

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»
Инженерно-физический факультет высоких технологий
Кафедра инженерной физики

Вострецова Л.Н.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ
РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ФИЗИКА АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ»**

Ульяновск 2019

Методические указания для самостоятельной работы студентов по дисциплине «Физика активных элементов» / составитель: Л.Н. Вострецова.- Ульяновск: УлГУ, 2019.

Настоящие методические указания предназначены для студентов магистратуры 03.04.02 «Физика», изучающих дисциплину «Физика активных элементов». В работе приведены литература по дисциплине, основные темы курса и вопросы в рамках каждой темы, рекомендации по изучению теоретического материала, контрольные вопросы для самоконтроля и тесты для самостоятельной работы.

Студентам очной формы обучения они будут полезны при подготовке к лабораторным занятиям и к экзамену по данной дисциплине

Рекомендованы к использованию ученым советом Инженерно-физического факультета высоких технологий УлГУ
Протокол №11 от « 18» июня 2019 г.

1.ЛИТЕРАТУРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. **Физика полупроводников** : учеб. пособие для физ. спец. вузов / Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович, С. Г. Калашников. - Москва: Наука, 1990. - 685 с. : ил. - ISBN 5-02-014032-5 :

2. *Старосельский, В. И.* Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : учебное пособие для вузов / В. И. Старосельский. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 463 с. — ISBN 978-5-9916-0808-4. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/425163>

3. Данилов В.С. Анализ работы и применение активных полупроводниковых элементов [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Данилов В.С., Раков Ю.Н.— Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014.— 418 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45077.html>

2.МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Тема 1. Основы зонной теории

полупроводников

Основные вопросы темы:

1. Основные положения зонной теории ([1] на с.87 – 89, [2] п. 1.1, 1.2)
2. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла ([1, 2] , с.89 - 94, [2] п. 1.1, 1.2)
3. Функции Блоха ([1] С. 643 – 646, [2] п. 1.1, 1.2)
4. Зоны Брюллюэна (с.95-100 [1], [2] п. 1.1, 1.2).
5. Энергетические зоны – запрещенные и разрешенные (100 – 103 [1], [2] п. 1.1, 1.2).
6. Модель Кроннига-Пенни ([1] глава 3, 4, [2] п. 1.1, 1.2).

7. Закон дисперсии, эффективная масса ([1], С. 112 – 114, 116 – 122, [2] п. 1.1, 1.2).

8. Зонная структура металлов и полупроводников ([1], С.114 – 116, [2] п. 1.1, 1.2).

Контрольные вопросы:

1. Перечислите основные положения одночастичного приближения
2. Основные свойства волновой функции электрона в периодическом поле кристалла
3. Прямозонные и непрямозонные полупроводники
4. Модель Кроннига-Пенни. Выведите условия существования запрещенных и разрешенных энергетических зон

Задачи для самостоятельной работы:

1. Частица находится в основном состоянии в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l с абсолютно непроницаемыми стенками ($0 \leq x \leq l$). Найти вероятность пребывания частицы в области $0 \leq x \leq \frac{l}{3}$.

2. Частица массой m находится в трехмерной потенциальной яме с абсолютно непроницаемыми стенками. Стороны ямы a , b , c . Найти:

а) собственные значения энергии частицы;

б) разность энергий 3-го и 4-го уровней для кубической ямы со стороной куба a ; в) энергию 6-го уровня и соответствующее ему число состояний (кратность вырождения) частицы в кубической потенциальной яме.

3. Волновая функция частицы массой m для основного состояния в одномерном потенциальном поле $U(x) = \frac{kx^2}{2}$ имеет вид $\varphi(x) = A \cdot e^{-\alpha x^2}$.

Найти с помощью уравнения Шрёдингера постоянную A и энергию частицы в этом состоянии.

4. Найти для электрона с энергией E вероятность прохождения потенциального барьера, ширина которого l и высота U_0 , если барьер имеет форму треугольную форму.

Задание для самостоятельной работы:

Проработать план практического занятия по теме «Зонная теория полупроводников». Работа должна включать в себя:

- цель занятия;
- применяемые методы и средства обучения;
- краткую теорию, необходимую для решения типовых задач по теме;
- разбор не менее 3 типовых задач;
- задачи для самостоятельного решения

Тесты для самостоятельной работы

- 1 Системы, в которых движение носителей заряда квантовано в двух направлениях, это
 1. квантовые ямы
 2. квантовые проволоки
 3. квантовые точки
 4. фотонные кристаллы
- 2 Системы, в которых имеется размерное квантование движения носителей заряда в одном направлении, это
 1. квантовые ямы
 2. квантовые проволоки
 3. квантовые точки
 4. фотонные кристаллы
- 3 Нанообъекты, в которых движение носителей заряда квантовано во всех трех направлениях, это
 1. квантовые ямы
 2. квантовые проволоки
 3. квантовые точки
 4. фотонные кристаллы

- 4 Системы, в которых имеется зонный спектр для фотонов, - это
1. квантовые ямы
 2. квантовые проволоки
 3. квантовые точки
 4. фотонные кристаллы
- 5 Твердое тело, у которого отсутствует энергетический зазор между разрешенными зонами, - это
1. металл
 2. диэлектрик
 3. полупроводник
- 6 Твердое тело, у которого величина энергетической щели между разрешенными зонами больше 3 эВ, называется
1. металл
 2. диэлектрик
 3. полупроводник
- 7 Твердое тело, у которого величина энергетической щели между разрешенными зонами лежит в диапазоне (0,1 – 3,0) эВ, называется
1. металл
 2. диэлектрик
 3. полупроводник
- 8 Полупроводники
1. При нормальных температурах проводят электрический ток, а при низких являются изоляторами
 2. Выталкивают из себя магнитное поле при низких температурах
 3. Проводят ток только в одном направлении
 4. При нормальных температурах являются изоляторами
- 9 Верхняя, не полностью заполненная энергетическая зона в полупроводниках называется
1. зона проводимости
 2. валентная зона
 3. запрещенная зона

- 10 Энергетическая щель запрещенных состояний между валентной зоной и зоной проводимости называется
1. запрещенной зоной
 2. щель подвижности
 3. зоной Ферми
- 11 Способ описания коллективного движения большого числа электронов в не полностью заполненной валентной зоне – это
1. дырка
 2. электрон
 3. фонон
 4. экситон
- 12 Может ли дырка существовать вне полупроводника
1. да
 2. нет
- 13 Введение примеси в полупроводник – это
1. легирование
 2. инжекция
 3. генерация
- 14 Если в полупроводник, состоящий из элементов 4 группы, ввести в качестве примеси элемент 5 группы, то получим
1. донорный полупроводник
 2. акцепторный полупроводник
 3. собственный полупроводник
- 15 Масса носителя заряда, учитывающая влияние периодического потенциала атомов в кристалле полупроводника на движение электронов и дырок и определяемая уравнениями дисперсии, называется
1. эффективной
 2. Инертной
 3. Квантовой
- 16 Где расположена энергия Ферми у собственных полупроводников
- 1 Вблизи валентной зоны

2. Вблизи зоны проводимости
 3. Вблизи середины запрещённой зоны
 4. Вблизи примесного уровня
- 17 Наличие легирующей донорной примеси в полупроводнике
1. Смещает уровень Ферми в сторону валентной зоны
 2. Не изменяет положение уровня Ферми
 3. Смещает уровень Ферми в сторону зоны проводимости
 4. Увеличивает количество дырок в валентной зоне
- 18 Процессы, происходящие в телах, которые не подвергаются внешним воздействиям, называются
1. равновесными
 2. Неравновесными
 3. квазипроцессами
- 19 Уровень Ферми – это
1. энергию такого квантового состояния, вероятность заполнения которого равна $\frac{1}{2}$
 2. энергию такого квантового состояния, вероятность заполнения которого равна 1
 3. энергию такого квантового состояния, вероятность заполнения которого равна 0
- 20 Элемент какой группы следует ввести в полупроводник, относящийся к IV группе, чтобы получить проводимость *p*-типа?
1. VI.
 2. III.
 3. II.
 4. V.
 5. IV
- 21 Добавление элемента V группы привело к возникновению проводимости *n*-типа. К какой группе относится полупроводник?
1. IV.
 2. V.
 3. II.

4. III.

5. VI

22

Укажите ошибочное утверждение

1. Переход электрона из валентной зоны в зону проводимости означает его переход из связанного состояния в свободное
2. В собственном полупроводнике при абсолютном нуле температур отсутствуют носители электрического тока
3. В кристаллической решетке собственного полупроводника отсутствуют примесные атомы
4. Носителями заряда в зоне проводимости собственного полупроводника

являются дырки

23

Укажите ошибочное утверждение

1. Носителями тока в валентной зоне собственного полупроводника являются дырки
2. Концентрации электронов и дырок в собственном полупроводнике совпадают
3. Минимальная энергия, необходимая для рождения пары электрон - дырка в собственном полупроводнике равна половине ширины запрещенной зоны
4. В собственном полупроводнике при абсолютном нуле температур отсутствуют носители электрического тока

24

Какой элемент нужно ввести в кристаллическую решетку четырехвалентного крепления, чтобы получить полупроводник p -типа?

1. Трехвалентный бор
2. Пятивалентный мышьяк
3. Четырехвалентный германий
4. Пятивалентный фосфор

25

Запрещенная зона это:

1. Энергетическая область, в которой могут свободно распространяться электроны

2. Энергетическая область, в которой могут свободно распространяться дырки
 3. Энергетическая область, в которой не могут свободно распространяться ни электроны, ни дырки
- 26 Квантовая яма это:
1. Полупроводниковый материал, в котором движение носителей заряда ограничено в одном направлении
 2. Полупроводниковый материал, в котором движение носителей заряда ограничено в двух направлениях
 3. Полупроводниковый материал, в котором движение носителей заряда ограничено в трех направлениях
- 27 Квантовая нить это:
1. Полупроводниковый материал, в котором движение носителей заряда ограничено в одном направлении
 2. Полупроводниковый материал, в котором движение носителей заряда ограничено в двух направлениях
 3. Полупроводниковый материал, в котором движение носителей заряда ограничено в трех направлениях
- 28 Квантовая точка это:
1. Полупроводниковый материал, в котором движение носителей заряда ограничено в одном направлении
 2. Полупроводниковый материал, в котором движение носителей заряда ограничено в двух направлениях
 3. Полупроводниковый материал, в котором движение носителей заряда ограничено в трех направлениях
- 29 В какой элементарной квантовой наноструктуре энергетический спектр электронов дискретный?
1. Квантовая яма
 2. Квантовая точка
 3. Квантовая нить
- 30 Как изменяется энергия размерного квантования с увеличением размера наноструктуры?

