

Бочаров Е.И., Павлов В.М., Першин Ю.М.

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Контрольное задание  
и методические указания к его выполнению  
для студентов заочной формы обучения**

**Основная профессиональная образовательная программа  
210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»**

**Квалификация бакалавр**

### **КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ**

Контрольное задание состоит из трех частей (трех самостоятельных заданий) и охватывает три основных раздела дисциплины ФОЭ: электрофизические свойства полупроводников, контактные явления в полупроводниках и физические процессы в структурах биполярного и полевых транзисторов.

Контрольное задание имеет 30 вариантов, различающихся исходными данными и условиями решаемых задач.

**Номер выполняемого варианта задания определяется суммой всех цифр номера зачетной книжки** (если сумма цифр не превышает 30, номер варианта равен этой сумме, в противном случае для определения номера варианта из указанной суммы следует вычесть 30).

В ходе выполнения каждого из трех заданий необходимо решить по одной из задач, номера которых указаны в таблицах исходных данных к заданиям. Условия решаемых задач также представлены в соответствующих таблицах для каждого задания. Методические указания к выполнению контрольного задания, необходимые для решения задач физические константы и параметры полупроводниковых материалов, а также рекомендуемая литература приведены ниже.

Проверенное преподавателем контрольное задание представляется к защите, которая проводится в ходе экзамена. Студент допускается к экзамену при наличии выполненных лабораторных работ и допущенного к защите контрольного задания.

**Внимание!** *Контрольные задания, в которых исходные данные и условия задач не соответствуют рассчитанному номеру варианта или номер варианта рассчитан неверно, не рецензируются и возвращаются на переделку.*

## Исходные данные

## Задание 1

№ варианта	Материал полупроводника	Время $t$ , мкс	Расстояние $x$ , см	Масштабный коэффициент $K$	Номер решаемой задачи
1	Ga As				1.1
2	Ga As				1.2
3	Ga As				1.3
4	Ga As			4	1.10
5	Ga As				1.8
6	Ga As				1.2
7	Ga As				1.6
8	Ga As				1.7
9	Ga As	5			1.9
10	Ga As		0,08		1.11
11	Ge				1.3
12	Ge				1.5
13	Ge				1.1
14	Ge				1.13
15	Ge			3	1.10
16	Ge				1.4
17	Ge				1.6
18	Ge				1.5
19	Ge				1.2
20	Ge	2			1.9
21	Si				1.5
22	Si				1.8
23	Si		0,04		1.11
24	Si				1.3
25	Si				1.5
26	Si				1.13
27	Si			5	1.10
28	Si				1.6
29	Si				1.4
30	Si				1.2

