**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**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.

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.

Решить для двух вариантов 18,19

##### **Исходные данные Задание 1**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № варианта | Материал полупровод- ника | Время *t*, мкc | Расстояние *х*, см | Масштабный коэффициент *К* | Номер решаемой задачи |
| 19 | Ge |  |  |  | 1.2 |
| 18 | Ge |  |  |  | 1.5 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № зада-чи | Дано | Определить |
| 1.1 | В полупроводнике n-типа концентрация атомов донорной примеси составляет *NД*=1016 см-3*,Т*=300 К | Концентрации основных и неосновных носителей заряда *nn* и *pn* и положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны *ЕFn-Ei* |
| 1.2 | В полупроводнике *n*-типа уровень Ферми *ЕFn* расположен на0,25 эВ выше середины запрещенной зоны *Ei* , *Т* = 300К | Концентрации основных и неосновных носителей заряда *nn* и *pn* |
| 1.3 | В полупроводнике *р*-типа концентрация атомов акцепторной примеси составляет *NA*=1017 см-3, *Т* = 300 К | Концентрации основных и неосновных носителей заряда *pp* и *np* и положение уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны *ЕFp-Ei* |
| 1.4 | В полупроводнике *р*-типа уровень Ферми *ЕFp* расположен на 0,25 эВ ниже середины запрещенной зоны *Ei*, *Т* = 300 К | Концентрации основных и неосновных носителей заряда *pp* и *np* |
| 1.5 | В полупроводнике *n*-типа концентрация атомов донорной примеси составляет *NД*=1017 см-3*, Т* = 300 К | Удельное сопротивление полупроводника ρn и его отношение к удельному сопротивлению собственного полупроводника ρn/ρi |
| 1.6 | Отношение удельного сопротивления полупроводника *n*-типа к удельному сопротивлению собственного полупро-водника составляет ρn/ρi=10-3, *Т* = 300 К | Концентрацию атомов донорной примеси *NД* |
| 1.7 | В полупроводнике *p*-типа концентрация атомов акцепторной примеси составляет *NA*=1016 см-3, *Т* = 300 К. | Удельное сопротивление полупроводника ρp и его отношение к удельному сопротивлению собственного полупроводника ρp /ρi |
| 1.8 | Отношение удельного сопротивления полупроводника *p*-типа к удельному сопротивлению собственного полупро-водника составляет ρp/ρi=10-4,*Т* = 300 К | Концентрацию атомов акцепторной примеси *NА* |
| 1.9 | Время жизни неравновесных электронов в полупроводнике, находящемся под внешним воздействием, τ = 10-6 с | Относительное уменьшение концентрации избыточных электронов за время *t* после выключения внешнего воздействия Δ*n(t)/*Δ*n(0)* |
| 1.10 | Время жизни неравновесных электронов в полупроводнике, находящемся под внешним воздействием, τ = 10-7 с | Интервал времени *t* после выключения внешнего воздействия, в течение которого концентрация избыточных электронов уменьшится в *К* раз |
| 1.11 | Полупроводник находится под стационарным внешним воздействием, выражающемся в инжекции в него электронов в сечении *хр*. Диффузионная длина электронов *Ln*=0,01 см | Относительное уменьшение концентрации избыточных электронов на расстоянии х от места их введения Δ*n(х+хp)*/Δ*n(хp)* |
| 1.12 | Полупроводник находится под стационарным внешним воздействием, выражающемся в инжекции в него электронов в сечении *хр*. Диффузионная длина электронов *Ln*=0,002 см | Расстояние *х*, на котором концентрация избыточных электронов уменьшится в *К* раз |
| 1.13 | Полупроводник находится под стационарным внешним воздействием, выражающемся в однородном облучении его светом. Скорость генерации электронов под действием света *G*вн=1020 см-3/с. Время жизни неравновесных электронов в полупроводнике τ = 10-7 с | Избыточную концентрацию электроновΔ*n* |

**Условия задач Задание 1**

##### **Исходные данные Задание 2**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № вариан-та | Материал полупро-водника | Диффузионная длина электронов *Ln,* см | Диффузионная длина дырок *Lp*, см | Площадь перехода *S*, см2 | Сопротивление тела базы *r* /Б, Ом | Изменение температурыΔ*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 | - | - | - |