1. Остается постоянной
 2. Растет
 3. Уменьшается
- 31 Какова кратность вырождения электронных состояний нижней зоны проводимости в материалах A_3B_5 в центре зоны Бриллюэна?
1. 1
 2. 2
 3. 3
 4. 4
 5. 5
 6. 6
- 32 Какова кратность вырождения электронных состояний верхней валентной зоны в материалах A_3B_5 в центре зоны Бриллюэна?
1. 1
 2. 2
 3. 3
 4. 4
 5. 5
 6. 6
- 33 Какова кратность вырождения электронных состояний подзоны легких дырок верхней в материалах A_3B_5 в центре зоны Бриллюэна?
1. 1
 2. 2
 3. 3
 4. 4
 5. 5
 6. 6
- 34 Какова кратность вырождения электронных состояний подзоны тяжелых дырок верхней в материалах A_3B_5 в центре зоны Бриллюэна?
1. 1

2. 2
3. 3
4. 4
5. 5
6. 6

35 Какова кратность вырождения электронных состояний подзоны спин-отщепленных дырок верхней в материалах A_3B_5 в центре зоны Бриллюэна?

1. 1
2. 2
3. 3
4. 4
5. 5
6. 6

36 Сколько дырочных подзон входит в верхнюю валентную зону в материалах A_3B_5 ?

1. 1
2. 2
3. 3
4. 4
5. 5
6. 6

37 Полупроводники, у которых максимум валентной зоны и минимум зоны проводимости расположены в одной и той же точке k -пространства, называют

1. прямозонными
2. непрямоzonными
3. вырожденными
4. легированными

38 Полупроводники, у которых максимум валентной зоны и минимум зоны проводимости расположены в различных точках k -пространства, называют

1. прямозонными
2. непрямозонными
3. вырожденными
4. легированными

39 Фотонными кристаллами принято называть среды, у которых:

1. Диэлектрическая проницаемость периодически меняется в пространстве
2. Электрическая проводимость периодически меняется в пространстве
3. Теплопроводность периодически меняется в пространстве

40 На какое количество типов можно разделить фотонные кристаллы?

1. 1
2. 2
3. 3
4. 4
5. 5

41 При $T=0$ К в собственном полупроводнике

1. отсутствуют свободные носители заряда
2. присутствуют только электроны
3. присутствуют только дырки

42 На рисунке изображена энергетическая схема полупроводника



1. n -типа
2. p -типа
3. собственного полупроводника

43 На рисунке изображена энергетическая схема полупроводника



1. *n*-типа
 2. *p*-типа
 3. собственного полупроводника
- 44 Запрещенная зона – это энергетические уровни, на которых
- 1 находятся электроны
 - 2 электроны не могут находиться
 - 3 находятся фотоны
 - 4 находятся валентные электроны
 - 5 находятся электроны проводимости
- 45 Зона проводимости полупроводника при $T = 0$ К
- 1 не заполнена электронами
 - 2 заполнена электронами
 - 3 заполнена дырками
- 46 Энергетическое расстояние между валентной зоной и зоной проводимости с ростом температуры
- 1 увеличивается
 - 2 уменьшается
 - 3 не изменяется
- 47 Металл – это
1. Твердое тело, у которого отсутствует энергетический зазор между разрешенными зонами
 2. Твердое тело, у которого величина энергетической щели между разрешенными зонами больше 3 эВ
 3. Твердое тело, у которого величина энергетической щели между разрешенными зонами лежит в диапазоне (0,1 – 3,0) эВ
- 48 Диэлектрик – это

1. Твердое тело, у которого отсутствует энергетический зазор между разрешенными зонами
 2. Твердое тело, у которого величина энергетической щели между разрешенными зонами больше 3 эВ
 3. Твердое тело, у которого величина энергетической щели между разрешенными зонами лежит в диапазоне (0,1 – 3,0) эВ
- 49 Полупроводник – это
1. Твердое тело, у которого отсутствует энергетический зазор между разрешенными зонами
 2. Твердое тело, у которого величина энергетической щели между разрешенными зонами больше 3 эВ
 3. Твердое тело, у которого величина энергетической щели между разрешенными зонами лежит в диапазоне (0,1 – 3,0) эВ
- 50 Зона проводимости – это
1. Верхняя, не полностью заполненная энергетическая зона в полупроводниках
 2. Энергетическая щель запрещенных состояний между валентной зоной и зоной проводимости
 3. Верхняя, полностью заполненная энергетическая зона в полупроводниках
- 51 Валентная зона – это
1. Верхняя, не полностью заполненная энергетическая зона в полупроводниках
 2. Энергетическая щель запрещенных состояний между валентной зоной и зоной проводимости
 3. Верхняя, полностью заполненная энергетическая зона в полупроводниках
- 52 Запрещенная зона – это
1. Верхняя, не полностью заполненная энергетическая зона в полупроводниках

2. Энергетическая щель запрещенных состояний между валентной зоной и зоной проводимости
 3. Верхняя, полностью заполненная энергетическая зона в полупроводниках
- 53 Дырка – это
1. частица
 2. квазичастица
 3. способ описания движения электронов в валентной зоне
- 54 Донорный полупроводник получают если
1. в полупроводник, состоящий из элементов 4 группы, ввести в качестве примеси элемент 5 группы
 2. в полупроводник, состоящий из элементов 4 группы, ввести в качестве примеси элемент 3 группы
 3. если в полупроводнике отсутствуют примеси
- 55 Акцепторный полупроводник получают если
1. в полупроводник, состоящий из элементов 4 группы, ввести в качестве примеси элемент 5 группы
 2. в полупроводник, состоящий из элементов 4 группы, ввести в качестве примеси элемент 3 группы
 3. если в полупроводнике отсутствуют примеси
- 56 Эффективная масса носителей заряда в полупроводнике определяется
1. уравнениями дисперсии
 2. уравнением второго закона Ньютона
 3. инертностью

Тема 2. Основы статистики носителей заряда в полупроводниках

Основные вопросы темы:

1. Распределение квантовых состояний в зонах ([1], С. 168 – 169, [2] п. 1.3 – 1.7, [3] глава 1).
2. Распределение Ферми-Дирака ([1], С. 169 – 170, [5], [2] п. 1.3 – 1.7, [3] глава 1).

3. Концентрация электронов и дырок в зонах ([1], С. 170 – 172, [2] п. 1.3 – 1.7, [3] глава 1).
4. Невырожденные полупроводники. Собственная концентрация носителей заряда ([1], С. 172 – 174, [2] п. 1.3 – 1.7, [3] глава 1).

Контрольные вопросы:

1. Функция Ферми-Дирака. Основные свойства
2. Определите положение уровня Ферми в собственном полупроводнике
3. Как изменяется энергетическая плотность состояний при уменьшении размерности полупроводниковой структуры
4. Определите положение уровня Ферми в примесном полупроводнике *p*-типа

Задачи для самостоятельной работы:

1. Определить положение уровня Ферми в Ge *n*-типа при $T = 300$ К, если на $2 \cdot 10^6$ атомов Ge приходится один атом примеси (донорная). Концентрация атомов в Ge равна $4,4 \cdot 10^{28}$ атомов/м³ (N). Постоянная G в выражении, связывающем число электронов в единице объёма в зоне проводимости с температурой и энергетическими уровнями, равна $4,83 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \cdot \text{К}^{-3/2}$ (Ge). Ширина запрещённой зоны $E_g = 0,72$ эВ, а расстояние между дном зоны проводимости и донорным уровнем $0,01$ эВ.
2. Вычислить положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости при температуре 400 К для кристалла Ge, содержащего $5 \cdot 10^{22}$ атомов сурьмы в кубических метрах.
3. Удельное сопротивление собственного Ge при $T = 300$ К $\rho_i = 0,43$ Ом·м. Подвижности электронов и дырок в Ge равны соответственно $0,39$ и $0,19$ м²/В·с. Определить собственную концентрацию электронов и дырок. Какова будет концентрация электронов и дырок при той же температуре, если Ge легировать примесью атомов сурьмы так, что один атом примеси приходится на $2 \cdot 10^6$ атомов Ge? Каково будет удельное сопротивление легированного Ge?

4. Удельное сопротивление собственного Si при 300 К $\rho_i = 3,29 \cdot 10^3$ Ом·м. Подвижности электронов и дырок в Si равны соответственно 0,14 и 0,05 м²/В·с. Определить собственную концентрацию электронов и дырок. Какова будет концентрация электронов и дырок при той же температуре, если Si легировать примесью атомов сурьмы с концентрацией $5 \cdot 10^{20}$ м⁻³? Каково будет удельное сопротивление легированного кремния?
5. Определить концентрации основных и неосновных носителей, удельное сопротивление Ge n-типа при $T = 300$ К, если концентрации доноров N_d равны 10^{20} м⁻³ и 10^{24} м⁻³.
6. Определить концентрации основных и неосновных носителей, удельное сопротивление Si p-типа при $T = 300$ К, если концентрации акцепторов N_a равны 10^{20} м⁻³ и 10^{24} м⁻³.
7. Образец Ge легирован алюминием с концентрацией акцепторной примеси $N_a = 2 \cdot 10^{21}$ м⁻³. Определить концентрации электронов и дырок, удельную проводимость σ этого образца при $T = 300$ К.
8. Удельная проводимость σ образца собственного Si при 300 К равна $4,3 \cdot 10^{-4}$ См/м. Какова концентрация собственных носителей?
9. Образец легированного Si n-типа имеет размеры, мм: $l = 10$; $b = 2$; $h = 1$. Подвижности электронов и дырок равны соответственно 0,14 и 0,05 м²/В·с, концентрация собственных носителей заряда $n_i = 10^{16}$ м⁻³. Определить концентрацию примесей в образце Si, если его сопротивление $R = 150$ Ом. Определить также отношение дырочной проводимости к электронной.

Задание для самостоятельной работы

Проработать план практического занятия по теме «Статистика электронов и дырок в невырожденных полупроводниках». Работа должна включать в себя:

- цель занятия;

- применяемые методы и средства обучения;
- краткую теорию, необходимую для решения типовых задач по теме;
- презентацию по теме занятия, которая должна отражать физические изменения в подходе при рассмотрении объемных полупроводников и полупроводников с квантованием (с квантовыми ямами и квантовыми точками);
- разбор не менее 5 типовых задач;
- задачи для самостоятельного решения.

Тесты для самостоятельной работы

Собственные полупроводники – это полупроводники, в которых

1. нет примесей
2. присутствуют примеси донорного типа
3. присутствуют примеси акцепторного типа

В собственном полупроводнике выполняется

1. $n=p$
2. $n>p$
3. $n<p$

Вероятность того, что электрон будет находиться в квантовом состоянии с энергией E , имеет вид

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

$$2 \quad f(E, T) = 1 - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - F}{kT}\right)}$$

$$3 \quad f(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{F - E}{kT}\right)}$$

Произведение концентраций электронов и дырок для невырожденного полупроводника

1. не зависит от положения уровня Ферми
2. не зависит от температуры

3. не зависит от ширины запрещенной зоны

Концентрация электронов в собственном полупроводнике равна

$$1 \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

$$2 N_D$$

$$3 \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)$$

4 Na

Чем в основном определяется собственная концентрация носителей заряда при $T=\text{const}$?

1. шириной запрещенной зоны
2. типом проводимости
3. положением уровня Ферми
4. эффективной массой

В каком полупроводнике собственная концентрация носителей заряда выше, если $E_g(\text{Ge})=0,66$ эВ, $E_g(\text{Si})=1,12$ эВ, $E_g(\text{GaAs})=1,44$ эВ?

1. Ge
2. Si
3. GaAs

Какую часть электрического тока переносят дырки в собственном полупроводнике, если подвижность электронов в 3 раза больше, чем дырок?

