

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  
«Методы анализа, контроля и диагностики полупроводниковых  
устройств»**

Ульяновск 2017

Методические указания для самостоятельной работы студентов по дисциплине «Методы анализа, контроля и диагностики полупроводниковых устройств» / составитель: Л.Н. Вострецова.- Ульяновск: УлГУ, 2017.

Настоящие методические указания предназначены для студентов специальности 03.04.02 «физика», изучающих дисциплину «Методы анализа, контроля и диагностики полупроводниковых устройств». 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 зачету 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. *Старосельский, В. И.* Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники : учебное пособие для вузов / В. И. Старосельский. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 463 с. — (Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-9916-0808-4. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://www.biblio-online.ru/bcode/425163>
2. **Физика полупроводников** : учеб. пособие для физ. спец. вузов / Бонч-Бруевич Виктор Леопольдович, С. Г. Калашников. - Москва : Наука, 1990. - 685 с.
3. Физические основы диагностики **полупроводников** / С. В. Булярский, А. И. Сомов, Н. С. Грушко. - Ульяновск : УлГУ, 1998. - 91 с.
4. Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах / **Булярский** Сергей Викторович, Н. С. Грушко. - Москва : МГУ, 1995. - 399 с.
5. Физика полупроводниковых приборов: учебное пособие/ Д.Я. Вострецов, Л.Н. Вострецова, Д.А. Богданова, А.А. Соловьев, А.В. Иго. – Ульяновск: УлГУ, 2019 – 87 с.
6. Лабораторные работы по дисциплине "Практикум по электронике" [Электронный ресурс] : метод. указания. Ч. 1 / Сабитов Олег Юрьевич; УлГУ, ИФФВТ, Каф. радиофизики и электроники. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 1,34 Мб). - Ульяновск : УлГУ, 2016.- URL: <ftp://10.2.96.134/Text/Sabitov-2016-1.pdf>
7. Исследование полупроводниковых структур методом вольт-фарадных характеристик [Электронный ресурс] : метод. указания к лабораторной работе по дисциплине "Микроэлектроника" / Н. Т. Гурин; УлГУ, ИФФВТ, Каф. радиофизики и электроники. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 969 КБ). - Ульяновск : УлГУ, 2016. - URL: [ftp://10.2.96.134/Text/Gurin\\_2016.pdf](ftp://10.2.96.134/Text/Gurin_2016.pdf)
8. Основы диагностики полупроводниковых структур : учебное пособие / Д. Я. Вострецов, Л. Н. **Вострецова**, Д. А. Богданова [и др.]; УлГУ, ИФФВТ, Каф. инженерной физики. - Ульяновск : УлГУ, 2018. - Загл. с экрана. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 3,37 Мб). - Текст : электронный.// <http://lib.ulsu.ru/ProtectedView/Book/ViewBook/1477>

## 2.МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### Тема 1. Введение в дисциплину

#### Основные вопросы темы:

1. Основные положения зонной теории ([1, 2] на с.87 - 89)
2. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла ([1, 2] , с.89 - 94)
3. Функции Блоха (с. 297 - 300 [3])
4. Зоны Брюллюэна (с.95-100 [1, 2]).

5. Энергетические зоны – запрещенные и разрешенные (100 – 103 [1, 2]).
6. Модель Кроннига-Пенни ([3], глава 7).
7. Закон дисперсии, эффективная масса ([1, 2], С. 112 – 114, 116 - 122).
8. Зонная структура металлов и полупроводников ([1, 2], С.114 - 116).

#### 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.

#### 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. инъекция
  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. энергия 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. непрямоzonными
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



- (а)
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

### Индивидуальное задание

Выдается файл vfhKJA.dat, содержащий измеренные ВФХ светодиода с квантовыми ямами.

Изменение напряжения, приложенного к *p-n*-переходу, приводит к изменению заряда в *p-n*-переходе, то есть *p-n*-переход действует как ёмкость. Ёмкость при обратном напряжении смещения называют барьерной, так как она связана с образованием потенциального барьера между *n*- и *p*- областями.

$$C_{\sigma} = \frac{dQ}{dU} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot S}{h} \quad (1),$$

где  $h = x_n - x_p$  — толщина *p-n*-перехода,  $S$  — площадь *p-n*-перехода,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная,  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

По известной зависимости барьерной ёмкости от напряжения можно найти распределение концентрации примеси в  $p$ - $n$ -переходе

$$\frac{dC_{\bar{c}}}{dU} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{h^2} \cdot \frac{dh}{dU} = -\frac{C_{\bar{c}}^3}{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S} \cdot \frac{dh}{dU} \quad (2),$$

$$\frac{dC_{\bar{c}}}{dU} = -\frac{C_{\bar{c}}^3}{e \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S^2} \cdot \left[ \frac{1}{N(x_n)} + \frac{1}{N(x_p)} \right] \quad (3),$$

$$N(x_n) \cdot \sqrt{N(x_p)} \sqrt{\frac{N(x_n) + N(x_p)}{e \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S^2} \cdot \left[ \frac{d(C^{-2})}{dU} \right]^{-1}} = \frac{2}{e \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S^2} \cdot \left[ \frac{d(C^{-2})}{dU} \right]^{-1} \quad (4),$$

где  $x_n$  и  $x_p$ —границы  $p$ - $n$ -перехода, соответствующие напряжению  $U$ ,  $|N(x_p)| = |N_d - N_a| = N_d - N_a$  при  $x = x_p$ ,  $N(x_n) = N_d - N_a$  при  $x = x_n$

Из (4) следует, что в общем случае концентрация примесей в  $p$ - $n$ -переходе не может быть однозначно определена по зависимости барьерной ёмкости от напряжения, то есть одной и той же зависимости барьерной ёмкости от напряжения могут соответствовать различные законы распределения примеси в  $p$ - $n$ -переходе. Распределение примесей в  $p$ - $n$ -переходе может быть найдено лишь при наличии дополнительных условий, связывающих значения  $N(x_n)$  и  $N(x_p)$

При  $|N(x_p)| \gg N(x_n)$  формулы (3) и (4) принимают вид:

$$N(x) = \frac{2}{e \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S^2} \cdot \frac{d(C^{-2})}{dU} \quad (5).$$