**Условия задач Задание 2**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № зада-чи | Дано | Определить |
| 2.1 | Концентрации атомов донорной и акцепторной примесей в областях полупроводника, образую-щих резкий *p-n*-переход, равны *NД*=1016 см-3 и *NA*=1015 см-3, *T*=300 K | Контактную разность потенциалов ϕко  и ширину перехода Δ0 в равновесном состоянии (*u*=0), а также отношение ширины участков перехода, лежащих в *n*- и *р*-областях Δ*n/*Δ*p* |
| 2.2 | Удельные сопротивления областей полупро-водника, образующих резкий *p-n*-переход, равны ρn=1 Ом⋅см и ρp=10 Ом⋅см, *T*=300 K | Контактную разность потенциалов ϕк  и ширину перехода Δ при подаче на переход обратного напряжения *u*=5 В |
| 2.3 | Контактная разность потенциалов в резком *p-n*-переходе ϕко=0,7 В. Удельная электрическая проводимость *р*-области σр=1 См/см,*T*=300 K | Ширину перехода Δ0 и отношение ширины участков перехода, лежащих в *n*- и *р*-областях Δ*n/*Δ*p* |
| 2.4 | Отношение ширины участков резкого *p-n*-пере-хода, лежащих в *n*- и *р*-областях Δ*n/*Δ*p*=0,1. Удельная электрическая проводимость *р*-об-ласти σр=10 См/см, *T*=300 К | Контактную разность потенциалов ϕко  и ширину перехода Δ0 в равновесном состоянии (*u*=0) |
| 2.5 | Обратный тепловой ток резкого *p-n*-перехода *I0*=10-15А, сопротивление тела базы равно *r* /Б, *T*=300 K | Рассчитать и построить на графике прямую ветвь ВАХ *p-n*-перехода в интервале токов *i* =0…20 мА. Провести ее кусочно-линейную аппроксимацию и определить пороговое напряжение *U*\*. Определить во сколько раз изменится тепловой ток при изменении температуры на Δ*Т* |
| 2.6 | Обратный тепловой ток резкого *p-n*-перехода *I0*=10-12 А, сопротивление тела базы равно *r* /Б*, T*=300 K | Рассчитать и построить на графике прямую ветвь ВАХ *p-n*-перехода в интервале токов *i* =0…20 мА. Провести ее кусочно-линейную аппроксимацию и определить пороговое напряжение *U*\*. Определить смещение прямой ветви ВАХ вдоль оси напряжений Δ*u* при изменении температуры на Δ*Т* |
| 2.7 | Концентрации атомов донорной и акцепторной примесей в областях полупроводника, образую-щих резкий *p-n-*переход, равны *N*д=1017 см-3, *NA*=1014 см-3. Площадь перехода равна *S*, *T*=300 K | Обратный тепловой ток перехода *I0* и барьерную емкость перехода *С*Б при подаче на переход обратного напряжения *u*=5 В |
| 2.8 | Концентрации атомов донорной и акцепторной примесей в областях полупроводника, образую-щих резкий *p-n*-переход, равны *N*д=1018 см-3, *NA*=1016 см-3. Площадь перехода равна *S*, время жизни неравновесных электронов τn=10-6 с ,*T*=300 K | Обратный тепловой ток перехода *I0,* дифферен-циальное сопротивление *r*pn и диффузионную емкость перехода *С* диф при прямом токе *i*=10 мА |
| 2.9 | Концентрации атомов донорной и акцепторной примесей в областях полупроводника, образую-щих резкий *p-n*-переход, равны *N*д=1018 см-3, *NA*=1015 см-3. Площадь перехода равна *S*, время жизни неравновесных электронов τn=10-6 с, *T*=300 K | Обратный тепловой ток перехода *I0,* барьерную емкость перехода *С* бар в равновесном состоянии (*u*=0) и диффузионную емкость перехода *С* диф при прямом токе *i*=10 мА |
| 2.10 | Концентрации атомов донорной и акцепторной примесей в областях полупроводника, образую-щих резкий *p-n*-переход, равны *N*д=1017 см-3, *NA*=1015 см-3. Площадь перехода равна *S*, *T*=300 K | Обратный тепловой ток перехода *I0,* барьерную емкость *С* бар и дифференциальное сопротивление перехода *r*pn  в равновесном состоянии (*u*=0, *i*=0) |