1. 2/3
2. 1/3
3. 1/4
4. 3/4

Какой полупроводник имеет большее удельное электрическое сопротивление?

1. примесный n -типа
2. примесный p -типа
3. компенсированный
4. собственный

Основными носителями тока в полупроводниках n -типа являются

1 электроны

2 дырки

3 электрон-дырочные пары

Сопротивление полупроводников с ростом температуры

1 не изменяется

2 увеличивается

3 уменьшается

В полупроводнике ток, переносимый электронами - $I_{\text{э}}$, и ток, переносимый дырками - $I_{\text{д}}$. Если полупроводник обладает собственной проводимостью, то какое соотношение токов будет верным?

1. $I_{\text{э}} < I_{\text{д}}$

2. $I_{\text{э}} > I_{\text{д}}$

3. $I_{\text{э}} = I_{\text{д}}$

Каким типом проводимости обладают полупроводники с акцепторной примесью?

1. Электронной и дырочной.

2. В основном дырочной.

3. В основном электронной

4. собственной

Укажите значение удельного электросопротивления собственного полупроводника, если концентрация носителей тока $n = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, а подвижности электронов и дырок равны соответственно $\mu_{\text{э}} = 0,36 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\mu_{\text{р}} = 0,14 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$

1. 0,25 Ом·м

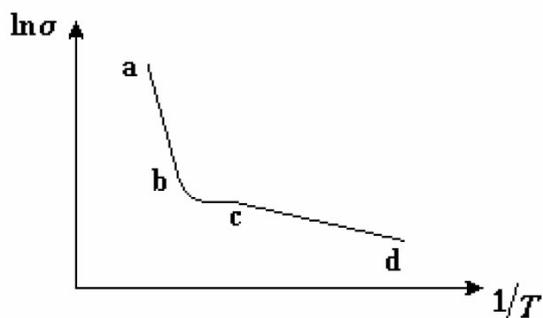
2. 0,50 Ом·м

3. $0,50 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

4. $0,25 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Модуль заряда электронов и дырок $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

На рисунке изображена зависимость логарифма электропроводности примесного полупроводника от обратной температуры.



На каком участке графика проводимость полупроводника является собственной

1. ab
2. bc
3. cd

Чему равна ширина запрещенной зоны собственного полупроводника, если логарифм отношения его электропроводности σ_1 при $T_1 = 100$ К к его электропроводности σ_2 при $T_2 = 200$ К равен -3 ($\ln \sigma_1/\sigma_2 = -3$)?

1. $16,56 \cdot 10^{-21}$ Дж
2. $8,28 \cdot 10^{-19}$ Дж
3. $16,56 \cdot 10^{-23}$ Дж
4. $8,28 \cdot 10^{-21}$ Дж

Коэффициент Больцмана $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Вычислить энергию ионизации доноров в кремнии n -типа, если концентрация электронов 10^{14} см $^{-3}$ при $T_1=50$ К и 10^{12} см $^{-3}$ при $T_2=28$ К

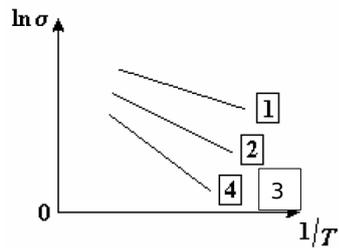
1. 0,0496 эВ
2. 0,0258 эВ
3. 0,143 эВ
4. 0,125 эВ

Где располагается уровень Ферми у невырожденного p -полупроводника?

1. посередине запрещенной зоны
2. в запрещенной зоне ближе к дну зоны проводимости
3. в запрещенной зоне ближе к потолку валентной зоны
4. внутри зоны проводимости
5. внутри валентной зоны

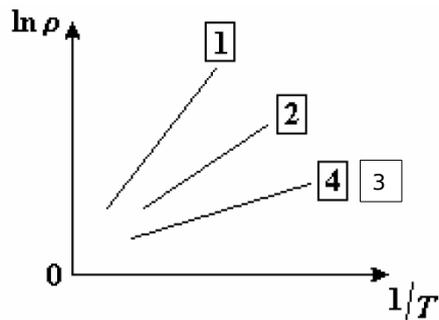
На рисунке изображены зависимости логарифмов удельной

электропроводности собственных полупроводников от обратной температуры. Какой из графиков соответствует полупроводнику с наименьшей шириной запрещенной зоны?



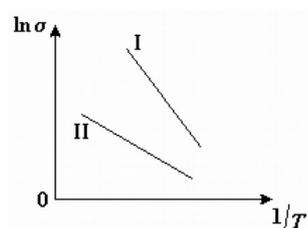
1. 1
2. 2
3. 3

На графике изображены зависимости логарифмов удельного электросопротивления собственных полупроводников от обратной температуры. Какой из графиков соответствует полупроводнику с наибольшей шириной запрещенной зоны?



1. 1
2. 2
3. 3

На рисунке приведены графики зависимости логарифмов удельной электропроводности двух собственных полупроводников. Укажите ошибочное утверждение, касающееся графиков.

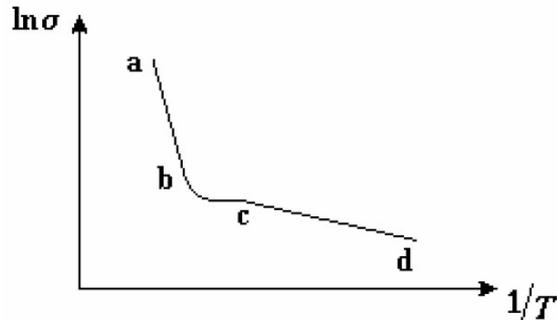


1. Энергия активации, определенная из графика I, меньше, чем по графику II
2. Удельное электросопротивление, определенное по графику II во всем рассмотренном на графике интервале температур больше удельного электросопротивления определенного по графику I
3. Концентрация носителей тока в полупроводнике, описанном графиком I, растет с температурой быстрее, чем для полупроводника II
4. Концентрации электронов и дырок в полупроводниках I и II зависят от их энергий активации

Какое из приведенных ниже соотношений для концентраций электронов (n_e) и дырок (n_p) соответствует полупроводнику n - типа?

1. $n_e \gg n_p$
2. $n_p > n_e$
3. $n_e = n_p$
4. $n_p \gg n_e$

На рисунке изображена зависимость логарифма электропроводности полупроводника n -типа от обратной температуры. На каком участке графика основными носителями тока являются электроны, а концентрация дырок близка к нулю?



1. ab
2. bc
3. cd

При увеличении температуры концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике возросла в 10 раз, а подвижности электронов и дырок в 1,3 раза. Как изменилась удельная электропроводность полупроводника?

1. Возросла в 13 раз
2. Осталась неизменной
3. Уменьшилась в 13 раз
4. Возросла в 26 раз

Зависит ли концентрация носителей заряда в примесных полупроводниках от

1. ширины валентной зоны
2. температуры
3. энергетического расстояния между частично заполненным акцепторным уровнем и валентной зоной
4. ширины зоны проводимости

Чем больше ширина запрещенной зоны, тем

1. меньше собственная концентрация
2. больше собственная концентрация
3. собственная концентрация не зависит от ширины запрещенной зоны

Плотность состояний зонных электронов в объемном материале вблизи края зоны имеет вид:

1. Набора дельта-функций Дирака
2. Набора корневых гиперболических функций
3. Набора ступенчатых функций
4. Корневой параболы

Плотность состояний зонных электронов в квантовой яме вблизи края зоны имеет вид:

1. Набора дельта-функций Дирака
2. Набора корневых гиперболических функций
3. Набора ступенчатых функций
4. Корневой параболы

Плотность состояний зонных электронов в квантовой нити вблизи края зоны имеет вид:

1. Набора дельта-функций Дирака
2. Набора корневых гиперболических функций
3. Набора ступенчатых функций
4. Корневой параболы

Плотность состояний зонных электронов в квантовой точке вблизи края зоны имеет вид:

1. Набора дельта-функций Дирака
2. Набора корневых гиперболических функций
3. Набора ступенчатых функций
4. Корневой параболы

В вырожденном полупроводнике уровень Ферми находится

1. в разрешенной зоне
2. в запрещенной зоне
3. в примесной зоне

Если энергия уровня меньше энергии Ферми, то вероятность его заполнения равна

1. 0
2. $\frac{1}{2}$
3. 1

Уровень Ферми в собственном полупроводнике с ростом температуры смещается в сторону валентной зоны, если

1. $m_n < m_p$
2. $m_n > m_p$
3. $m_n = m_p$

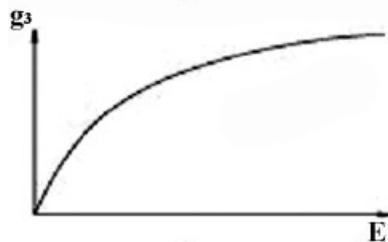
Уровень Ферми в собственном полупроводнике с ростом температуры смещается в сторону зоны проводимости, если

1. $m_n < m_p$
2. $m_n > m_p$
3. $m_n = m_p$

Уровень Ферми в собственном полупроводнике не зависит от температуры, если

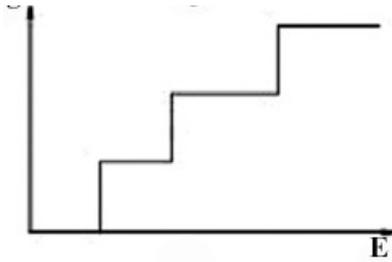
1. $m_n < m_p$
2. $m_n > m_p$
3. $m_n = m_p$

На рисунке представлена плотность состояний



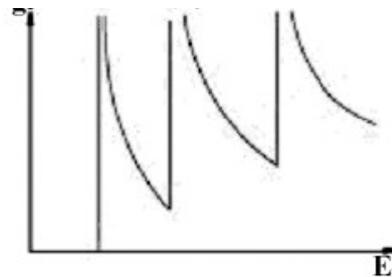
1. в трехмерном кристалле
2. в квантовой яме
3. в квантовой проволоке

На рисунке представлена плотность состояний



1. в трехмерном кристалле
2. в квантовой яме
3. в квантовой проволоке

На рисунке представлена плотность состояний



1. в трехмерном кристалле
2. в квантовой яме
3. в квантовой проволоке

На какой вопрос о примесном полупроводнике Вы ответили "нет"?

1 Зависит ли электропроводность примесного полупроводника от температуры?

2 Заполнены ли донорные уровни в примесном полупроводнике n - типа при $T = 0$ К?

3 Заполнены ли акцепторные уровни в примесном полупроводнике p - типа при $T = 0$ К?

4 Изменяется ли электропроводность чистого полупроводника после введения донорных примесей?