Формула (5) характеризует распределение концентрации свободных носителей, а не легирующей примеси. Только при выполнении условия электронейтральности экспериментальная зависимость (5) эквивалентна  $N_{D,A}(x)$ . Связь между измеренным профилем свободных носителей и легирующей примеси определяется соотношением (6).

$$N_{D,A}(x) = N(x) - \frac{kT}{q} \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{q} \frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{N(x)} \frac{dN(x)}{dx} \right] \quad (6)$$

Формула (6) дает более высокое разрешение при восстановлении резкого скачка в распределении примесей, а видимый профиль (5) такой скачок сглаживает. Однако, погрешность формулы (6) гораздо сильнее зависит от погрешности измерения ёмкости, чем погрешность видимого профиля (5). Для получения приемлемых результатов по (6) относительная погрешность измерения ёмкости не должна превышать величины  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ . В нашем случае  $\Delta C/C \sim 10^{-10}$ , следовательно, формула (6) применима для определения профиля распределения легирующей примеси.

Файл vfhKJA.dat содержит два столбца с данными – первый – напряжение, В, второй – емкость Ф. При выполнении индивидуального задания необходимо рассчитать профили легирующей примеси по (6). При этом студент самостоятельно выбирает схему численного дифференцирования исходных данных.

Отчетом к индивидуальному заданию является файл с программой расчета профиля легирующей примеси, график зависимости концентрации от ширины ОПЗ.

Расчет профиля легирующей примеси структуры с квантовыми ямами

## **Тема 2. Современные требования к системе контроля качества при разработке и массовом производстве изделий микроэлектроники**

### **Основные вопросы темы:**

1. Понятие системы менеджмента качества
2. Стандарты систем менеджмента качества
3. Особенности построения систем менеджмента качества в случае полупроводникового производства
4. Понятие качества элемента полупроводникового производства
5. Квалиметрия продукции полупроводникового производства
6. Разработка нормативно-технической документации при производстве полупроводникового элемента

### **Контрольные вопросы:**

1. Понятие системы менеджмента качества
2. Основные требования стандартов серии ISO 9000 к системам менеджмента качества
3. Перечислите основные проблемы при внедрении систем менеджмента качества на предприятиях полупроводникового производства
4. Дайте классификацию показателей качества продукции полупроводникового производства
5. Интегральный показатель качества продукции полупроводникового производства

### **Задачи для самостоятельной работы:**

1. Используя стандарт ИСО9001, определите по какому из пунктов данного стандарта можно выставить несоответствие для каждого из случаев, приведенных ниже.

При проверке условий хранения продукции, некоторые виды которой чувствительны к уровню температуры и влажности, оказалось, что получить

информацию о температуре и влажности в помещении склада невозможно

2. Организация провела оценку возможности мониторинга и измерения по всем процессам, необходимым для СМК, и установила, что такая возможность есть только у 8-ми процессов. Соответствующие действия по этим 8-ми процессам были включены в СМК. Правильно ли это?

3. Сформулируйте цели предприятия полупроводникового производства согласно ИСО 9001

### Тесты для самостоятельной работы

- 1 8. Как называется состояние изделия, при котором оно, в данный момент времени, соответствует всем требованиям, установленным в отношении основных параметров, характеризующих нормальное выполнение заданных функций?
  1. Работоспособность.
  2. Безотказность.
  3. Исправность.
- 2 Как называется состояние изделия, при котором оно, в данный момент времени, соответствует всем требованиям, установленным в отношении всех его параметров, характеризующих нормальное выполнение заданных функций?
  1. Исправность.
  2. Безотказность.
  3. Работоспособность.
- 3 Как называется состояние изделия, заключающееся в полной или частичной утрате изделием его работоспособности?
  1. Долговечность.
  2. Неисправность.
  3. Отказ.
- 4 Как называется свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого интервала времени?
  1. Исправность.
  2. Долговечность.
  3. Безотказность.
- 5 Как называется свойство изделия сохранять работоспособность, с возможными перерывами для технического обслуживания, до разрушения или другого предельного состояния?
  1. Безотказность.
  2. Долговечность.
  3. Сохраняемость.

### Индивидуальное задание

Выдается файл vfh1.dat, vfh2.dat содержащие измеренные ВФХ резкого и плавного  $p$ - $n$ -перехода.

Изменение напряжения, приложенного к  $p$ - $n$ -переходу, приводит к изменению заряда в  $p$ - $n$ -переходе, то есть  $p$ - $n$ -переход действует как ёмкость. Ёмкость при обратном напряжении смещения называют барьерной, так как она связана с образованием потенциального барьера между  $n$ - и  $p$ - областями.

$$C_{\sigma} = \frac{dQ}{dU} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot S}{h} \quad (1),$$

где  $h=x_n-x_p$ —толщина  $p$ - $n$ -перехода,  $S$ —площадь  $p$ - $n$ -перехода,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная,  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

По известной зависимости барьерной ёмкости от напряжения можно найти концентрацию примеси в резком  $p$ - $n$ -переходе

$$\frac{dC_{\bar{\sigma}}}{dU} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot S}{h^2} \cdot \frac{dh}{dU} = -\frac{C_{\bar{\sigma}}^3}{\epsilon_0 \epsilon \cdot S} \cdot \frac{dh}{dU} \quad (2),$$

$$\frac{dC_{\bar{\sigma}}}{dU} = -\frac{C_{\bar{\sigma}}^3}{e \epsilon_0 \epsilon \cdot S^2} \cdot \left[ \frac{1}{N(x_n)} + \frac{1}{N(x_p)} \right] \quad (3),$$

$$N(x_n) \cdot \vee N(x_p) \vee \frac{N(x_n) + N(x_p) \vee \dot{\iota}}{N(x_n) + \dot{\iota} N(x_p) \vee \dot{\iota}} = \frac{2}{e \cdot \epsilon_0 \epsilon \cdot S^2} \cdot \left[ \frac{d(C^{-2})}{dU} \right]^{-1} \dot{\iota} \quad (4),$$