##### **Исходные данные Задание 3**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № вари-анта | Тепловой ток *I0*, А | Коэффициенты передачи тока базы | | Напряжения между электродами | | Питающее напряже-ние *EК,* В | Нагрузоч-ное сопротив-ление *RК,* кОм | Номер решае-мой задачи |
| *β* | *β I* | *Uбэ,* В | *Uкэ,* В |
| 1 | 10­-14 | 150 | 3 | 0,75 | 0,70 | - | - | 3.1 |
| 3 | 2·10­-14 | 120 | 5 | 0,72 | 5,0 | - | - | 3.1 |
| 5 | 5·10­-14 | 100 | 8 | 0,70 | 3,0 | - | - | 3.1 |
| 7 | 8·10­-13 | 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 | 3·10­-14 | 150 | - | - | 4,0 | - | - | 3.2 |
| 15 | 6·10­-14 | 100 | - | - | 7,0 | - | - | 3.2 |
| 17 | 9·10­-14 | 80 | - | - | 10,0 | - | - | 3.2 |
| 19 | 1,2·10­-13 | 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 | 5·10­-13 | 85 | - | - | - | 12,0 | 1,5 | 3.3 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № вари-анта | Удельная крутизна *b*, мА/В2 | Пороговое напряжение *Uпор*, В | Напряжения между электродами | | Питающее напряжение *Eс*, В | Нагрузочное сопротивление *Rс*, кОм | Номер решаемой задачи |
| *Uзи*, В | *Uси*, 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 парамет-ры: сквозной тепловой ток *I0,* коэффици-ент передачи тока базы *β,* инверсныйкоэффициент передачи тока базы *βI.* Заданы напряжения между электродами *Uбэ* и *Uкэ.* | Определить в каком режиме работает транзистор. Рассчитать токи в цепях эмиттера *iэ*, коллектора *iк*  и базы *iб*. Рассчитать токи *iэ*, *iк* и *iб* при увеличении напряжения *Uбэ* на 50 мВ. |
| 3.2 | Биполярный транзистор n-p-n-структуры, включенный по схеме ОЭ, имеет парамет-ры: сквозной тепловой ток *I0,* коэффици-ент передачи тока базы *β.* Задано напря-жение *Uкэ.* | Рассчитать и построить на графике входную *iб* = *f* (*Uбэ )* и управляющую *iк* = *f* (*Uбэ )* харак-теристики транзистора. Расчеты выполнить в диапазоне изменения напряжения *Uбэ*, соот-ветствующем изменению тока *iк* = 0…20 мА. |
| 3.3 | Биполярный транзистор n-p-n-структуры, включенный по схеме ОЭ, имеет парамет-ры: сквозной тепловой ток *I0,* коэффици-  ент передачи тока базы  *β.* Заданы напря-жение питания *EК* и нагрузочное сопротив-ление *RК*. | Рассчитать и построить на графике пере-даточнуюхарактеристику транзистора *Uкэ* = *f* (*Uбэ )*. Расчеты выполнить в диапазоне изменения напряжения *Uбэ*, соответству-ющем изменению напряжения *Uкэ* = 0… *EК*. В рабочей точке, соответствующей *Uкэ* = *EК* / 2, рассчитать коэффициенты усиле-ния по току *KI* и по напряжению *KU* . |
| 3.4 | Полевой транзистор с каналом n-типа, включенный по схеме ОИ, имеет пара-метры: удельная крутизна *b*, пороговое напряжение *Uпор*. Заданы напряжения между электродами *Uзи*  и *Uси*. | Определить в каком режиме работает тран-зистор. Рассчитать ток стока *iс*. Рассчитать ток стока при увеличении напряжения *Uзи*  на 0,4 В. |
| 3.5 | Полевой транзистор с каналом n-типа, включенный по схеме ОИ, имеет пара-метры: удельная крутизна *b*, пороговое напряжение *Uпор*. Задано напряжение *Uси*. | Рассчитать и построить на графике управ-ляющуюхарактеристики транзистора *iс* = *f* (*Uзи )*. Расчеты выполнить в диапазоне изменения напряжения *Uзи*, соответствую-щем изменению тока *iс* = 0…20 мА. |
| 3.6 | Полевой транзистор с каналом n-типа, включенный по схеме ОИ, имеет пара-метры: удельная крутизна *b*, пороговое напряжение *Uпор*. Заданы напряжение питания *Eс* и нагрузочное сопротивле- ние *Rс*. | Рассчитать и построить на графике пере-даточнуюхарактеристику транзистора *Uси* = *f* (*Uзи )*. Расчеты выполнить в диапазо-не изменения напряжения *Uзи* = *Uпор* …0. В рабочей точке, соответствующей *Uси* = *EС* / 2, рассчитать коэффициент уси-ления по току *KI*. |

##### **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.

##### 

##### 

##### **ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ**

*q* = 1,6·10−19 Кл - заряд электрона;

*m* = 9,1·10−31 кг - масса электрона;

*k* = 1,38·10−23 Дж/К = 8,62·10−5 эВ/К - постоянная Больцмана;

ε*0* = 8,85·10−14 Ф/см - электрическая постоянная.

**ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ**

полупроводниковых материалов при температуре *Т* = 300 К

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Ge | Si | GaAs |
| Ширина запрещенной зоны Δ*Е*з, эВ | 0,66 | 1,12 | 1,424 |
| Собственная концентрация  носителей заряда *ni*, см-3 | 2,4·1013 | 1,45·1010 | 1,79·106 |
| Подвижность электронов μ*n*, см2/В·c | 3900 | 1500 | 8500 |
| Подвижность дырок μ*р*, см2/В·c | 1900 | 450 | 400 |
| Коэффициент диффузии  электронов *Dn*, см2/c | 100 | 36 | 290 |
| Коэффициент диффузии  дырок *Dр*, см2/c | 45 | 13 | 12 |
| Относительная диэлектрическая  проницаемость ε | 16,0 | 11,9 | 13,1 |