## Условия задач

## Задание 1

№ задачи	Дано	Определить
1.1	В полупроводнике $n$ -типа концентрация атомов донорной примеси составляет $N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$ , $T=300 \text{ К}$	Концентрации основных и неосновных носителей заряда $n_n$ и $p_n$ и положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны $E_{Fn}-E_i$
1.2	В полупроводнике $n$ -типа уровень Ферми $E_{Fn}$ расположен на $0,25 \text{ эВ}$ выше середины запрещенной зоны $E_i$ , $T = 300 \text{ К}$	Концентрации основных и неосновных носителей заряда $n_n$ и $p_n$
1.3	В полупроводнике $p$ -типа концентрация атомов акцепторной примеси составляет $N_A=10^{17} \text{ см}^{-3}$ , $T = 300 \text{ К}$	Концентрации основных и неосновных носителей заряда $p_p$ и $n_p$ и положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны $E_{Fp}-E_i$
1.4	В полупроводнике $p$ -типа уровень Ферми $E_{Fp}$ расположен на $0,25 \text{ эВ}$ ниже середины запрещенной зоны $E_i$ , $T = 300 \text{ К}$	Концентрации основных и неосновных носителей заряда $p_p$ и $n_p$
1.5	В полупроводнике $n$ -типа концентрация атомов донорной примеси составляет $N_D=10^{17} \text{ см}^{-3}$ , $T = 300 \text{ К}$	Удельное сопротивление полупроводника $\rho_n$ и его отношение к удельному сопротивлению собственного полупроводника $\rho_n/\rho_i$
1.6	Отношение удельного сопротивления полупроводника $n$ -типа к удельному сопротивлению собственного полупроводника составляет $\rho_n/\rho_i=10^{-3}$ , $T = 300 \text{ К}$	Концентрацию атомов донорной примеси $N_D$
1.7	В полупроводнике $p$ -типа концентрация атомов акцепторной примеси составляет $N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$ , $T = 300 \text{ К}$ .	Удельное сопротивление полупроводника $\rho_p$ и его отношение к удельному сопротивлению собственного полупроводника $\rho_p/\rho_i$
1.8	Отношение удельного сопротивления полупроводника $p$ -типа к удельному сопротивлению собственного полупроводника составляет $\rho_p/\rho_i=10^{-4}$ , $T = 300 \text{ К}$	Концентрацию атомов акцепторной примеси $N_A$
1.9	Время жизни неравновесных электронов в полупроводнике, находящемся под внешним воздействием, $\tau = 10^{-6} \text{ с}$	Относительное уменьшение концентрации избыточных электронов за время $t$ после выключения внешнего воздействия $\Delta n(t)/\Delta n(0)$
1.10	Время жизни неравновесных электронов в полупроводнике, находящемся под внешним воздействием, $\tau = 10^{-7} \text{ с}$	Интервал времени $t$ после выключения внешнего воздействия, в течение которого концентрация избыточных электронов уменьшится в $K$ раз
1.11	Полупроводник находится под стационарным внешним воздействием, выражающемся в инжекции в него электронов в сечении $x_p$ . Диффузионная длина электронов $L_n=0,01 \text{ см}$	Относительное уменьшение концентрации избыточных электронов на расстоянии $x$ от места их введения $\Delta n(x+x_p)/\Delta n(x_p)$
1.12	Полупроводник находится под стационарным внешним воздействием, выражающемся в инжекции в него электронов в сечении $x_p$ . Диффузионная длина электронов $L_n=0,002 \text{ см}$	Расстояние $x$ , на котором концентрация избыточных электронов уменьшится в $K$ раз
1.13	Полупроводник находится под стационарным внешним воздействием, выражающемся в однородном облучении его светом. Скорость генерации электронов под действием света $G_{\text{вн}}=10^{20} \text{ см}^{-3}/\text{с}$ . Время жизни неравновесных электронов в полупроводнике $\tau = 10^{-7} \text{ с}$	Избыточную концентрацию электронов $\Delta n$

## Исходные данные

## Задание 2

№ варианта	Материал полупроводника	Диффузионная длина электронов $L_n$ , см	Диффузионная длина дырок $L_p$ , см	Площадь перехода $S$ , см <sup>2</sup>	Сопротивление тела базы $r'_{б}$ , Ом	Изменение температуры $\Delta T$ , К	Номер решаемой задачи
1	Ge	0,017	0,01	0,001	-	-	2.3
2	Ge	0,034	0,02	0,004	-	-	2.2
3	Ge	0,050	0,03	0,002	40	30	2.5
4	Ge	0,017	0,01	0,001	-	-	2.7
5	Ge	0,034	0,02	0,004	-	-	2.4
6	Ge	0,050	0,03	0,003	-	-	2.9
7	Ge	0,017	0,01	0,002	-	-	2.8
8	Ge	0,034	0,02	0,001	30	-20	2.6
9	Ge	0,050	0,03	0,004	-	-	2.4
10	Ge	0,017	0,01	0,002	-	-	2.3
11	Ge	0,034	0,02	0,001	-	-	2.10
12	Ge	0,050	0,03	0,004	-	-	2.9
13	Ge	0,017	0,01	0,002	-	-	2.8
14	Ge	0,034	0,02	0,001	30	40	2.5
15	Ge	0,050	0,03	0,004	-	-	2.7
16	Si	0,030	0,02	0,002	50	-10	2.6
17	Si	0,045	0,03	0,001	-	-	2.1
18	Si	0,015	0,01	0,004	-	-	2.4
19	Si	0,030	0,02	0,002	-	-	2.8
20	Si	0,045	0,03	0,001	-	-	2.7
21	Si	0,015	0,01	0,004	-	-	2.9
22	Si	0,030	0,02	0,002	50	20	2.6
23	Si	0,045	0,03	0,001	-	-	2.2
24	Si	0,015	0,01	0,004	-	-	2.1
25	Si	0,030	0,02	0,002	20	50	2.6
26	Si	0,045	0,03	0,001	-	-	2.10
27	Si	0,015	0,01	0,004	-	-	2.1
28	Si	0,030	0,02	0,002	-	-	2.8
29	Si	0,045	0,03	0,001	-	-	2.10
30	Si	0,015	0,01	0,004	-	-	2.4