где  $x_n$  и  $x_p$ —границы  $p$ - $n$ -перехода, соответствующие напряжению  $U$ ,  $|N(x_p)| = |N_d - N_a| = N_d - N_a$  при  $x=x_p$ ,  $N(x_n) = N_d - N_a$  при  $x=x_n$

Из (4) следует, что в общем случае концентрация примесей в  $p$ - $n$ -переходе не может быть однозначно определена по зависимости барьерной ёмкости от напряжения, то есть одной и той же зависимости барьерной ёмкости от напряжения могут соответствовать различные законы распределения примеси в  $p$ - $n$ -переходе. Распределение примесей в  $p$ - $n$ -переходе может быть найдено лишь при наличии дополнительных условий, связывающих значения  $N(x_n)$  и  $N(x_p)$

При  $|N(x_p)| \gg N(x_n)$  формулы (3) и (4) принимают вид:

$$N(x) = \frac{2}{e \cdot \epsilon_0 \epsilon \cdot S^2} \cdot \dot{\iota} \dot{\iota} \quad (5).$$

Или

$\zeta$  в случае резкого  $p$ - $n$ -перехода

$\zeta$  в случае плавного  $p$ - $n$ -перехода.

Выданные файлы содержат два столбца: первый – напряжение,  $V$ , второй –

емкость,  $\Phi$ . По зависимостям  $\frac{1}{C^2}=f(U)$  и  $\frac{1}{C^3}=f(U)$  определяется тип  $p$ - $n$ -перехода (резкий или плавный), а также концентрация примеси  $N_{D,A}$  или градиент легирующей примеси.

### **Тема 3. Виды, методы и средства контроля качества полупроводниковых приборов**

#### **Основные вопросы темы:**

1. Классификации видов контроля продукции полупроводникового производства
2. Классификация методов контроля продукции полупроводникового производства
3. Понятие испытания продукции полупроводникового производства
4. Классификация испытаний для продукции полупроводникового производства
5. Выбор средства контроля или испытания продукции полупроводникового производства

#### **Контрольные вопросы:**

1. Приведите классификацию видов контроля продукции полупроводникового производства по назначению
2. Приведите примеры методов разрушающего контроля продукции полупроводникового производства
3. Приведите примеры методов неразрушающего контроля продукции полупроводникового производства
4. Проранжируйте виды испытаний по степени важности для продукции полупроводникового производства
5. Приведите примеры ускоренных испытаний для продукции полупроводникового производства

#### **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 диод подается прямое напряжение (рисунок 7. а). Определить сопротивление резистора, е



падение напряжения на нем равно 0,1 В. Диод работает при  $T = 300 \text{ K}$

2. Известен обратный ток насыщения некоторого диода  $I_0$  с барьером Шоттки. Диод соединен последовательно с резистором и источником постоянного напряжения смещения так что на диод подается прямое напряжение. Определить сопротивление резистора, если задано падение напряжения на нем  $U_R$ , В (табл).

№ вариант а	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	0,4
$U_R$ , В	0,1	0,3	0,4	0,15	0,2	0,25	0,17	0,1	0,2

### Тесты для самостоятельной работы

- 1 1. Какие испытания проводятся для изучения определенных свойств объекта?
  1. Контрольные.
  2. Сравнительные.
  3. Исследовательские
- 2 1. Какие испытания проводят с целью установления соответствия характеристик требованиям ГОСТов?
  1. Сертификационные.
  2. Аттестационные.
  3. Инспекционные
- 3 1. Как испытывают изделия РЭС серийного производства?
  1. Периодически, через определенный срок.
  2. После выпуска определенного количества изделий.
  3. Оба варианта ответов.
- 4 1. В каких условиях проводятся электрические испытания РЭС?
  1. В нормальных.
  2. В сложных климатических.
  3. Оба варианта ответов.
- 5 Какие испытания проводятся для контроля качества объекта?
  1. Контрольные.
  2. Приемочные.
  3. Определительные
- 6 1. В результате каких испытаний устанавливаются показатели надежности?
  1. Контрольных.
  2. Определительных.
  3. Граничных.
- 7 Какие установки используются для проведения испытаний на механическую прочность?
  1. Вибростенды.
  2. Центрифуги.
  3. Оба варианта ответов.
- 8 В результате каких испытаний устанавливают уровень надежности?
  1. Сертификационных.
  2. Граничных.
  3. Контрольных.

- 9 При каких испытаниях методы и условия их проведения могут нарушить пригодность изделия к использованию?
1. При разрушающих.
  2. При граничных.
  3. При разрушающих и граничных
- 10 Какой вид испытаний не относится к механическим испытаниям?
1. Испытания на обнаружение резонансных частот.
  2. Испытания на воздействие акустических шумов.
  3. Испытания на динамическое воздействие пыли.
- 11 Какие испытания проводятся для опытных образцов с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания?
1. Определительные.
  2. Предварительные.
  3. Исследовательские.
- 12 При каких испытаниях методы и условия их проведения не должны нарушать пригодность изделия к использованию по назначению?
1. При неразрушающих.
  2. При неразрушающих и граничных.
  3. При разрушающих.
- 13 Какой вид испытаний относится к механическим испытаниям?
1. Испытания на обнаружение резонансных частот.
  2. Испытания на статическое воздействие пыли.
  3. Испытания на динамическое воздействие пыли.
- 14 Какие испытания проводятся для решения вопроса о целесообразности серийного производства опытной партии?
1. Государственные.
  2. Предъявительские.
  3. Приемочные.
- 15 К каким видам испытаний относятся испытания на воздействие акустических шумов?
1. Климатическим.
  2. Электрическим.
  3. Механическим.

### Индивидуальное задание

Выдается файл `vah.dat`, содержащий измеренные прямые ВАХ  $p$ - $n$ -перехода. Проводится рекомбинационный анализ прямой ветви вольт-амперной характеристики  $p$ - $n$ -перехода как пример неразрушающего контроля.

Чтобы проанализировать механизмы, формирующие прямые ВАХ рекомендуется вычислить из экспериментальных данных дифференциальный показатель наклона, определяемый как:

$$\beta = \frac{q}{kT} \left( \frac{d \ln j_r}{dU} \right)^{-1} = \frac{qj_r}{kT} \left( \frac{dj_r}{dU} \right)^{-1} \quad (1).$$

где:  $j_r$ ,  $U$  – ток и напряжение  $p$ - $n$ -перехода. Остальные величины имеют стандартные обозначения.