Логарифм электропроводности собственного полупроводника ($\ln \sigma$) при увеличении обратной температуры ($1/T$)

1 уменьшается

2 увеличивается

3 не зависит от температуры

Электропроводность полупроводника после введения донорных примесей

1 увеличивается

2 уменьшается

3 не изменяется

Уровень Ферми расположен вблизи середины запрещенной зоны

1. у донорного полупроводника

2. у акцепторного полупроводника

3. у собственного полупроводника

Уровень Ферми смещен в сторону зоны проводимости

1. у донорного полупроводника

2. у акцепторного полупроводника

3. у собственного полупроводника

Уровень Ферми смещен в сторону зоны проводимости

1. у донорного полупроводника

2. у акцепторного полупроводника

3. у собственного полупроводника

Функция $f(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - F}{kT}\right)}$ описывает

1. Вероятность того, что электрон будет находиться в квантовом состоянии с энергией E

2. Вероятность того, что дырка будет находиться в квантовом состоянии с энергией E

3. Вероятность того, что электрон будет находиться в квантовом состоянии с энергией F

Энергия такого квантового состояния, вероятность заполнения которого равна $\frac{1}{2}$, называется

1. Уровень Ферми

2. Уровень протекания

3. Уровень заполнения

Выражение $\sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$ определяет

1. концентрацию доноров
2. собственную концентрацию
3. концентрацию акцепторов

Уровень Ферми расположен в запрещенной зоне ближе к потолку валентной зоны

1. у невыраженного полупроводника р-типа
2. у вырожденного полупроводника р-типа
3. у невыраженного полупроводника п-типа
4. у вырожденного полупроводника п-типа

Плотность состояний зонных электронов вблизи края зоны имеет вид имеет вид корневой параболы для

1. объемного материала
2. квантовой ямы
3. квантовой проволоки
4. квантовой точки

Плотность состояний зонных электронов вблизи края зоны имеет вид имеет вид набора ступенчатых функция для

1. объемного материала
2. квантовой ямы
3. квантовой проволоки
4. квантовой точки

Плотность состояний зонных электронов вблизи края зоны имеет вид имеет вид набора корневых гипербол для

1. объемного материала
2. квантовой ямы
3. квантовой проволоки
4. квантовой точки

Плотность состояний зонных электронов вблизи края зоны имеет вид имеет вид набора дельта-функций Дирака для

1. объемного материала
2. квантовой ямы
3. квантовой проволоки
4. квантовой точки

Выражение $n = N_c \exp\left(\frac{F - E_c}{kT}\right)$ справедливо для

1 параболической зоны

2 линейной зоны

3 гиперболической зоны

Чему равна ширина запрещенной зоны собственного полупроводника, если логарифм отношения его электропроводности σ_1 при температуре $T_1 = 200$ К к электропроводности σ_2 при $T_2 = 400$ К равен -2 ($\ln(\sigma_1/\sigma_2) = -2$)?

1 $22,0810^{-21}$ Дж

2 $11,0410^{-23}$ Дж

3 $11,0410^{-20}$ Дж

4 $22,0810^{-23}$ Дж

При малом уровне вырождения статистика Ферми-Дирака

1 переходит в статистику Бозе-Энштейна

2 переходит в статистику Максвелла-Больцмана

3 не изменяется

Ширина запрещенной зоны E_g собственного кремния равна $1,12$ эВ.

Вычислить вероятность заполнения электроном уровня вблизи дна зоны проводимости при температурах 0 К.

1 0

2 $4 \cdot 10^{-10}$

3 1

Ширина запрещенной зоны E_g собственного кремния равна 1,12 эВ. Вычислить вероятность заполнения электроном уровня вблизи дна зоны проводимости при температурах 300 К.

1 0

2 $4 \cdot 10^{-10}$

3 1

Найдите положение уровня Ферми (по отношению к собственному уровню Ферми E_i) в кремнии при $T = 300$ К, если кремний содержит $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ атомов мышьяка As и $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ атомов бора B.

1 0,393 эВ

2 0,6 эВ

3 0,1 эВ

Найти положение уровня Ферми в собственном полупроводнике относительно середины запрещенной зоны при комнатной температуре ($T = 300$ К), если эффективная масса электрона в 2 раза больше эффективной массы дырки

1 $13,5 \cdot 10^{-3}$ эВ

2 $13,5 \cdot 10^{-2}$ эВ

3 $13,5 \cdot 10^{-1}$ эВ

Определить положение уровня Ферми в германии n-типа при температуре $T = 300$ К, если на $2 \cdot 10^6$ атомов германия приходится один атом примеси.

Концентрация атомов в германии равна $4,4 \cdot 10^{28}$ атом/м³. Расстояние между дном зоны проводимости и донорным уровнем составляет 0,01 эВ.

1 на 0,18 эВ ниже дна зоны проводимости

2 на 0,18 эВ выше потолка валентной зоны

3 на 0,18 эВ выше дна зоны проводимости

4 на 0,18 эВ ниже потолка валентной зоны

Тема 3. Диоды с контактом металл-

полупроводник Основные вопросы темы:

1. Зонные диаграммы контактов металл-полупроводник. Запорный и антизапорные слои ([1] глава 6, [2] глава 6).
2. Распределение поля и потенциала в обедненном слое (Барьер Шоттки) ([1] глава 6, [2] глава 6).
3. Ширина обедненного слоя в тепловом равновесии и при наличии смещения ([1] глава 6, [2] глава 6)
4. Вольтамперные характеристики диодов с контактом Шоттки ([1] глава 6, [2] глава 6)
5. Высота барьера в реальных контактах металл-кремний, силицид кремний-кремний, металл-арсенид галлия ([1] глава 6, [2] глава 6)
6. Омический контакт ([1] глава 6, [2] глава 6)

Контрольные вопросы:

1. Постройте зонную диаграмму контакта n -полупроводник – металл, если работа выхода полупроводника больше, чем работа выхода металла.
2. Постройте зонную диаграмму контакта p -полупроводник – металл, если работа выхода полупроводника больше, чем работа выхода металла.
3. Постройте зонную диаграмму контакта n -полупроводник – металл, если работа выхода полупроводника меньше, чем работа выхода металла.
4. Постройте зонную диаграмму контакта p -полупроводник – металл, если работа выхода полупроводника меньше, чем работа выхода металла.
5. Поясните механизм токопереноса в диоде Шоттки
6. Как меняется ширина области пространственного заряда при подаче прямого напряжения на контакт металл – полупроводник.

7. От чего зависит ток насыщения на контакт металл – полупроводник

Задачи для самостоятельной работы:

1. Обратный ток насыщения диода с барьером Шоттки равен 2 мкА. Диод соединен последовательно с резистором и источником постоянного напряжения $E = 0,2$ В так, что на диод подается прямое напряжение рисунок 7.

Определить сопротивление резистора, если падение напряжения на нем равно 0,1 В. Диод работает при $T = 300$ К

2. Известен обратный ток насыщения некоторого диода I_0 с барьером Шоттки. Диод соединен последовательно с резистором и источником постоянного напряжения смещения $E_{см}$, так что на диод подается прямое напряжение

Определить сопротивление резистора, если задано падение напряжения на нем U_R , В (табл).

№ варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8
I_0 , мкА	2	1	1,2	1,5	1,3	1,4	2,2	2,5	3
$E_{см}$, В	0,2	0,6	0,8	0,3	0,4	0,5	0,35	0,2	0,1
U_R , В	0,1	0,3	0,4	0,15	0,2	0,25	0,17	0,1	0,05

- краткую теорию, необходимую для выполнения лабораторной работы;

- электрическую схему для проведения измерений и образцы таблиц для заполнения;

- не менее 5 контрольных вопросов, которые могут быть использованы как для получения допуска к лабораторной работе, так и при ее защите;

- методику обработки экспериментальных данных, включая расчет погрешности.

Тесты для самостоятельной работы

1 Работа выхода определяется

1. расстоянием от уровня Ферми до уровня вакуума
2. расстоянием от дна зоны проводимости до уровня вакуума
3. расстояние от уровня Ферми до дна зоны проводимости

2 Линейность графика зависимости $C^{-2}=f(U)$ барьера

Шоттки означает, что

1. в образце имеется градиент концентрации примеси
2. полупроводник по всей толщине однородно легирован
3. полупроводник на глубину проникновения области объемного заряда однородно легирован
4. полупроводник за границей области объемного заряда однородно легирован

3 Потенциал, препятствующий переходу электрона из полупроводника в металл, называется

1. контактным
2. барьерным
3. потенциалом смещения

4 Барьер Шоттки – это

1. контакт металл – полупроводник
2. контакт одного проводника с разными типами проводимости
3. контакт разных полупроводников с разными типами проводимости

5 Барьер Шоттки – это

1. *n-p* переход
2. контакт металла с полупроводником *n*-типа

3. контакт металла с переходом $p-n-p$
4. контакт металла с полупроводником p -типа
5. контакт металла с окисью
6. **Расстояние от уровня Ферми до уровня вакуума называется**
 1. работой выхода
 2. уровнем протекания
 3. красной границей

Тема 4. Полупроводниковые диоды

Основные вопросы темы:

1. Образование $p-n$ -перехода, контактная разность потенциалов. Зонная диаграмма $p-n$ -перехода в тепловом равновесии ([1] глава 8, [2] глава 2).
2. Распределение поля, потенциала и ширина резкого и плавного $p-n$ - переходов в тепловом равновесии ([1] глава 8, [2] глава 2).
3. Ширина резкого и плавного $p-n$ - перехода при смещениях ([1] глава 8, [2] глава 2).
4. Вольт-емкостная характеристика. Диодная теория выпрямления $p-n$ - перехода в диффузионном приближении ([1] глава 8, [2] глава 2).
5. Диод с короткой базой ([1] глава 8, [2] глава 2).
6. Влияние сопротивления базы ([1] глава 8, [2] глава 2).

Контрольные вопросы:

1. Постройте зонную диаграмму $p-n$ -перехода в равновесии.
2. Постройте зонную диаграмму $p-n$ -перехода при прямом смещении
3. Постройте зонную диаграмму $p-n$ -перехода при обратном смещении
4. Как зависит ширина ОПЗ от степени легирования n - и p -областей.

5. Почему на границе областей возникает контактная разность потенциалов?
6. Чем отличается резкий p - n -переход от плавного?
7. Условия применения выражения для ВАХ диода с длинной базой
8. Условия применения выражения для ВАХ диода с короткой базой

Задачи для самостоятельного решения

1. Имеется сплавной германиевый p - n -переход с концентрацией $N_d = 10^{23}$ см⁻³, причем на каждые 10^8 атомов германия приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов при температуре $T = 300$ К (концентрации атомов N и ионизованных атомов n_i принять равными $n_i = 4,4 \cdot 10^{22}$ и $2,5 \cdot 10^{13}$ см⁻³ соответственно).

2. Германиевый сплавной p - n -переход имеет обратный ток насыщения $I_0 = 25$ мкА, а кремниевый с такими же размерами ток $I_0 = 10^{-8}$ А. Вычислить и сравнить прямые напряжения на переходах при $T = 293$ К, если через каждый диод протекает прямой ток 100 мА.

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

4. В идеальном p - n -переходе обратный ток насыщения $I_0 = 10^{-14}$ А при $T = 300$ К, $I_0 = 10^{-9}$ А при $T = 125$ °С. Определить напряжения на p - n -переходе в обоих случаях, если прямой ток равен 1 мА.

5. Барьерная емкость диода равна 200 пФ при обратном напряжении 2 В. Какое обратное напряжение следует приложить, чтобы емкость уменьшилась до 50 пФ, если контактная разность потенциалов $\phi_k = 0,82$ В.

