

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:  
Декан физического факультета  
С.Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

**Физика полупроводниковых приборов**

по направлению подготовки / специальности

**03.03.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки / специализация:  
**«Фундаментальная и прикладная физика»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2025**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
С.Н. Филимонов

Председатель УМК  
О.М. Сюсина

Томск – 2025

## 1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-2 Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

ПК-1 Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.2 Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования

ИПК 1.1 Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования.

## 2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

– контрольные вопросы;

Примеры вопросов (ИОПК 2.2):

1. Какой вид имеет зависимость ёмкости запирающего слоя Шоттки от напряжения?
2. Запишите выражение для вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода Шоттки и изобразите зависимость плотности тока от напряжения.
3. Изобразите энергетические диаграммы  $p$ - $n$ -перехода в равновесии и при внешнем смещении.
4. Изобразите эквивалентную схему диода с  $p$ - $n$ -переходом на малом переменном сигнале. Какой вид она будет иметь при большом обратном напряжении?

Ответы:

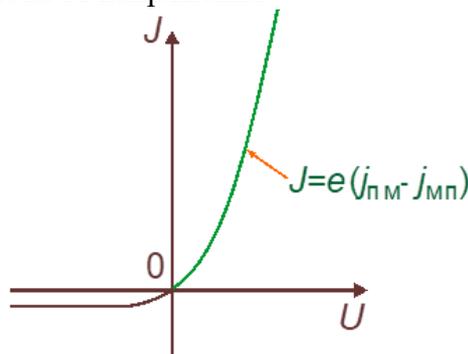
Вопрос 1: Выражение для зависимости ёмкости запирающего слоя Шоттки от напряжения

$$C_g(U) = \left| \frac{dQ_d(U)}{dU} \right| = eN_d S_k \left| \frac{d[d(U)]}{dU} \right| = S_k \sqrt{\frac{e\epsilon_r\epsilon_0 N_d}{2(U_k - U)}}$$

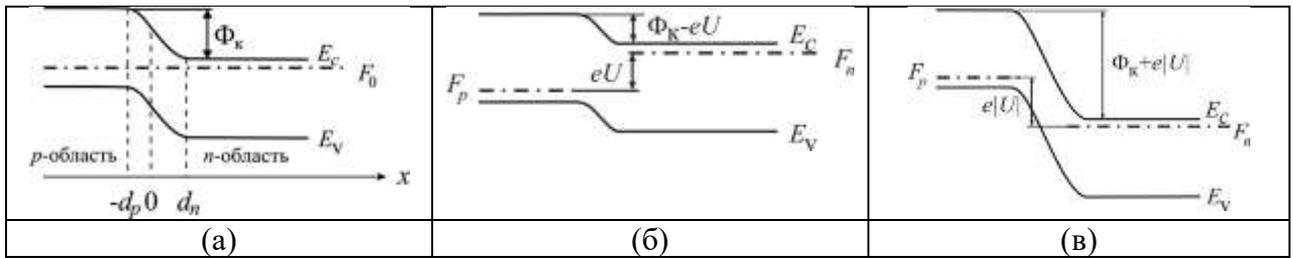
Вопрос 2: Выражение для вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода Шоттки

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] = J_s \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$

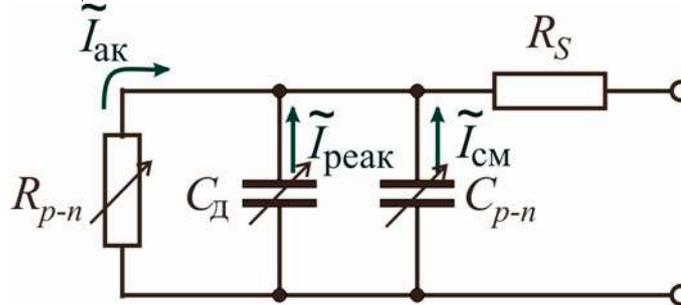
Зависимость плотности тока от напряжения



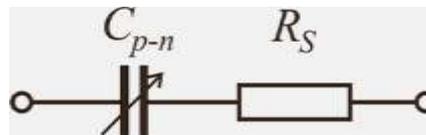
Вопрос 3: Энергетические диаграммы  $p$ - $n$ -перехода в равновесии (а), при внешнем смещении в пропускном (б) и запирающем (в) направлениях:



Вопрос 4: Эквивалентную схема диода с  $p-n$ -переходом на малом переменном сигнале при прямом смещении



Эквивалентную схема диода с  $p-n$ -переходом на малом переменном сигнале при обратном смещении



Критерии оценивания:

Результаты зачета с оценкой определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Оценка результатов экзамена формируется в соответствии с таблицей 2.1.