Эта величина служит признаком наличия сложных рекомбинационных процессов. При рекомбинации через единственный двухзарядный центр дифференциальный показатель наклона изменяется от 1 до 2, причем область изменения в достаточной степени локализована. Если в процессе рекомбинации участвует несколько двухзарядных центров, то на производной дифференциального показателя наклона можно различить пики, число которых соответствует числу уровней, участвующих в процессе рекомбинации.

Рассмотрим модель  $p$ - $n$ -перехода при прямом смещении и низком уровне инжекции. Основным механизмом переноса носителей через переход в данной модели является рекомбинация через глубокие центры в нем. Скорость рекомбинации определяется числом электронно-дырочных пар, исчезающих в единице объема в результате рекомбинации. Будем считать, что при этом выполняются следующие допущения:

- В системе имеет место тепловое равновесие, отсутствует освещение, туннельные переходы и другие факторы. Тепловые процессы полностью определяют скорость рекомбинации.

- Все центры, образующие энергетический уровень, находятся в эквивалентных состояниях и имеют одну и ту же энергию активации, отсчитанную от дна зоны проводимости.

- Центр является простым и может находиться в двух зарядовых состояниях.

При этих условиях величина рекомбинационного тока определяется скоростями четырех процессов: захватом и эмиссией двух типов носителей заряда. В этом случае выражение для вольтамперной характеристики имеет вид:

$$I_r(U) = qSw(U) \frac{c_n c_p n_i^2 N_t (e^{qU/kT} - 1)}{2n_i \sqrt{c_n c_p} e^{qU/2kT} + c_n n_1 + c_p p_1} \times \frac{2kT}{q(V_d - U)}. \quad (2)$$

где:  $S$  - площадь перехода;  $w(U)$  - ширина ОПЗ,  $c_n$ ,  $c_p$  - коэффициенты захват электронов и дырок глубоким центром;  $n_i$  - концентрация собственных носителей заряда,  $N_t$  - концентрация глубоких центров;  $V_d$  - диффузионный потенциал.

$$n_1 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{kT}\right); p_1 = N_v \exp\left(-\frac{E_t - E_v}{kT}\right)$$

где:  $N_c$ ,  $N_v$  - эффективные плотности электронных состояний в зоне проводимости и валентной зоне.

Если в процессе рекомбинации участвуют несколько двухзарядных рекомбинационных центров (РЦ), то результирующий ток представляет собой сумму токов рекомбинации через каждый РЦ:

$$i_r = \sum_{m=1}^s \frac{qSw(U)c_{nm}c_{pm}n_i^2 \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) N_{um}}{2n_i \sqrt{c_{nm}c_{pm}} \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + c_{nm}n_{1m} + c_{pm}p_{1m}} \cdot \frac{2kT}{q(U_{dif} - U)} \quad (3)$$

Напряжение, при котором максимум скорости рекомбинации выходит за пределы ОПЗ, является границей применимости теории Шокли-Нойса-Саа. Граничное напряжение определяется уровнем легирования слоя с меньшей концентрацией свободных носителей.

*Определение параметров центров рекомбинации по дифференциальному показателю наклона ВАХ.* Моделирование показывает достаточно сложное поведение показателя  $\beta$  от напряжения. Рассмотрим этот вопрос подробнее для суперпозиции простых двухзарядных центров, равномерно расположенных внутри ОПЗ. В (1) подставим ток при рекомбинации через один двухзарядный уровень, возьмем производную и пренебрежем 1 в знаменателе первого слагаемого, т.к. уже при достаточно малых значениях напряжения ( $qU \sim 2kT$ ) экспонента значительно больше единицы. Получаем:

$$\beta = \left( 1 - \frac{(c_2/2) \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right)}{c_2 \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + c_3} \right)^{-1}, \quad \text{где: } c_2 = 2n_i \sqrt{c_n c_p}, \quad c_3 = c_n n_1 + c_p p_1.$$

(4)

Из (4) следует, что  $\beta$  плавно изменяется от 1 до 2.

Для производной дифференциального показателя наклона по напряжению получим:

$$\frac{d\beta}{dU} = \beta^2 \frac{q}{2kT} \frac{n_i \sqrt{c_n c_p} (c_n n_1 + c_p p_1) \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right)}{c_2 \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + c_3}. \quad (6)$$

Ищем экстремумы. Очевидно, что при выполнении условия  $c_n n_1 \gg c_p p_1$ , уровень лежит в верхней половине зоны при противоположном неравенстве в

нижней. Максимумы на кривой  $\frac{d\beta}{dU} = f(U)$  достигаются при напряжениях  $U_0$ .

По ним можно найти энергию активации глубокого уровня:

$$E_t = \frac{E_g - qU_0}{2} + \delta, \quad \text{где: } \delta = \frac{kT}{2} \ln \left[ \frac{1}{4} \frac{c_n}{c_p} \frac{N_c}{N_v} \right]. \quad (7)$$

Из формул (6) и (7) вытекает простой алгоритм определения энергии активации ГЦ: вычисляем производную дифференциального показателя наклона, находим напряжения при котором этот дифференциальный коэффициент имеет максимум и оцениваем энергию по формуле (7). Анализ показывает, что в большинстве случаев вклад поправки  $\delta$  не превышает 0.03 эВ. Результатом выполнения индивидуального задания является файл с численным дифференцированием вольт-амперной характеристики, а также таблица с определенными энергиями рекомбинационных центров.