## Условия задач

## Задание 2

№ зада-чи	Дано	Определить
2.1	Концентрации атомов донорной и акцепторной примесей в областях полупроводника, образующих резкий $p-n$ -переход, равны $N_D=10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $N_A=10^{15} \text{ см}^{-3}$ , $T=300 \text{ К}$	Контактную разность потенциалов $\varphi_{к0}$ и ширину перехода $\Delta_0$ в равновесном состоянии ( $u=0$ ), а также отношение ширины участков перехода, лежащих в $n$ - и $p$ -областях $\Delta_n/\Delta_p$
2.2	Удельные сопротивления областей полупроводника, образующих резкий $p-n$ -переход, равны $\rho_n=1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и $\rho_p=10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , $T=300 \text{ К}$	Контактную разность потенциалов $\varphi_k$ и ширину перехода $\Delta$ при подаче на переход обратного напряжения $u=5 \text{ В}$
2.3	Контактная разность потенциалов в резком $p-n$ -переходе $\varphi_{к0}=0,7 \text{ В}$ . Удельная электрическая проводимость $p$ -области $\sigma_p=1 \text{ См/см}$ , $T=300 \text{ К}$	Ширину перехода $\Delta_0$ и отношение ширины участков перехода, лежащих в $n$ - и $p$ -областях $\Delta_n/\Delta_p$
2.4	Отношение ширины участков резкого $p-n$ -перехода, лежащих в $n$ - и $p$ -областях $\Delta_n/\Delta_p=0,1$ . Удельная электрическая проводимость $p$ -области $\sigma_p=10 \text{ См/см}$ , $T=300 \text{ К}$	Контактную разность потенциалов $\varphi_{к0}$ и ширину перехода $\Delta_0$ в равновесном состоянии ( $u=0$ )
2.5	Обратный тепловой ток резкого $p-n$ -перехода $I_0=10^{-15} \text{ А}$ , сопротивление тела базы равно $r^1_б$ , $T=300 \text{ К}$	Рассчитать и построить на графике прямую ветвь ВАХ $p-n$ -перехода в интервале токов $i=0\dots 20 \text{ мА}$ . Провести ее кусочно-линейную аппроксимацию и определить пороговое напряжение $U$ . Определить во сколько раз изменится тепловой ток при изменении температуры на $\Delta T$
2.6	Обратный тепловой ток резкого $p-n$ -перехода $I_0=10^{-12} \text{ А}$ , сопротивление тела базы равно $r^1_б$ , $T=300 \text{ К}$	Рассчитать и построить на графике прямую ветвь ВАХ $p-n$ -перехода в интервале токов $i=0\dots 20 \text{ мА}$ . Провести ее кусочно-линейную аппроксимацию и определить пороговое напряжение $U$ . Определить смещение прямой ветви ВАХ вдоль оси напряжений $\Delta u$ при изменении температуры на $\Delta T$
2.7	Концентрации атомов донорной и акцепторной примесей в областях полупроводника, образующих резкий $p-n$ -переход, равны $N_D=10^{17} \text{ см}^{-3}$ , $N_A=10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Площадь перехода равна $S$ , $T=300 \text{ К}$	Обратный тепловой ток перехода $I_0$ и барьерную емкость перехода $C_б$ при подаче на переход обратного напряжения $u=5 \text{ В}$
2.8	Концентрации атомов донорной и акцепторной примесей в областях полупроводника, образующих резкий $p-n$ -переход, равны $N_D=10^{18} \text{ см}^{-3}$ , $N_A=10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Площадь перехода равна $S$ , время жизни неравновесных электронов $\tau_n=10^{-6} \text{ с}$ , $T=300 \text{ К}$	Обратный тепловой ток перехода $I_0$ , дифференциальное сопротивление $r_{рп}$ и диффузионную емкость перехода $C_{\text{диф}}$ при прямом токе $i=10 \text{ мА}$
2.9	Концентрации атомов донорной и акцепторной примесей в областях полупроводника, образующих резкий $p-n$ -переход, равны $N_D=10^{18} \text{ см}^{-3}$ , $N_A=10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Площадь перехода равна $S$ , время жизни неравновесных электронов $\tau_n=10^{-6} \text{ с}$ , $T=300 \text{ К}$	Обратный тепловой ток перехода $I_0$ , барьерную емкость перехода $C_{\text{бар}}$ в равновесном состоянии ( $u=0$ ) и диффузионную емкость перехода $C_{\text{диф}}$ при прямом токе $i=10 \text{ мА}$
2.10	Концентрации атомов донорной и акцепторной примесей в областях полупроводника, образующих резкий $p-n$ -переход, равны $N_D=10^{17} \text{ см}^{-3}$ , $N_A=10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Площадь перехода равна $S$ , $T=300 \text{ К}$	Обратный тепловой ток перехода $I_0$ , барьерную емкость $C_{\text{бар}}$ и дифференциальное сопротивление перехода $r_{рп}$ в равновесном состоянии ( $u=0$ , $i=0$ )