Таблица 2.1

| Оценка              | Результат, продемонстрированный студентом на экзамене   |
|---------------------|---|
| Отлично             | Студент, твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, способен самостоятельно принимать и обосновывать решения, оценивать их эффективность. |
| Хорошо              | Студент твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает не критичные неточности в ответе  |
| Удовлетворительно   | Студент, показывает фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно точно формулирует базовые понятия.  |
| Неудовлетворительно | Студенту не знает большей части основного содержания дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины.   |

### 3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

Зачет с оценкой в седьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Билет к зачету состоит из двух частей. Продолжительность зачета 1 час.

Экзамен в восьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из двух частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Первая часть содержит вопрос, проверяющий ИОПК-2.2. Ответ на вопрос первой части дается в развернутой форме.

Вторая часть содержит вопрос, проверяющий ИПК-1.1. Ответ на вопрос второй части дается в развернутой форме.

Примерный перечень теоретических вопросов для первой и второй части:

1. Диоды с барьером Шоттки. Механизм формирования и структура запирающего слоя Шоттки. Энергетическая диаграмма барьера Шоттки. Ширина и ёмкость запирающего слоя. Вольт-амперная характеристика. Применение диодов с барьером Шоттки.

2. Барьерная область  $p-n$ -перехода. Механизм формирования и структура области пространственного заряда  $p-n$ -перехода. Энергетическая диаграмма  $p-n$ -перехода, контактная разность потенциалов. Понятия резкого и плавного  $p-n$ -переходов. Ширина ОПЗ и дифференциальная барьерная ёмкость резкого и плавного  $p-n$ -переходов, их зависимости от напряжения.

3. Вольт-амперные характеристики  $p-n$ -перехода. Инжекционный и рекомбинационный прямые токи (выражения для токов, их графики и изображение на энергетической диаграмме). Ток экстракции и термогенерационный обратные токи (выражения для токов, их графики и изображение на энергетической диаграмме).

4. Частотные свойства  $p-n$ -перехода. Активная проводимость диода с  $p-n$ -переходом на переменном токе, её частотная зависимость. Диффузионная ёмкость диода, физический смысл, частотная зависимость. Эквивалентная схема диода при малом переменном сигнале.

5. Гетеропереходы. Энергетическая диаграмма идеального  $p-N$ -гетероперехода. Основные свойства гетероструктур (пояснить на энергетических диаграммах одностороннюю инжекцию, суперинжекцию, локализацию носителей заряда, эффект «оптического окна») и их использование в приборах (привести примеры).

6. Фотодиоды. Принцип действия и составляющие фототока фотодиода с  $p-n$ -переходом, спектральная характеристика фотодиода. Квантовая эффективность, монохроматическая токовая чувствительность. Фотодиод с барьером Шоттки.

7. Светодиоды. Принцип действия светодиода. Спектр излучения светодиода. Внешний квантовый выход и мощность излучения. Конструкция светодиода с гетероструктурой.

8. Туннельный диод. Энергетические диаграммы туннельного диода. Вольт-амперная характеристика. Частота отсечки туннельного диода. Область применения туннельных диодов.

9. Диоды Ганна. Междолинные переходы электронов. Вольт-амперная характеристика диода Ганна. Формирование доменов сильного электрического поля в диоде Ганна. Колебания тока и пролётный режим работы диодов Ганна. Области практического применения диодов Ганна.

10. Биполярный транзистор. Структура и принцип действия биполярного  $p-n-p$ -транзистора в качестве усилителя мощности. Коэффициент передачи тока и выходные вольт-амперные характеристики транзистора в схеме с общей базой.

11. Биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером. Коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером, его связь с коэффициентом передачи тока в схеме с общей базой. Статические входные и выходные характеристики  $p-n-p$ -транзистора в этой схеме.

12. Частотные свойства биполярного транзистора. Частота отсечки транзистора, процессы, которыми она определяется. Дрейфовый транзистор. Структура и преимущества биполярного гетеротранзистора.