#### **Тема 4. Определение параметров полупроводниковых приборов на основе р-п-перехода электрическими измерениями**

##### **Основные вопросы темы:**

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

##### **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 р-п-переход с концентрацией  $N_d = 10^3 \cdot N_a$ , 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  $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  соответственно).
4. Германиевый сплавной р-п-переход имеет обратный ток насыщения  $I_0 = 1 \text{ мкА}$ , кремниевый с такими же размерами ток  $I_0 = 10^{-8} \text{ А}$ . Вычислить и сравнить прямые напряжения на переходах при  $T = 293$  К, если через каждый диод протекает прямой ток  $100 \text{ мА}$ .
5. Германиевый диод, имеющий обратный ток насыщения  $I_0 = 25 \text{ мкА}$ , работает при прямом напряжении, равном  $0,1 \text{ В}$  и  $T = 300$  К. Определить сопротивление диода постоянному току и дифференциальное сопротивление  $r_{\text{диф}}$ .
6. В идеальном р-п-переходе обратный ток насыщения  $I_0 = 10^{-14} \text{ А}$  при  $T = 300$  К и  $I_0 = 10^{-14}$  при  $T = 125$  °С. Определить напряжения на р-п-переходе в обоих случаях, если прямой ток равен  $1 \text{ мА}$ .
7. Барьерная емкость диода равна  $200 \text{ пФ}$  при обратном напряжении  $2 \text{ В}$ . Какое обратное напряжение следует приложить, чтобы емкость уменьшилась до  $50 \text{ пФ}$ , если контактная разность потенциалов  $\phi_k = 0,82 \text{ В}$ .

## 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 **Измерение ВФХ выполняют при подаче на р-п-структуру**
  1. прямого смещения фиксированного значения
  2. обратного смещения фиксированного значения
  3. прямого смещения переменного значения
  4. обратного смещения переменного значения
- 4 **В какой области сильно несимметричного р-п-перехода регистрируется профиль распределения примесей методом ВФХ**
  1. в сильнолегированной области
  2. в слаболегированной области
  3. в области с высокой концентрацией носителей
- 5 **Ширина области пространственного заряда р-п-перехода**
  1. увеличивается с ростом прямого напряжения смещения
  2. уменьшается с ростом прямого напряжения смещения
  3. не зависит от значения напряжения смещения
- 6 **По тангенсу угла наклона зависимости  $C^{-2} = f(U)$  для р<sup>+</sup>-п-**

**перехода можно определить**

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

7 **Формула для определения контактной разности потенциалов**

1.  $kT \cdot \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$

2.  $kT \cdot \ln \frac{N_D}{n_i^2}$

3.  $kT \cdot \ln \frac{N_A}{n_i^2}$

4.  $kT \cdot \ln \frac{n_i^2}{N_D}$

5.  $kT \cdot \ln \frac{n_i^2}{N_A}$

8 Соотношение между коэффициентами передачи тока эмиттера «  $\alpha$  » и коэффициентом передачи тока базы «  $\beta$  » для схемы «ОЭ» транзистора

1.  $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$

2.  $\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$

3.  $1 - \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$

4.  $\beta = \frac{\alpha}{1 + \alpha}$

9 **Что характеризует параметр  $h^{11}$  биполярного транзистора?**

1. выходную проводимость
2. входное сопротивление
3. входную проводимость
4. коэффициент обратной связи по напряжению
5. коэффициент передачи по току

10 **Что характеризует параметр  $h^{12}$ , биполярного транзистора?**

1. выходную проводимость
2. входное сопротивление
3. входную проводимость
4. коэффициент обратной связи по напряжению
5. коэффициент передачи по току

11 **Что характеризует параметр  $h^{21}$  биполярного транзистора?**

1. выходную проводимость
2. входное сопротивление
3. входную проводимость
4. коэффициент обратной связи по напряжению
5. коэффициент передачи по току

12 **Что характеризует параметр  $h^{22}$  биполярного транзистора?**

1. выходную проводимость
2. входное сопротивление
3. входную проводимость
4. коэффициент обратной связи по напряжению
5. коэффициент передачи по току

## Индивидуальное задание

Выдается файл vah.dat, содержащий измеренные прямые ВАХ  $p$ - $n$ -перехода. Определение параметров уровней при анализе зависимости приведенной скорости рекомбинации от напряжения для структур на основе  $p$ - $n$ -перехода

Приведенная скорость рекомбинации и, основанные на этом, методы определения параметров центров рекомбинации. Выражение

$$I_r(U) = qSw(U) \frac{c_n c_p n_i^2 N_t (e^{qU/kT} - 1)}{2 n_i \sqrt{c_n c_p} e^{qU/2kT} + c_n n_1 + c_p p_1} \times \frac{2kT}{q(V_d - U)}$$

может быть представлено в вид

$$i_r = \frac{2kT w(U) S n_i}{U_{dif}(U) - U} \cdot \sum_{m=1}^s \frac{\alpha_m \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right)}{2 \zeta_m \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + \zeta_{m^2} + 1}, \quad (1)$$

где  $\alpha_m = (n_{1m}/n_i) c_{nm} N_{tm}$ ,  $\zeta_m = (n_{1m}/n_i) (c_{nm}/c_{pm})^{1/2}$ , (здесь воспользовались равенством  $n_{1m} p_{1m} = n_i^2$ ). Каждое слагаемое в (1) представляет собой токи рекомбинации через  $m$ -ый глубокий уровень, которые протекают параллельно и независимо друг от друга.

Для удобства анализа ВАХ вводится физическая величина - приведенная скорость рекомбинации  $R_{np}$ , которая определяется как:

$$R_{np}(U) = \frac{i_r(U) \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right)}{Sw(U) n_i \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right)} \cdot \frac{V_{dif}(U) - U}{2kT}. \quad (2)$$

Очевидна связь этой величины с параметрами глубоких центров:

$$R_{np}(U) = \sum_{m=1}^s R_{npm}(U) = \sum_{m=1}^s \frac{\alpha_m \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right)}{2 \zeta_m \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) + \zeta_{m^2} + 1}. \quad (3)$$

Т.о. величина  $R_{np}$  определяется только параметрами  $\alpha_m$  и  $\zeta_m$ , которые зависят лишь от природы глубоких уровней, их концентрации и материала полупроводника. Выражение (3) лежит в основе ряда методов определения энергии активации глубоких уровней из вольтамперной характеристики

Приведенная скорость рекомбинации имеет простой физический смысл. Легко видеть, что она является величиной, обратной времени жизни носителей заряда в ОПЗ. Удобство этой величины связано с видом ее графической характеристики, с которой удобнее работать, нежели с графиком времени жизни. Проанализируем выражение (3) подробнее. Если  $s=1$  (один