### Исходные данные

### Задание 3

№ варианта	Тепловой ток $I_0$ , А	Коэффициенты передачи тока базы		Напряжения между электродами		Питающее напряжение $E_k$ , В	Нагрузочное сопротивление $R_k$ , кОм	Номер решаемой задачи
		$\beta$	$\beta_1$	$U_{бэ}$ , В	$U_{кэ}$ , В			
1	$10^{-14}$	150	3	0,75	0,70	-	-	3.1
3	$2 \cdot 10^{-14}$	120	5	0,72	5,0	-	-	3.1
5	$5 \cdot 10^{-14}$	100	8	0,70	3,0	-	-	3.1
7	$8 \cdot 10^{-13}$	90	10	0,68	0,62	-	-	3.1
9	$10^{-14}$	80	12	0,66	0,60	-	-	3.1
11	$10^{-14}$	180	-	-	3,0	-	-	3.2
13	$3 \cdot 10^{-14}$	150	-	-	4,0	-	-	3.2
15	$6 \cdot 10^{-14}$	100	-	-	7,0	-	-	3.2
17	$9 \cdot 10^{-14}$	80	-	-	10,0	-	-	3.2
19	$1,2 \cdot 10^{-13}$	70	-	-	12,0	-	-	3.2
21	$10^{-14}$	120	-	-	-	10,0	1,0	3.3
23	$10^{-13}$	140	-	-	-	8,0	1,2	3.3
25	$10^{-14}$	110	-	-	-	7,0	1,5	3.3
27	$10^{-13}$	90	-	-	-	9,0	1,0	3.3
29	$5 \cdot 10^{-13}$	85	-	-	-	12,0	1,5	3.3