Задание для самостоятельной работы

Проработать план лабораторной по теме «Прямые и обратные температурно-вольт-амперные характеристики p - n -переходов на основе кремния и германия».

Работа должна включать в себя:

- цель занятия;
- рекомендуемое оборудование для проведения измерений;

- краткую теорию, необходимую для выполнения лабораторной работы;
- электрическую схему для проведения измерений и образцы таблиц для заполнения;
- не менее 5 контрольных вопросов, которые могут быть использованы как для получения допуска к лабораторной работе, так и при ее защите;
- методику обработки экспериментальных данных, включая расчет погрешностей.

Тесты для самостоятельной работы

Гомо p - n -переходом называют

1. контакт двух полупроводников одного вида с различными типами проводимости (электронным и дырочным)
2. контакт двух полупроводников одного вида с одинаковыми типами проводимости (электронным и дырочным)
3. контакт двух полупроводников разного вида с различными типами проводимости (электронным и дырочным)
4. контакт металла и полупроводника

Для несимметричных p^+ - n -переходов ширина обедненной области

1. в полупроводнике p -типа будет существенно меньше, чем ширина обедненной области в полупроводнике n -типа
2. в полупроводнике p -типа будет существенно больше, чем ширина обедненной области в полупроводнике n -типа
3. в полупроводнике p -типа будет равна ширине обедненной области в полупроводнике n -типа

Диффузионные компоненты тока в p - n -переходе обусловлены

1. основными носителями
2. неосновными носителями
3. и основными, и неосновными носителями

Дрейфовые компоненты тока в p - n -переходе обусловлены

1. основными носителями
2. неосновными носителями
3. и основными, и неосновными носителями

При прямом внешнем напряжении на p - n -переходе

доминирует

1. дрейфовая компонента тока
2. диффузионная компонента тока
3. дрейфовая и диффузионная компонента равноправны

При обратном внешнем напряжении на p - n -переходе доминирует

1. дрейфовая компонента тока
2. диффузионная компонента тока
3. дрейфовая и диффузионная компонента равноправны

При приложении внешнего напряжения расщепление квазиуровней Ферми F_n и F_p равно

1. нулю
2. приложенному напряжению V_G
3. ширине запрещенной зоны

Измерение ВФХ выполняют при подаче на p - n -структуру

1. прямого смещения фиксированного значения
2. обратного смещения фиксированного значения
3. прямого смещения переменного значения
4. обратного смещения переменного значения

В какой области сильно несимметричного p - n -перехода регистрируется профиль распределения примесей методом ВФХ

1. в сильнолегированной области
2. в слаболегированной области
3. в области с высокой концентрацией носителей

Какой формулой описывается ВАХ p - n перехода?

1. $I = I_n + I_p$

2. $I = I_0 \left[\exp(qU/kT) - 1 \right]$

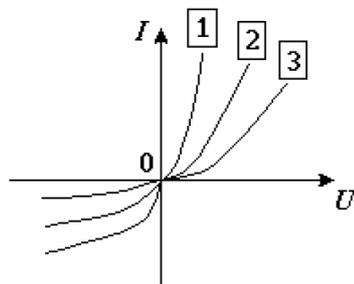
3. $I = qS \left[\frac{L_n n_{p0}}{\tau_n} + \frac{L_p p_{n0}}{\tau_p} \right] \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right]$

4. Все ответы правильны

Как влияет рост температуры на ВАХ полупроводникового диода?

1. Прямой и обратный токи растут
2. Прямой и обратный токи уменьшаются
3. Прямой ток растет, а обратный уменьшается
4. Обратный ток растет, а прямой уменьшается
5. Прямой ток увеличивается, а обратный ток не зависит от температуры
6. Температура не влияет на ВАХ диода

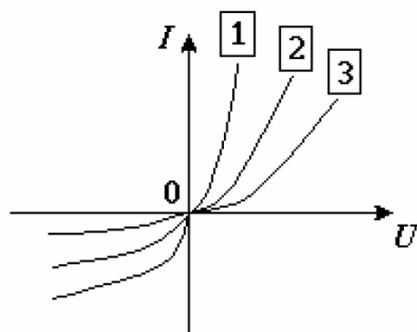
На рисунке приведены вольт-амперные характеристики полупроводникового диода.



Укажите номер графика, соответствующего характеристике диода находящегося при самой низкой температуре.

1. 1
2. 2
3. 3

На рисунке приведены вольт-амперные характеристики полупроводникового диода.



Укажите номер графика, соответствующего характеристике диода находящегося при самой высокой температуре.

1. 1
2. 2
3. 3

Какое утверждение ошибочно

1. ширина области p - n -перехода зависит от направления внешнего электрического поля
2. p - n переход обладает выпрямляющим действием
3. внутреннее электрическое поле в p - n переходе направлено от p - к n -полупроводнику
4. концентрация носителей заряда в p - n переходе зависит от температуры

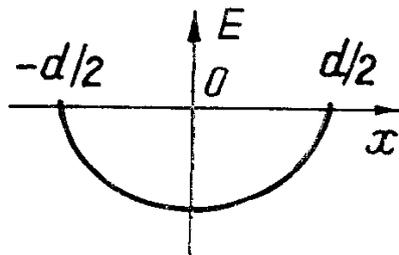
Ширина области пространственного заряда p - n -перехода

1. увеличивается с ростом прямого напряжения смещения
2. уменьшается с ростом прямого напряжения смещения
3. не зависит от значения напряжения смещения

Плавный p - n -переход характеризуется

1. линейным распределением по координате легирующей примеси
2. линейной зависимостью тока от напряжения
3. постоянным значением легирующей примеси

Распределение напряженности электрического поля по координате, представленное на рисунке, характерно для



1. плавного p - n -перехода
2. резкого p - n -перехода
3. барьера Шоттки

По тангенсу угла наклона зависимости $C^{-2}=f(U)$ для p - n -перехода можно определить

1. концентрацию доноров
2. концентрацию акцепторов
3. собственную концентрацию

Выражение $j = j_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right]$ описывает ВАХ диода

1. с бесконечной базой
2. с короткой базой
3. справедливо для любого p - n -перехода

Полупроводниковым гетеропереходом называют:

1. Контакт двух полупроводников различного вида и разного типа проводимости
2. Контакт двух полупроводников одинакового вида и разного типа проводимости
3. Контакт двух полупроводников различного вида и одинакового типа проводимости

Какие два параметра материалов, образующих гетеропереход, должны совпадать с высокой точностью:

1. Электронное сродство и ширина запрещенной зоны
2. Температурный коэффициент расширения и постоянная решетки
3. Электронное сродство и постоянная решетки

Какие утверждения неверны?

- 1 электроны и дырки в области p - n - перехода рекомбинируют
- 2 при включении внешнего электрического поля E ширина p - n – перехода Δl не изменяется
- 3 электросопротивление p - n -перехода в диоде много больше, чем электросопротивление контактирующих p - и n - полупроводников
- 4 p - n - переход обладает выпрямляющим действием

В полупроводнике p -типа будет существенно меньше, чем ширина обедненной области в полупроводнике n -типа, если p - n -переход

1. p^+ - n
2. p - n^+
3. p - i - n

Основные носители заряда в p - n -переходе создают

1. дрейфовую компоненту тока
2. диффузионную компоненту тока
3. электрическую компоненту тока

Несновные носители заряда в p - n -переходе создают

1. дрейфовую компоненту тока
2. диффузионную компоненту тока
3. электрическую компоненту тока

Диффузионная компонента тока в p - n -переходе доминирует при

1. при прямом напряжении смещения
2. при обратном напряжении смещения
3. при отсутствии напряжения смещения

Дрейфовая компонента тока в p - n -переходе доминирует при

1. при прямом напряжении смещения
2. при обратном напряжении смещения
3. при отсутствии напряжения смещения

Внутреннее электрическое поле в p - n переходе

1. направлено от n - к p –полупроводнику
2. направлено от p - к n –полупроводнику
3. отсутствует

Тема 5. Лавинно-пролетные диоды

Основные вопросы темы:

1. Лавинно-пролетный режим работы и режим с захваченной плазмой. *p-i-n*- диоды ([1], глава 8).
2. Виды пробоя *p-n*- перехода: тепловой, туннельный, лавинный. Коэффициенты ионизации электронов и дырок, критерий лавинного пробоя, коэффициенты умножения электронов и дырок. Соотношения для зависимости напряжения лавинного пробоя резкого *p-n*-перехода от концентрации примесей ([1], глава 8).
3. Туннельные и обращенные диоды. Особенности вольтамперных характеристик. Влияние электрон-фононного взаимодействия на туннельные процессы ([1], глава 8).
4. Механизмы переноса тока в диэлектриках. Токи, ограниченные пространственным зарядом ([1], глава 8).

Контрольные вопросы:

1. Охарактеризуйте основные группы процессов исполнения проектов
2. Назовите основные функции системы контроля проекта.
3. Перечислите основные объекты контроля в проекте.
4. Какими соображениями необходимо руководствоваться при принятии решения о внесении изменения в проект?
5. Каким образом осуществляется процесс управления изменениями?
6. В чем состоит назначение процессов закрытия проекта?
7. Какой документ является заключительным в проекте?
8. Почему нужно извлекать уроки проекта?
9. С какой целью формируется архив проекта?
10. Какие процедуры нужно выполнить, чтобы закрыть контракты проекта?

Задачи для самостоятельной работы

1. Определить длину пролетного пространства ЛПД, предназначенного для работы на частоте $f = 5 \text{ ГГц}$. Материал – кремний. Движение электронов происходит с дрейфовой насыщенной скоростью. Максимальный угол пролета следует взять величиной π радиан.
2. Определить эквивалентное сопротивление нагрузки, если выходная мощность ЛПД составляет 2 Вт, а постоянная составляющая тока $I_0 = 0.6 \text{ А}$.
Определить длину свободного пробега электронов в германии и электропроводность при комнатной температуре, если концентрация собственных носителей $n_i = p_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, подвижность электронов $\mu_n = 3800 \text{ см}^2 / (\text{с} \cdot \text{В})$, и подвижность дырок $\mu_p = 1700 \text{ см}^2 / (\text{с} \cdot \text{В})$. Средняя скорость электронов в полупроводнике 10^5 м/с .
3. Определить активное сопротивление арсенид галлиевого ЛПД, имеющего величину тока пробоя 50 мА и напряжение пробоя 50 В, работающего в качестве генератора на частоте 10 ГГц с КПД 22%. Длина пространства дрейфа равна 0,1 см.
4. Определить величину пускового тока генератора арсенид галлиевого ЛПД в случае $\Theta = \pi$, если коэффициент ионизации $\alpha = 10^5 \text{ см}^{-1}$, толщина и площадь полупроводниковой структуры 5 мкм и $0,01 \text{ см}^2$ сопротивление потерь 1,0 Ом.
5. Каких размеров должна быть длина пространства дрейфа ЛПД, выполненного на GaAs в 3-х сантиметровом диапазоне длин волн и постоянное напряжение смещения, чтобы величина КПД была бы 20%, при напряженности электрического поля на диоде $1 \cdot 10^5 \text{ В/см}$, подвижности $\mu_n = 8500 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$.