глубокий уровень), то (3) описывается всего двумя параметрами  $\alpha$  и  $\zeta$ . При этом в области очень малых напряжений, когда:

$$2\zeta \exp(qU/2kT) \ll \zeta^2 + 1, \quad R_{np}(U) = \frac{\alpha}{\zeta^2 + 1} \exp\left(\frac{qU}{2kT}\right), \quad (4)$$

а с ростом напряжения, когда  $2\zeta \exp(qU/2kT) \gg \zeta^2 + 1$ ,  $R_{np}(U) = \frac{\alpha}{2\zeta} = \text{const.}$  (5)

По начальному участку этой кривой легко определить предэкспоненциальный множитель  $\alpha/(\zeta^2+1)$  в (4), а по конечному участку -  $\alpha/(2\zeta)$  в (5), после чего можно найти  $\alpha$  и  $\zeta$ , которые в свою очередь связаны с параметрами глубокого уровня.

Другой способ нахождения  $\alpha$  и  $\zeta$  - численная подгонка экспериментальных точек и теоретической зависимости  $R_{np}(U)$ .

Разделение экспериментальной  $R_{np}(U)$  на составляющие удобно проводить следующим образом. На каждом участке кривой подбираются значения  $\alpha_m$  и  $\zeta_m$  таким образом, чтобы отклонение экспериментальной кривой от теоретической на этом участке было минимальным (например, с помощью метода наименьших квадратов или какой-либо его разновидности). Затем из исходной кривой  $R_{np}(U)$  вычитают теоретическую  $R_{npm}(U)$  и повторяют процесс подбора для  $m+1$ -го участка. Эту процедуру можно проделывать графически или автоматизировать. Процесс продолжается до тех пор, пока вся экспериментальная кривая  $R_{np}(U)$  не будет разложена на составляющие  $R_{npm}(U)$ . В результате разделения получаем значения параметров  $\alpha_m$  и  $\zeta_m$  ( $m=1, \dots, s$ ). Зная  $\zeta_m$ , легко находим:

$$E_{\text{тнм}} = \frac{E_g}{2} - kT \ln \zeta_m + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_{n^0}}{m_{p^0}} + \frac{1}{2} kT \ln \frac{c_{\text{нм}}}{c_{\text{рм}}}. \quad (6)$$

Энергия активации  $m$ -ого глубокого уровня определяется с точностью до последнего слагаемого, т.к. отношение  $c_{\text{нм}}/c_{\text{рм}}$ , как правило, заранее неизвестно (для многих центров  $c_n/c_p$  не превосходит  $10^2$ , тогда при  $T=300\text{K}$   $(kT/2) \cdot \ln(c_n/c_p) \cong 0.03$  эВ). Кроме того :

$$\frac{\zeta_m}{\alpha_m} = \left( \frac{1}{c_{\text{нм}} N_{\text{тн}}} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{1}{c_{\text{рм}} N_{\text{тн}}} \right)^{1/2} = \sqrt{\tau_{n0m} \cdot \tau_{p0m}}. \quad \text{где:}$$

$$\tau_{n0m} = (c_{\text{нм}} N_{\text{тн}})^{-1/2}; \quad \tau_{p0m} = (c_{\text{рм}} N_{\text{тн}})^{-1/2}$$

Т.о. определить все четыре параметра для  $m$ -ого глубокого уровня  $C_{nm}$ ,  $C_{pm}$ ,  $E_{tnm}$ ,  $N_{tm}$  из  $R_{np}(U)$  при одной фиксированной температуре невозможно. Но если нам из других экспериментов известны  $\tau_{n0m}$  или  $\tau_{p0m}$ , или  $C_{nm}/C_{pm}$ , то можно найти некоторые из них.

Результатом выполнения индивидуального задания является представление графической зависимости приведенной скорости рекомбинации от напряжения, разделение ее на составляющие, таблица с параметрами уровней, участвующих в создании рекомбинационного потока.

## **Тема 5. Определение параметров МДП-структур из вольт-емкостных характеристик**

### **Основные вопросы темы:**

### **Основные вопросы темы:**

1. Полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы) ([3] п. 8.8, [4] п. 2.5, [5] глава 6).
2. МДП-транзисторы с встроенным и индуцированным каналами ([3] п. 8.8, [4] п. 2.5, [5] глава 6).
3. Расчет входных вольтамперных характеристик МДП-транзисторов на крутых и пологих участках ([3] п. 8.8, [4] п. 2.5, [5] глава 6).
4. Малосигнальные параметры. Частотные свойства МДП-транзисторов ([3] п. 8.8, [4] п. 2.5, [5] глава 6).
5. Мощные МДП-транзисторы. Особенности применения МДП-транзисторов в БИС ([3] п. 8.8, [4] п. 2.5, [5] глава 6).
6. Эффекты короткого и узкого канала. Горячие носители в канале ([1, 2] глава 16, [3] п. 8.8, [4] п. 2.5, [5] глава 6).

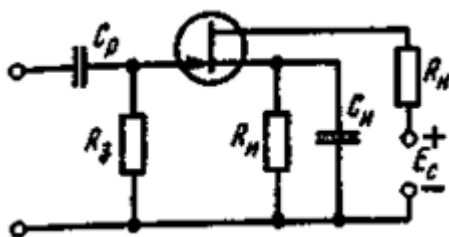
### **Контрольные вопросы:**

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**

1. У некоторого полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом  $I_{насыщ} = 1$  мА,  $U_{отс} = \dot{U}$   
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  $S_{max} = 2$  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)  $U_{зи} = 0$  В; б)  $U_{зи} = -0,5$  В; в)  $U_{зи} = 0$ .
3. В усилительном каскаде с общим истоком, показанным на рисунке 3.4, сопротивление нагрузки  $R_H = 20$  кОм. Эффективное входное сопротивление полевого транзистора  $20$  кОм, рабочая крутизна  $S = 2$  мА/В. Определить коэффициент усиления каскада.