№ варианта	Удельная крутизна $b$ , мА/В <sup>2</sup>	Пороговое напряжение $U_{пор}$ , В	Напряжения между электродами		Питающее напряжение $E_c$ , В	Нагрузочное сопротивление $R_c$ , кОм	Номер решаемой задачи
			$U_{зи}$ , В	$U_{си}$ , В			
2	2,0	2,0	4,2	10,0	-	-	3.4
4	4,0	3,0	5,0	10,0	-	-	3.4
6	6,0	-6,0	-2,0	6,0	-	-	3.4
8	8,0	-7,0	-3,0	2,0	-	-	3.4
10	10,0	-8,0	-4,0	8,0	-	-	3.4
12	3,0	2,0	-	10,0	-	-	3.5
14	5,0	3,0	-	12,0	-	-	3.5
16	7,0	4,0	-	8,0	-	-	3.5
18	9,0	5,0	-	6,0	-	-	3.5
20	11,0	6,0	-	9,0	-	-	3.5
22	1,0	-2,0	-	-	6,0	10,0	3.6
24	3,0	-3,0	-	-	7,0	8,0	3.6
26	5,0	-4,0	-	-	8,0	10,0	3.6
28	7,0	-5,0	-	-	10,0	6,0	3.6
30	9,0	-6,0	-	-	12,0	2,0	3.6

## Условия задач

## Задание 3

№ задачи	Дано	Определить
3.1	Биполярный транзистор n-p-n-структуры, включенный по схеме ОЭ, имеет параметры: сквозной тепловой ток $I_0$ , коэффициент передачи тока базы $\beta$ , инверсный коэффициент передачи тока базы $\beta_I$ . Заданы напряжения между электродами $U_{бэ}$ и $U_{кэ}$ .	Определить в каком режиме работает транзистор. Рассчитать токи в цепях эмиттера $i_э$ , коллектора $i_к$ и базы $i_б$ . Рассчитать токи $i_э$ , $i_к$ и $i_б$ при увеличении напряжения $U_{бэ}$ на 50 мВ.
3.2	Биполярный транзистор n-p-n-структуры, включенный по схеме ОЭ, имеет параметры: сквозной тепловой ток $I_0$ , коэффициент передачи тока базы $\beta$ . Задано напряжение $U_{кэ}$ .	Рассчитать и построить на графике входную $i_б = f(U_{бэ})$ и управляющую $i_к = f(U_{бэ})$ характеристики транзистора. Расчеты выполнить в диапазоне изменения напряжения $U_{бэ}$ , соответствующем изменению тока $i_к = 0 \dots 20$ мА.
3.3	Биполярный транзистор n-p-n-структуры, включенный по схеме ОЭ, имеет параметры: сквозной тепловой ток $I_0$ , коэффициент передачи тока базы $\beta$ . Заданы напряжение питания $E_к$ и нагрузочное сопротивление $R_к$ .	Рассчитать и построить на графике передаточную характеристику транзистора $U_{кэ} = f(U_{бэ})$ . Расчеты выполнить в диапазоне изменения напряжения $U_{бэ}$ , соответствующем изменению напряжения $U_{кэ} = 0 \dots E_к$ . В рабочей точке, соответствующей $U_{кэ} = E_к / 2$ , рассчитать коэффициенты усиления по току $K_I$ и по напряжению $K_U$ .
3.4	Полевой транзистор с каналом n-типа, включенный по схеме ОИ, имеет параметры: удельная крутизна $b$ , пороговое напряжение $U_{пор}$ . Заданы напряжения между электродами $U_{зу}$ и $U_{су}$ .	Определить в каком режиме работает транзистор. Рассчитать ток стока $i_с$ . Рассчитать ток стока при увеличении напряжения $U_{зу}$ на 0,4 В.
3.5	Полевой транзистор с каналом n-типа, включенный по схеме ОИ, имеет параметры: удельная крутизна $b$ , пороговое напряжение $U_{пор}$ . Задано напряжение $U_{су}$ .	Рассчитать и построить на графике управляющую характеристики транзистора $i_с = f(U_{зу})$ . Расчеты выполнить в диапазоне изменения напряжения $U_{зу}$ , соответствующем изменению тока $i_с = 0 \dots 20$ мА.
3.6	Полевой транзистор с каналом n-типа, включенный по схеме ОИ, имеет параметры: удельная крутизна $b$ , пороговое напряжение $U_{пор}$ . Заданы напряжение питания $E_с$ и нагрузочное сопротивление $R_с$ .	Рассчитать и построить на графике передаточную характеристику транзистора $U_{су} = f(U_{зу})$ . Расчеты выполнить в диапазоне изменения напряжения $U_{зу} = U_{пор} \dots 0$ . В рабочей точке, соответствующей $U_{су} = E_с / 2$ , рассчитать коэффициент усиления по напряжению $K_U$ .