Задание для самостоятельной работы

Проработать план лабораторной по теме «Туннельный диод». Работа должна включать в себя:

- цель занятия;
- рекомендуемое оборудование для проведения измерений;
- краткую теорию, необходимую для выполнения лабораторной работы;
- электрическую схему для проведения измерений и образцы таблиц для заполнения;
- не менее 5 контрольных вопросов, которые могут быть использованы как для

получения допуска к лабораторной работе, так и при ее защите;

- методику обработки экспериментальных данных, включая расчет погрешностей.

Тесты для самостоятельной работы

Прибор, в котором для получения носителей заряда используется

лавинное умножение, называется

1. биполярный транзистор
2. лавинно-пролетный диод
3. диод Шоттки

Соударение носителя с нейтральным атомом кристаллической

структуры приводит к образованию пары новых носителей—

электрона и дырки, называется

1. ударная ионизация
2. лавинное умножение
3. рассеяние

Эффект взаимодействия наблюдается, если

1. $\theta_{др} < \pi$
2. $\theta_{др} > \pi$
3. $\theta_{др} = 2\pi$

Тема 6. Полевые транзисторы, управляемые *p-n*-переходом

Основные вопросы темы:

1. Полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом. Принцип действия ([2] глава 7, [3] глава 4).
2. Расчет входных вольтамперных характеристик полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом ([2] глава 7, [3] глава 4).
3. Много и мало сигнальные параметры. Частотные свойства транзисторов с управляющим *p-n*-переходом. Транзисторы со статической индукцией ([2] глава 7, [3] глава 4)

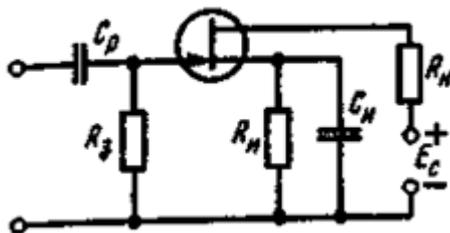
Контрольные вопросы:

1. Представьте структурную схему полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом.

2. Поясните условное обозначение полевого транзистора с управляющим p - n -переходом
3. Объясните вид передаточных характеристик полевого транзистора с управляющим p - n -переходом.
4. Объясните вид выходных характеристик полевого транзистора с управляющим p - n -переходом
5. Как меняется ширина канала при подаче напряжения на затвор?
6. Как меняется ширина канала при подаче напряжения между стоком и истоком?
7. Схема замещения полевого транзистора с управляющим p - n -переходом.

Задачи для самостоятельного решения

1. У некоторого полевого транзистора с управляющим p - n -переходом $I_{cmax} = 2$ мА, $U_{omc} = 4$ В. Определить:
 - а) какой ток будет протекать при обратном напряжении смещения затвор-исток равном 2 В;
 - б) чему равна крутизна и максимальная крутизна в этом случае
2. Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом, имеющий $I_{Cmax} = 2$ мА и $S = 2$ мА/В, включен в усилительный каскад по схеме с общим истоком. Сопротивление резистора нагрузки $R_H = 10$ кОм. Определить коэффициент усиления по напряжению, если: а) $U_{зи} = -1$ В; б) $U_{зи} = -0,5$ В; в) $U_{зи} = 0$.
3. В усилительном каскаде с общим истоком, показанным на рисунке 3, сопротивление нагрузки $R_H = 20$ кОм. Эффективное входное сопротивление полевого транзистора 20 кОм, рабочая крутизна $S = 2$ мА/В. Определить коэффициент усиления каскада.



Задание для самостоятельной работы

Проработать план лабораторной по теме «передаточные характеристики полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом». Работа должна включать в себя:

- цель занятия;
- рекомендуемое оборудование для проведения измерений;
- краткую теорию, необходимую для выполнения лабораторной работы;
- электрическую схему для проведения измерений и образцы таблиц для заполнения;
- не менее 5 контрольных вопросов, которые могут быть использованы как для получения допуска к лабораторной работе, так и при ее защите;
- методику обработки экспериментальных данных, включая расчет погрешностей.

Тесты для самостоятельной работы

В режиме насыщения ток стока полевого транзистора:

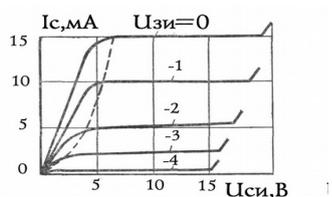
1. полностью не зависит от напряжения на затворе
2. зависит от напряжения на затворе линейно
3. зависит от напряжения на затворе экспоненциально

Полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал и управляемый электрическим полем

- это:

- 1) полевой транзистор
- 2) биполярный транзистор
- 3) стабилитрон

На рис. показана ВАХ полевого транзистора....

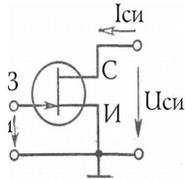


1. Стоко-затворная характеристика
2. Передаточная характеристика
3. Стоковая характеристика

Выберете правильный ответ. Основное преимущество полевых транзисторов перед биполярными транзисторами

1. Высокое входное сопротивление
2. Меньше стоимость
3. Проще конструктивное оформление.
4. Меньше уровень шума

На рис. показана схема включения полевого транзистора

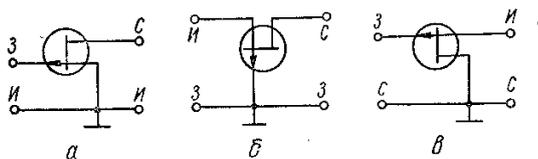


1. с ОИ
2. с ОС
3. с ОЗ

Основной параметр полевых транзисторов, определяемый по формуле $S = dI_c / U_{зи}$ при $U_{си} = \text{const}$, - это.....

1. Дифференциальное сопротивление
2. Коэффициент передачи по току
3. Крутизна

На каком из рисунков показана схема включения полевого транзистора с общим затвором?



Полевой транзистор, включенный по схеме с общим истоком, имеет:

1. 1. низкое входное и низкое выходное сопротивления
2. 2. низкое входное и высокое выходное сопротивления
3. 3. низкое входное и среднее выходное сопротивления
4. 4. высокое входное и среднее выходное сопротивления
5. 5. высокое входное и высокое выходное сопротивления

В полевом транзисторе с р-каналом на затвор подаётся потенциал

- 1.Нейтральный
- 2.Отрицательный
- 3.Положительный

Какой прибор обозначен



- 1.Динистор.
- 2.Полевой транзистор с р-каналом.
3. Светодиод.

Как меняется ширина ОПЗ р-п перехода полевого транзистора при увеличении абсолютной величины потенциала затвора.

- 1.Уменьшается
- 2.Увеличивается
- 3.Не меняется

Как меняется ток стока полевого транзистора при уменьшении абсолютной величины потенциала затвора.

- 1.Уменьшается
- 2.Увеличивается
- 3.Не меняется

Как меняется ширина р-п перехода при уменьшении абсолютной величины потенциала затвора.

- 1.Уменьшается
- 2.Увеличивается
- 3.Не меняется

Тема 7. Биполярные транзисторы

Основные вопросы темы:

1. Режим работы: нормальный активный режим, инверсный активный режим, режим насыщения, режим отсечки ([1] глава 8, п.4, [2] глава 4, [3] глава 2).
2. Транзистор как усилитель мощности. Схемы включения с общей базой и общим эмиттером ([1] глава 8, п.4, [2] глава 4, [3] глава 2).

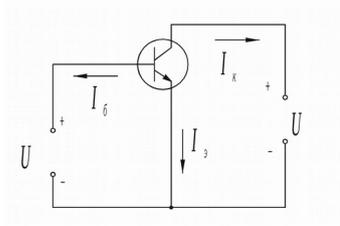
3. Входные и выходные данные вольтамперные характеристики ([1] глава 8, п.4, [3] п. 8.8, [2] глава 4, [3] глава 2).
4. Интегральные параметры - коэффициент переноса базы, коэффициент инжекции эмиттера, коэффициенты передачи тока в схемах с ОБ и ОЭ ([1] глава 8, п.4, [3] п. 8.8, [2] глава 4, [3] глава 2).
5. Разновидность биполярных транзисторов, используемых в интегральных микросхемах: многоэмиттерный транзистор, многоколлекторный транзистор, горизонтальный транзистор, переключающий транзистор с барьером Шоттки ([1] глава 8, п.4, [2] глава 4, [3] глава 2).
6. Биполярные транзисторы с гетеропереходами и вариозонной базой ([1] глава 8, п.4, [3] п. 8.8, [2] глава 4, [3] глава 2).

Контрольные вопросы:

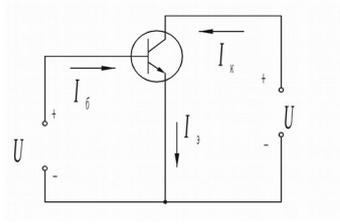
1. Изобразите движение электронов в биполярном транзисторе при работе в активном режиме
2. Поясните условное обозначение биполярного транзистора
3. Поясните эффект Эрли на выходных характеристиках биполярного транзистора
4. Выходные характеристики биполярного транзистора в активном режиме в схеме с общей базой
5. Выходные характеристики биполярного транзистора в активном режиме в схеме с общим эмиттером
6. Схема замещения биполярного транзистора в схеме с общей базой
7. Схема замещения биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

Задачи для самостоятельной работы

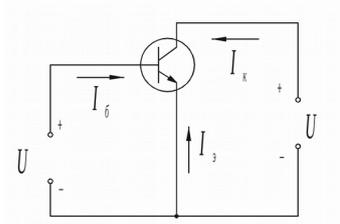
1.



2.



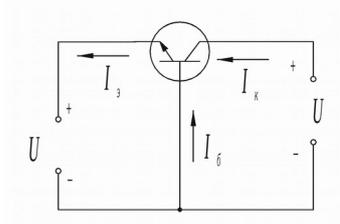
3.



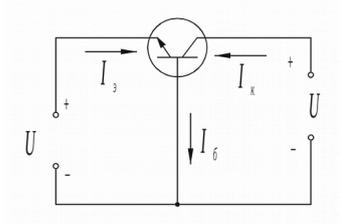
Приведена схема включения *n-p-n* транзистора с общей базой.

Правильное направление токов указано на рисунке:

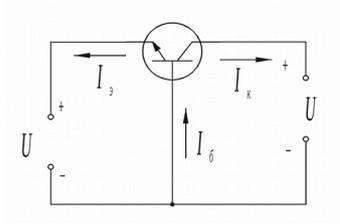
1.



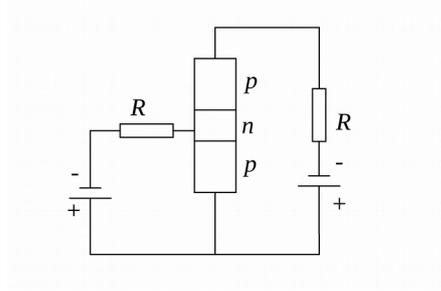
2.



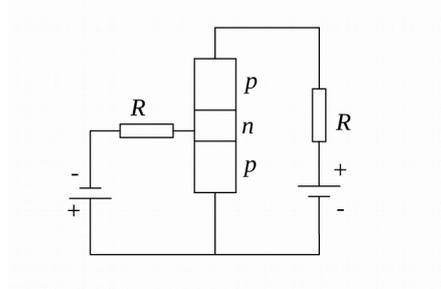
3.