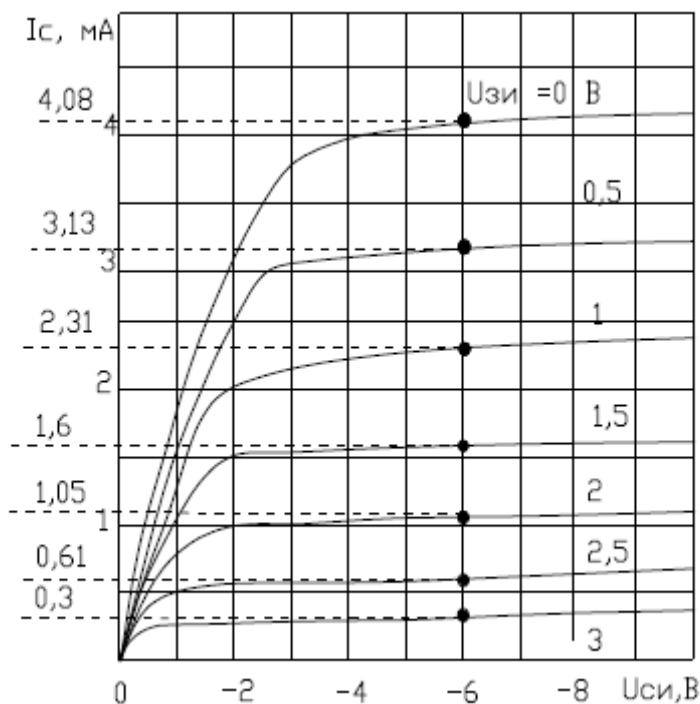
### Тесты для самостоятельной работы

- 1 Эквивалентная схема МДП-структуры при анализе вольт-фарадной характеристики имеет вид
  1. последовательно соединенную емкость диэлектрика  $C_{ox}$  с параллельной цепочкой емкости ОПЗ  $C_{sc}$  и поверхностных состояний  $C_{ss}$
  2. последовательно соединенную емкость ОПЗ  $C_{sc}$  с параллельной цепочкой емкости диэлектрика  $C_{ox}$  и поверхностных состояний  $C_{ss}$
  3. последовательно соединенную емкость поверхностных состояний  $C_{ss}$  с цепочкой емкости диэлектрика  $C_{ox}$  и емкости диэлектрика  $C_{ox}$
- 2 Минимум на вольт-фарадной характеристике МДП-структуры наблюдается для
  1. высокочастотной емкости
  2. низкочастотной емкости
  3. не зависимо от частоты измерения
- 3 если максимум емкости  $C-V$  кривой лежит в более положительных напряжениях, чем минимум, то подложка изготовлена из полупроводника
  1.  $n$ -типа
  2.  $p$ -типа
- 4 если максимум  $C-V$  кривой находится в более отрицательных напряжениях, то подложка изготовлена из полупроводника
  1.  $n$ -типа
  2.  $p$ -типа
- 5 в обогащении емкость МДП-структуры определяется
  1. емкостью диэлектрика
  2. емкостью ОПЗ
  3. емкостью поверхностных состояний

6. Емкость в области инверсии достигает
1. минимальной величины  $C_{\min}$
  2. максимальной величины  $C_{\max}$
  3. экстремального значения
7. Емкость в области инверсии определяется
1. емкостью области ионизованных доноров ОПЗ и емкостью диэлектрика емк
  2. емкостью диэлектриков и поверхностных состояний емк
  3. только емкостью диэлектрика толь

### Индивидуальное задание

Пусть дан 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:  $\mu$ ;  $R_i$ ;  $S=f(U_{зи})$ .

## **Тема 6. Методы определения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках**

### **Основные вопросы темы:**

1. Рекомбинационная теория Шокли – Рида – Холла. ([1, 2] глава 11, глава 18, [5] глава 16)
2. Время жизни неравновесных носителей заряда. ([1, 2] глава 11, глава 18, [5] глава 16)
3. Определение времени жизни методами фотопроводимости и модуляцией проводимости точечного контакта ([1, 2] глава 11, глава 18, [5] глава 16)

### **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. Дайте определение неравновесных носителей заряда
6. Дайте определение времени жизни неравновесных носителей заряда
7. Что такое рекомбинация?
8. Какие виды рекомбинации существуют?
9. Что такое модуляции проводимости контакта?

### **Задачи для самостоятельной работы**

Ответить письменно на вопросы согласно варианту задания

1. Механизмы рекомбинации в полупроводниковых структурах.
2. Время жизни неравновесных носителей заряда при различных механизмах рекомбинации.
3. Теория рекомбинации Шокли - Рида
4. Внутренний и внешний фотоэффект
5. Особенности зоно-зонной рекомбинации в разных полупроводниках

### **Тесты для самостоятельной работы**

1. Неравновесные носители заряда в полупроводнике – это
  1. электроны в р-области
  2. дырки в п-области
  3. электроны и дырки, возникающие при внешнем воздействии на полупроводник

- 2 Явление фотопроводимости заключается в
1. в увеличении проводимости полупроводника за счет появления дополнительных носителей заряда под действием светового потока
  2. в уменьшении проводимости полупроводника за счет появления дополнительных носителей заряда под действием светового потока
  3. в увеличении проводимости полупроводника за счет ускорения носителей заряда под действием светового потока
  4. в уменьшении проводимости полупроводника за счет ускорения носителей заряда под действием светового потока
- 3 Если энергия кванта света равна ширине запрещенной зоны, тогда чувствительность фоторезистора
1. резко возрастает
  2. Резко убывает
  3. Не изменяется
- 4 Время, которое проходит между двумя встречами электрона с дыркой, называется
1. Временем жизни носителей заряда
  2. Временем рекомбинации носителей заряда
  3. Временем генерации носителей заряда
- 5 Процесс образования свободных электронов и дырок отдельно или одновременно называется
1. Генерацией
  2. Рекомбинацией
  3. поглощением
- 6 Переход электрона из зоны проводимости в валентную зону
1. генерация
  2. рекомбинация
  3. поглощение
  4. излучение
- 7 В случае прямой рекомбинации
1. переход электрона из зоны проводимости непосредственно на свободные уровни в валентной зоне
  2. электрон переходит из зоны проводимости на уровень ловушки, а затем в валентную зону, заполняя один из свободных уровней
  3. переход локальные поверхностные состояния
- 8 Метод модуляции проводимости точечного контакта
1. испо  
льзует парные прямоугольные импульсы тока
  2. испо  
льзует единичные прямоугольные импульсы тока
  3. испо

