фототок, если фотоэлемент расположить на расстоянии  $l=50$  см от лампы;

б) значение анодного тока, если в приборе, помимо указанного фотокатода, будет помещено еще девять эмиттеров, каждый с коэффициентом вторичной эмиссии  $\sigma=5$ . Принять, что коэффициент сбора электронов  $\alpha=0,6$ .

Ответ: а)  $I_{\phi}=5,6$  мкА, б)  $I_a=110$  мА.

**Задача 5.4.** Какими физическими явлениями можно объяснить уменьшение фототока с ростом частоты модуляции светового потока?

### Контрольные вопросы по дисциплине «Твердотельные приборы»

1. Объясните смысл электронной и дырочной проводимости.
2. Чем обусловлена контактная разность потенциалов?
3. Каково влияние внутреннего электрического поля р-п –перехода на движение основных и неосновных носителей тока?
4. Объясните вольт-амперную характеристику диода?
5. Что такое емкость р-п-перехода? Объясните зависимость емкости от напряжения на переходе.
6. Как изменяется сопротивление диода от полярности приложенного напряжения?
7. Чем объясняется сильное влияние температуры на характеристики диода?
8. Назовите основные параметры диода.
9. Нарисуйте устройство плоскостного диода.

10. Нарисуйте устройство точечного диода.
11. Нарисуйте устройство плоскостного транзистора.
12. Как обозначается на схемах биполярный транзистор р-п-р и п-р-п типа.
13. Назовите основные технологические способы изготовления плоскостных транзисторов.
14. Объяснить работу транзистора.
15. Назовите механизм переноса носителей в базе.
16. Нарисуйте три схемы включения транзистора.
17. Нарисуйте основные характеристики транзистора при включении с общей базой.
18. Нарисуйте основные характеристики транзистора при включении с общим эмиттером.
19. Нарисуйте и объясните зависимость коэффициента передачи транзистора от тока эмиттера.
20. Каков физический смысл  $h$  –параметров.
21. Как обозначается на схемах полевые транзисторы с каналами п и р типа.
22. Нарисуйте схему включения полевого транзистора.
23. Расскажите о принципе работы полевого транзистора.
24. Как устроен полевой транзистор с управляющим р-п –переходом.
25. МДП транзисторы
26. Что такое напряжение насыщения.
27. Что такое напряжение отсечки.
28. Нарисуйте эквивалентную схему полевого транзистора.
29. Расскажите о преимуществах полевого транзистора по сравнению с биполярным.
30. Однопереходной транзистор, устройство и принцип его работы.
31. Расскажите принцип работы тиристора.
32. Устройство тиристора и обозначение его на схеме.
33. Вольт амперная характеристика тиристора.
34. Основные параметры тиристора.
35. Динистор, устройство и принцип его работы.
36. Симистор, устройство и принцип его работы.
37. Общие сведения о аналоговых интегральных микросхемах.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Твердотельные приборы

Методические указания по самостоятельной работе

Усл. печ. л.                      Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40