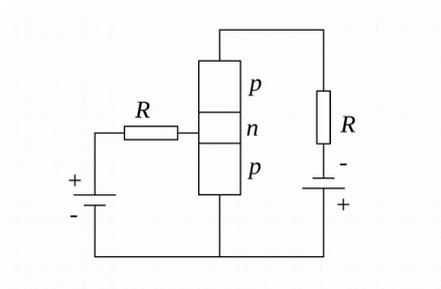
1.



2.

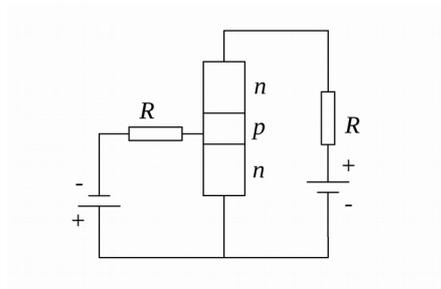


3.

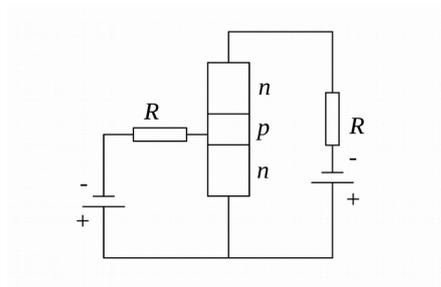


Нормальный режим работы транзистор обеспечивается подключением источников напряжения, показанным на схеме:

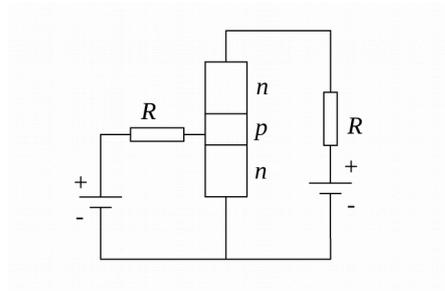
1.



2.



3.



Формула, описывающая полную величину тока через коллекторный переход, имеет вид:

1. $I_K = \alpha \cdot I_Э + I_{кб0}$

2. $I_K = \alpha \cdot I_Э - I_{кб0}$

3. $I_K = (1 - \alpha) \cdot I_Э - I_{кб0}$

4. $I_K = \alpha \cdot I_Э$

5. $I_K = I_Э + I_Б$

В биполярном *p-n-p* транзисторе коллекторный и базовый токи связаны следующим соотношением:

1. $I_K = I_Б$

2. $I_K = \alpha \cdot I_Б$

3. $I_K = (\alpha - 1) \cdot I_Б$

4. $I_Б = \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha}\right) \cdot I_K$

5. $I_K = \alpha \cdot I_Э$

Задание для самостоятельной работы

Проработать план лабораторной по теме «Входные и выходные вольт-амперные биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером». Работа должна включать в себя:

- цель занятия;
- рекомендуемое оборудование для проведения измерений;
- краткую теорию, необходимую для выполнения лабораторной работы;
- электрическую схему для проведения измерений и образцы таблиц для заполнения;
- не менее 5 контрольных вопросов, которые могут быть

использованы как для получения допуска к лабораторной работе, так и при ее защите;

- методику обработки экспериментальных данных, включая расчет погрешности.

Тесты для самостоятельной работы

Прямой ток эмиттера $n-p-n$ -транзистора составляет $I_{Э}=2$ мА, коллекторная цепь разорвана. Определить напряжение на эмиттерном переходе, полагая $I_{Э0}=1$ мкА.

По известным h -параметрам транзистора ОБ, представленного в виде четырехполюсника, найти дифференциальные параметры его Т-образной схемы замещения. Дано:

$$h_{11Б} = 30 \text{ Ом}; h_{21Б} = 0,97; h_{22Б} = 1 \text{ мкСм}; U_{КБ} = -5 \text{ В}; I_{Э} = 1 \text{ мА} .$$

Для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, используя входные и выходные характеристики, определить коэффициент усиления $h_{21Э}$, значение напряжения на коллекторе $U_{кэ}$ мощность на коллекторе $P_{к}$, если дано напряжение на базе $U_{бэ}$ (В), значение сопротивления нагрузки $R_{к}$ (кОм) и напряжение источника питания $E_{к}$ (В). Данные для своего варианта взять из таблицы.

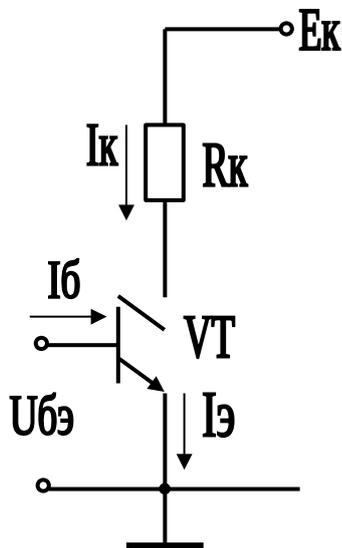


Рис. Схема включения транзистора по схеме с ОЭ.

Номер варианта	$U_{бэ}$, В	$R_{к}$, кОм	$E_{к}$, В
1	0,4	0,05	40
2	0,15	0,2	40
3	0,15	0,1	40

4	0,1	0,05	40
5	0,15	1	40
6	0,25	10	20
7	0,3	0,1	20
8	0,3	5	40
9	0,25	1	40
10	0,2	1	20

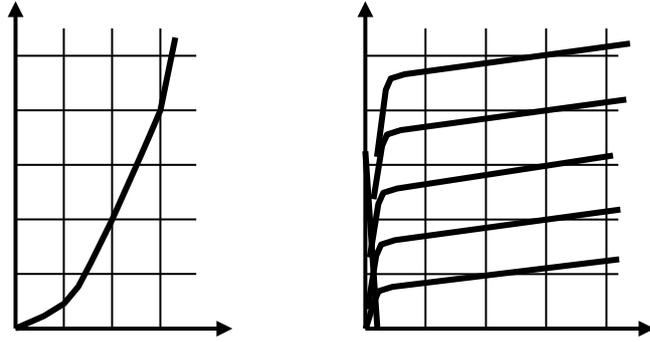


Рис Входная и выходные характеристики транзистора (вариант 1,11,21).

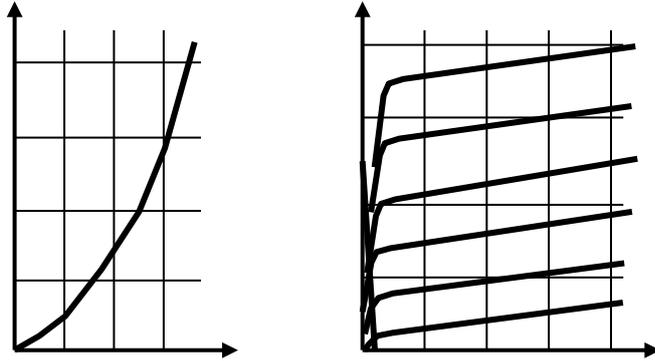
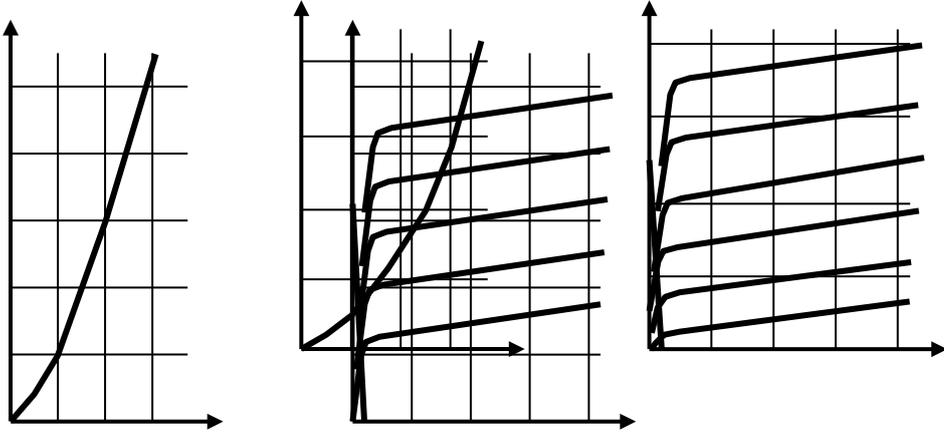


Рис. Входная и выходные характеристики транзистора (вариант 2,12,22).

Рис. Входная и выходные характеристики транзистора (вариант 3,13,23).

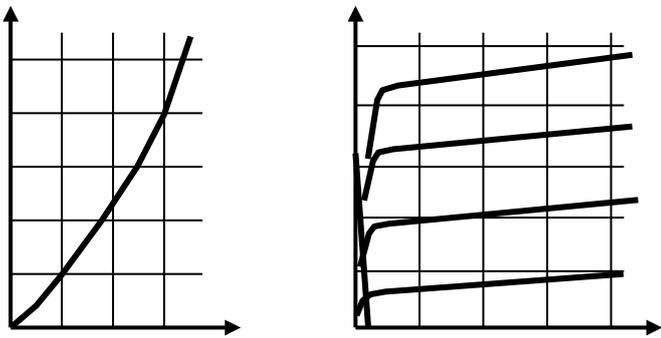


Рис. Входная и выходные характеристики транзистора (вариант 4,14,24).

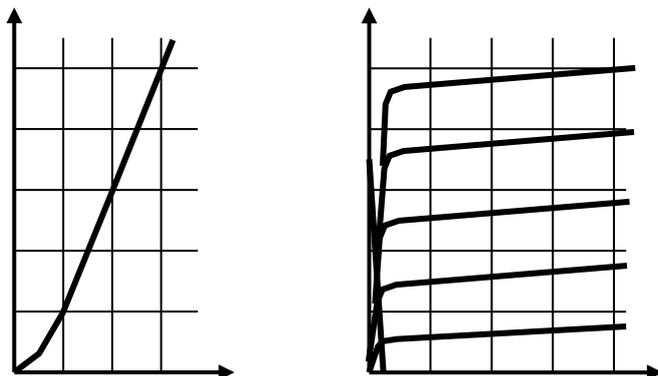


Рис. Входная и выходные характеристики транзистора (вариант 5,15,25).

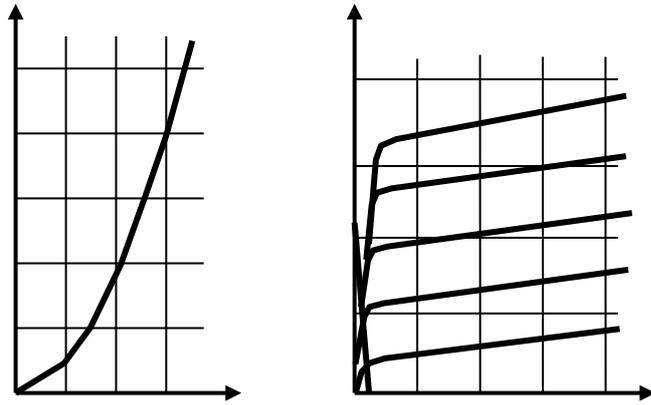


Рис. Входная и выходные характеристики транзистора (вариант 6,16,26).