### Индивидуальное задание

1. Образец из чистого беспримесного полупроводника, у которого ширина запрещенной зоны 0,72 эВ, а подвижности электронов и дырок 0,36 и 0,18 м<sup>2</sup>/(В·с), находится при 300 К в поле электромагнитного излучения. При этом его удельное сопротивление 0,43 Ом·м. Определить, какая доля электропроводности образца обусловлена фотопроводимостью. Указание: использовать выражение для концентрации свободных электронов и дырок 
$$n_e = n_h = 2 \left( \frac{mkT}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right).$$

2. Вычислить красную границу фотопроводимости при очень низких температурах для беспримесного полупроводника, у которого подвижности электронов и дырок 0,36 и 0,18 м<sup>2</sup>/(В·с), а удельное сопротивление при температуре 300К равно 0,51 Ом·м. Указание: использовать выражение для концентрации свободных электронов и дырок 
$$n_e = n_h = 2 \left( \frac{mkT}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right).$$

3. Образец из чистого беспримесного полупроводника, у которого ширина запрещенной зоны 0,72 эВ, а подвижности электронов и дырок 0,36 и 0,18 м<sup>2</sup>/(В·с), находится при 300 К. После включения источника света его удельное сопротивление стало 0,3 Ом·м. Определите его удельное сопротивление через 15 мс, если среднее время жизни носителей заряда 10 мс. Указание: использовать выражение для концентрации свободных электронов и дырок 
$$n_e = n_h = 2 \left( \frac{mkT}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right).$$

4. Образец из чистого беспримесного полупроводника, у которого ширина запрещенной зоны 0,72 эВ, а подвижности электронов и дырок 0,36 и 0,18 м<sup>2</sup>/(В·с), находится при 300 К в поле электромагнитного излучения. Определить его удельное сопротивление, если доля электропроводности образца, обусловленная фотопроводимостью, составляет 15%. Указание: использовать выражение для концентрации свободных электронов и дырок 
$$n_e = n_h = 2 \left( \frac{mkT}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right).$$

5. Вычислить температуру, при которой удельное сопротивление беспримесного полупроводника равно 0,010 Ом·м; красная граница фотопроводимости при очень низких температурах составляет 1,73 мкм; а подвижности электронов и дырок 0,36 и 0,18 м<sup>2</sup>/(В·с), а. Указание: использовать выражение для концентрации свободных электронов и дырок 
$$n_e = n_h = 2 \left( \frac{mkT}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right).$$

6. Образец из чистого беспримесного полупроводника, у которого ширина запрещенной зоны 0,72 эВ, а подвижности электронов и дырок 0,36 и 0,18 м<sup>2</sup>/(В·с), находится при 300 К. Через 8 мс после включения источника света его удельное сопротивление стало 0,4 Ом·м. Определите его удельное сопротивление сразу после включения источника света, если

среднее время жизни носителей заряда 10 мс . Указание: использовать выражение для концентрации свободных электронов и дырок

$$n_e = n_h = 2 \left( \frac{mkT}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \exp \left( \frac{-E_g}{2kT} \right).$$

7. Образец из чистого беспримесного полупроводника, у которого подвижности электронов и дырок 0,36 и 0,18 м<sup>2</sup>/(В·с), находится при 300 К в поле электромагнитного излучения. При этом его удельное сопротивление 0,43 Ом·м. Определите ширину запрещенной зоны полупроводника, если доля электропроводности образца, обусловленная фотопроводимостью составляет 15%. Указание: использовать выражение для концентрации свободных

$$n_e = n_h = 2 \left( \frac{mkT}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \exp \left( \frac{-E_g}{2kT} \right).$$

8. Вычислить суммарную подвижность носителей беспримесного полупроводника, у которого красная граница фотопроводимости при очень низких температурах составляет 1,73 мкм; а удельное сопротивление при температуре 350К равно 0,55 Ом·м. Указание: использовать выражение для концентрации свободных электронов и дырок

$$n_e = n_h = 2 \left( \frac{mkT}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \exp \left( \frac{-E_g}{2kT} \right).$$

9. Образец из чистого беспримесного полупроводника имеет удельное сопротивление 0,01 Ом·м. После включения источника света его удельное сопротивление стало 0,005 Ом·м. Определите, через сколько миллисекунд его удельное сопротивление станет равным 0,0075 Ом·м; если среднее время жизни носителей заряда 10 мс.

10. Образец из чистого беспримесного полупроводника, у которого ширина запрещенной зоны 0,72 эВ, а подвижности электронов и дырок 0,36 и 0,18 м<sup>2</sup>/(В·с), в поле электромагнитного излучения. При этом его удельное сопротивление 0,43 Ом·м. Определите температуру образца, если доля электропроводности образца, обусловленная фотопроводимостью, составляет 14%. Указание: использовать выражение для концентрации свободных

$$n_e = n_h = 2 \left( \frac{mkT}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \exp \left( \frac{-E_g}{2kT} \right).$$

## Тема 7. Нестационарные процессы генерации в ОПЗ

### Основные вопросы темы:

1. Кинетические уравнения нестационарных процессов в полупроводнике
2. Термостимулированная емкость
3. Метод нестационарной спектроскопии глубоких уровней

### Контрольные вопросы:

1. Определите нестационарные процессы в полупроводнике. Приведите примеры.
2. Метод измерения термостимулированной емкости
3. Ограничения метода термостимулированной емкости
4. Методика разложения на составляющие термостимулированной емкости



5. Особенности метода нестационарной спектроскопии глубоких уровней для нанопорядоченных полупроводников

**Индивидуальное задание**

Выдается файл TSE.dat, содержащий измеренный спектр термостимулированной емкости диода. Определения параметров глубоких уровней из анализа зависимости термостимулированной емкости от температуры. По максимуму производной TSE от температуры можно оценить коэффициент захвата уровня  $c_0$ :

$$c_0 = \frac{\beta E_t}{N_c T_m^2 k} \exp\left[\frac{E_t}{kT_m}\right]$$