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОГО ЗАДАНИЯ

В начале задания приводятся **номера зачетной книжки и варианта выполняемого задания**. Контрольное задание должно быть аккуратно оформлено в отдельной тонкой тетради. Выполнение каждой задачи следует начинать с новой страницы. *Для каждой задачи следует записать условия и исходные данные для ее решения.* В тексте необходимо оставлять поля для замечаний рецензента.

До решения любой задачи, необходимо внимательно изучить соответствующие разделы рекомендуемой литературы и выписать приводимые в них расчетные выражения. Затем следует составить алгоритм решения задачи (последовательность формул для расчета всех требуемых величин). При этом отдельные расчетные формулы могут быть использованы непосредственно, другие следует получить путем соответствующих преобразований полученных в литературе выражений.

Решение задач должно сопровождаться подробными комментариями. Все результаты расчетов должны округляться до третьей значащей цифры. Расчетные величины следует выражать в единицах системы «СИ», используя в случае необходимости соответствующие десятичные приставки (санти, милли, микро, кило, мега и т.д.). Допускается представление результатов в форме с плавающей запятой, т.е. используя сомножитель  $10^n$ , где  $n$  - показатель степени. Графики рассчитанных зависимостей следует выполнять на миллиметровке с указанием единиц измерения отложенных по осям величин. Для удобства проверки в конце каждого задания следует отдельным списком привести результаты решения указанных в исходных данных задач.

**ВНИМАНИЕ!** *Для того чтобы контрольное задание было проверено рецензентом к началу экзаменационной сессии, оно должно быть выслано на проверку (с учетом реальных сроков пересылки корреспонденции почтой) не позднее середины декабря.*

Студенты, прибывающие на сессию с непроверенным заданием, могут быть не допущены к экзамену, если не успеют исправить задание в соответствии с замечаниями рецензента.



### ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

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

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг - масса электрона;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К - постоянная Больцмана;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$  Ф/см - электрическая постоянная.

### ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

полупроводниковых материалов при температуре  $T = 300$  К

Параметр	Ge	Si	GaAs
Ширина запрещенной зоны $\Delta E_z$ , эВ	0,66	1,12	1,424
Собственная концентрация носителей заряда $n_i$ , см <sup>-3</sup>	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,45 \cdot 10^{10}$	$1,79 \cdot 10^6$
Подвижность электронов $\mu_n$ , см <sup>2</sup> /В·с	3900	1500	8500
Подвижность дырок $\mu_p$ , см <sup>2</sup> /В·с	1900	450	400
Коэффициент диффузии электронов $D_n$ , см <sup>2</sup> /с	100	36	290
Коэффициент диффузии дырок $D_p$ , см <sup>2</sup> /с	45	13	12
Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	16,0	11,9	13,1

## **ЛИТЕРАТУРА**

### **Основная**

1. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: Учебное пособие. СПб: Питер, 2006.

2. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учебное пособие для вузов / Под ред. Н.Д. Федорова. М.: Радио и связь, 2002.

### **Дополнительная**

3. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1987.

4. Электронные приборы: Учебник для вузов / Под ред. Г.Г. Шишкина. М.: Энергоатомиздат, 1989.