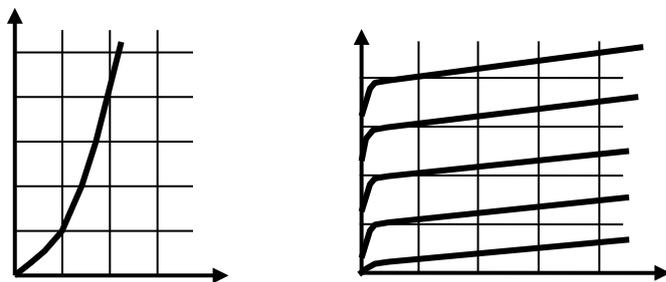


Рис. Входная и выходные характеристики транзистора (вариант 7,17,27).

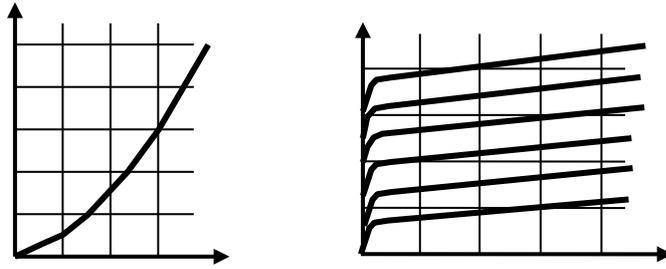


Рис. Входная и выходные характеристики транзистора (вариант 8,18,28)

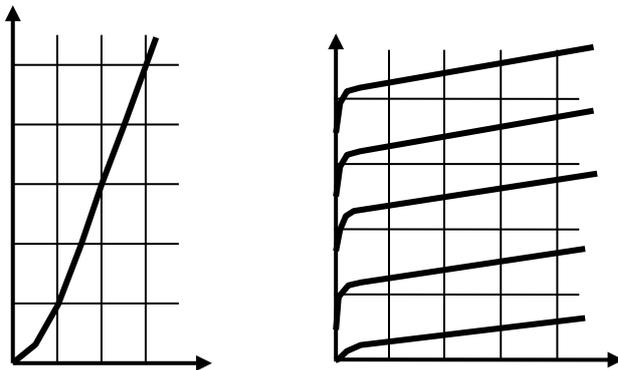


Рис. Входная и выходные характеристики транзистора (вариант 9,19,29)

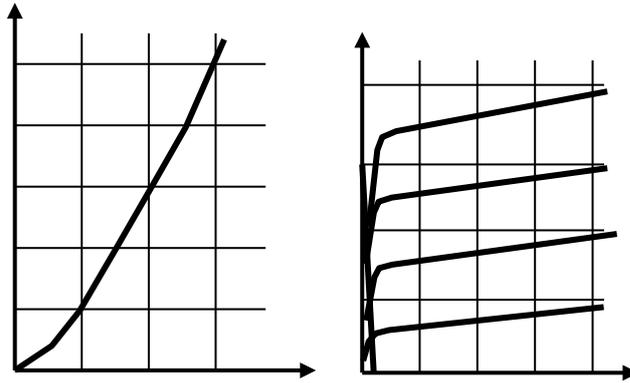


Рис. Входная и выходные характеристики транзистора (вариант 10,20,30).

Тема 8. МДП-транзисторы

Основные вопросы темы:

1. Полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы) ([2] глава 3, [3] глава 3).
2. МДП-транзисторы с встроенным и индуцированным каналами ([2] глава 3, [3] глава 3).
3. Расчет входных вольтамперных характеристик МДП-транзисторов на крутых и пологих участках ([2] глава 3, [3] глава 3).
4. Малосигнальные параметры. Частотные свойства МДП-транзисторов ([2] глава 3, [3] глава 3).
5. Мощные МДП-транзисторы. Особенности применения МДП-транзисторов в БИС ([2] глава 3, [3] глава 3).
6. Эффекты короткого и узкого канала. Горячие носители в канале ([1, 2] глава 16, [2] глава 3, [3] глава 3).

Контрольные вопросы:

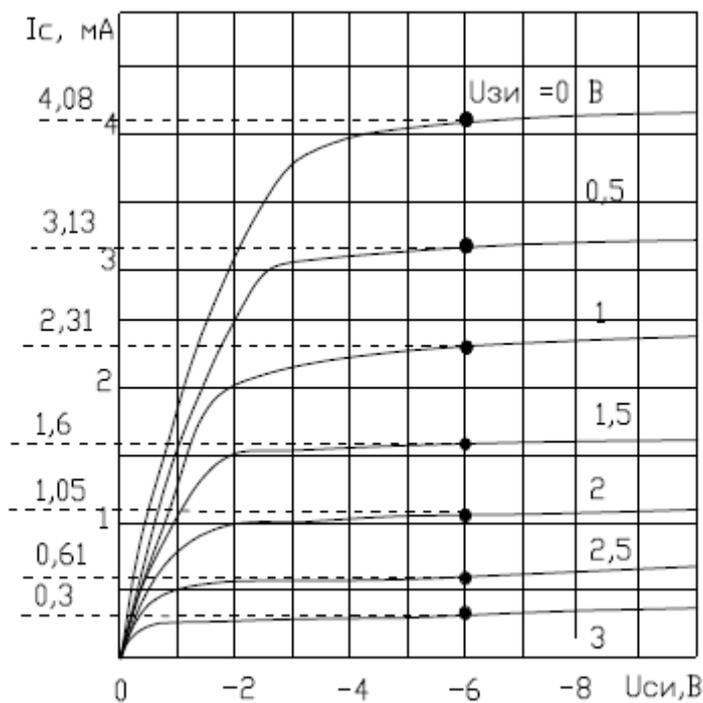
1. Изобразите структурную схему МДП-транзистора
2. Поясните управление каналом в МДП-транзисторе напряжением на затворе
3. Поясните вид передаточных характеристик в МДП-транзисторе с индуцированным каналом
4. Поясните вид передаточных характеристик в МДП-транзисторе с встроенным каналом

5. Поясните выходные характеристики МДП-транзистора

6. Эффект горячих носителей заряда в канале

Задачи для самостоятельного решения

Пусть дан полевой транзистор типа КП103, напряжение сток-исток -6В, затвор-исток 4 В. Даны выходные характеристики (рис.). Для построения стокзатворной характеристики (прямой передачи) определяем ток стока при напряжении затвор-исток 0 В; 0,5 В и т.д.



Определить дифференциальные параметры полевого транзистора и построить их зависимость от напряжения на затворе: μ ; R_i ; $S=f(U_{зи})$.

Задание для самостоятельной работы

Проработать план лабораторной по теме «Переходная характеристика МДП-транзистора с встроенным каналом». Работа должна включать в себя:

- цель занятия;
- рекомендуемое оборудование для проведения измерений;
- краткую теорию, необходимую для выполнения лабораторной работы;

- электрическую схему для проведения измерений и образцы таблиц для заполнения;
- не менее 5 контрольных вопросов, которые могут быть использованы как для получения допуска к лабораторной работе, так и при ее защите;
- методику обработки экспериментальных данных, включая расчет погрешности.

Тесты для самостоятельной работы

В МДП транзисторах p -подложкой при увеличении потенциала затвора в знак плюс концентрация носителей в канале

1. Уменьшается
2. Увеличивается
3. не меняется

В МДП транзисторе с индуцированным каналом ток стока при нулевом напряжении затвора

1. Небольшой
2. Большой
3. Отсутствует

В МДП транзисторе с Встроенным каналом ток стока при нулевом напряжении затвора

1. Небольшой
2. Большой
3. Отсутствует

У МДП транзисторе с встроенным каналом с p -подложкой увеличение потенциала затвора в знак плюс.

1. Ток стока не меняет
2. Ток стока увеличивает
3. Ток стока уменьшает

МДП транзистор с индуцированным каналом с p -подложкой имеет знак потенциала затвора

1. Ноль
2. Плюс

3. Минус

Какой прибор обозначен 

1. выпрямительный диод.

2. Фотодиод.

3. МДП транзистор с встроенным р-каналом.

Тема 9. Оптоэлектронные п/п приборы

Основные вопросы темы:

1. Фоторезисторы ([1] глава 11).
2. Светоизлучающие диоды, п/п инжекционные лазеры. Электр люминесцентные излучатели. Принцип действия, основные характеристики и параметры ([1] глава 11).
3. Фотодиоды на основе диодов с *p-n*-переходом, контакта металл-полупроводник, гетероперехода, интегральная чувствительность и спектральная характеристика ([1] глава 11).
4. Фотоэлементы и солнечные батареи с *p-n*-переходом. Вольтамперные характеристики, коэффициент полезного действия, световая характеристика. Биполярные, МДП-фототранзисторы и фототиристоры ([1] глава 11).

Контрольные вопросы:

1. Что такое фотопроводимость?
2. Поясните, почему под действием света сопротивление полупроводника уменьшается?
3. Почему у фотодиода используют обратную ветвь ВАХ?
4. Чем фоторезистор отличается от фотодиода?
5. Принцип работы солнечных элементов

Задачи для самостоятельной работы

Ответить письменно на вопросы согласно варианту задания

1. Определение, особенности и достоинства оптоэлектронных приборов.
2. Фоторезистор: определение, условно-графическое обозначение, принцип работы, характеристики, параметры и назначение.

3.Фотодиод: определение, условно-графическое обозначение, принцип работы, характеристики, параметры и назначение.

4.Фототранзистор: определение, условно-графическое обозначение, принцип работы, характеристики, параметры и назначение.

5.Фототиристор: определение, условно-графическое обозначение, принцип работы, характеристики, параметры и назначение.

6.Светодиод: определение, условно-графическое обозначение, принцип работы, характеристики, параметры и назначение.

7.Оптроны: определение, разновидности, условно-графическое обозначение и применение.

8.Приборы индикации: разновидности, назначение и пример работы.

Задание для самостоятельной работы

Проработать план лабораторной по теме «Определение напряжения холостого хода для фотодиода». Работа должна включать в себя:

- цель занятия;
- рекомендуемое оборудование для проведения измерений;
- краткую теорию, необходимую для выполнения лабораторной работы;
- электрическую схему для проведения измерений и образцы таблиц для заполнения;
- не менее 5 контрольных вопросов, которые могут быть использованы как для получения допуска к лабораторной работе, так и при ее защите;

- методику обработки экспериментальных данных, включая расчет погрешности.

Тесты для самостоятельной работы

Какой прибор обозначен 

1.МДП транзистор с индуцированным n-каналом.

2.Фотодиод.

3. Туннельный диод.

Какой фотоприбор состоит из химически чистого полупроводника.

1.Фотоэлемент.

2.Фоторезистор

3.Фотодиод

Какой фотоприбор может использоваться как источник электроэнергии.

1.Фотодиод

2.Фоторезистор

3.Фотоэлемент

За счет чего происходит свечения светодиода

1.Внешних воздействий.

2.Рекомбинации электронов и дырок в зоне p-n перехода.

3.Внутреннего фотоэффекта

Какой прибор обозначен 

1.Стабилитрон

2.МДП транзистор с встроенным n-каналом.

3.Светодиод.