13. Полевой транзистор с  $p-n$ -переходом в качестве затвора. Структура и принцип действия. Статические выходные вольт-амперные характеристики нормально открытого полевого транзистора. Характеристика передачи, крутизна характеристики передачи.

14. МДП-транзисторы. Структура и принцип действия нормально закрытого МДП-транзистора. Статические выходные вольт-амперные характеристики МДП-

транзистора. Характеристика передачи, крутизна характеристики передачи. Преимущества и недостатки полевых транзисторов.

15. Тиристоры. Структура и механизм включения тиристора без управляющего электрода (динистора). Вольтамперная характеристика динистора. Тиристор с управляющим электродом. Выключение тиристора.

16. Приборы с зарядовой связью. Структура трёхтактного прибора с зарядовой связью. Формирование зарядовых пакетов. Перенос зарядовых пакетов. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью.

17. Полупроводниковые биполярные интегральные микросхемы. Структура интегрального биполярного транзистора. Профили концентраций легирующих примесей в интегральном транзисторе. Диоды, резисторы и конденсаторы в биполярной ИМС.

18. Полупроводниковые МДП-интегральные микросхемы. Структура интегрального МДП-транзистора. Диоды, резисторы и конденсаторы в МДП-ИМС. Преимущества МДП-интегральных микросхем перед биполярными.

19. Квантово-размерные структуры. Понятие о квантовой яме. Энергетический спектр электронов в квантовой яме. Структура и принцип действия резонансно-туннельного диода.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Оценка результатов экзамена формируется в соответствии с таблицей 3.1.

Таблица 3.1

| Оценка              | Результат, продемонстрированный студентом на экзамене   |
|---------------------|---|
| Отлично             | Студент, твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, способен самостоятельно принимать и обосновывать решения, оценивать их эффективность. |
| Хорошо              | Студент твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает не критичные неточности в ответе  |
| Удовлетворительно   | Студент, показывает фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно точно формулирует базовые понятия.  |
| Неудовлетворительно | Студенту не знает большей части основного содержания дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины.   |

#### 4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Теоретические вопросы (ИПК 1.1):

1. Какой вид имеют зависимости ширины и ёмкости области пространственного заряда (ОПЗ) от прямого и обратного напряжений для ступенчатого и плавного  $p-n$ -переходов?

Ответ должен содержать определение ступенчатого и плавного  $p-n$ -переходов, соответствующие выражения зависимости ширины и ёмкости ОПЗ от прямого и обратного напряжений.

2. Поясните физический смысл инжекционной (диффузионной) и рекомбинационной составляющих прямого тока через  $p-n$ -переход. Как они зависят от напряжения?

В ответе необходимо описать физический смысл инжекционной и рекомбинационной составляющих прямого тока через  $p-n$ -переход, а также представить выражения, описывающие зависимости инжекционной и рекомбинационной составляющих прямого тока через  $p-n$ -переход от напряжения.

3. Поясните физический смысл диффузионной (ток экстракции) и генерационной составляющих обратного тока через  $p-n$ -переход. Как они зависят от напряжения?

В ответе необходимо описать физический смысл диффузионной и генерационной составляющих обратного тока через  $p-n$ -переход, а также представить выражения, описывающие зависимости диффузионной и генерационной составляющих обратного тока через  $p-n$ -переход от напряжения.

4. Поясните физический смысл барьерной и диффузионной емкостей диода с  $p-n$ -переходом.

В ответе необходимо пояснить физический смысл барьерной и диффузионной емкостей диода с  $p-n$  переходом, а также представить зависимости этих величин от напряжения.

5. Какими физическими процессами обусловлен переходный процесс при переключении диода из пропускного в запирающее состояние?

Ответ должен содержать краткую характеристику явлений, обуславливающих переходный процесс при переключении диода из пропускного в запирающее состояние.

6. Изобразите энергетическую диаграмму резкого анизотипного  $p-N$ -гетероперехода. Назовите основные области практического применения гетеропереходов.

Ответ должен содержать изображение энергетической диаграммы резкого анизотипного  $p-N$ -гетероперехода согласно модели Андерсона, а также краткую характеристику направлений практического применения гетеропереходов

7. Как изменяется энергетический спектр электронов в квантовой яме по сравнению с объемным полупроводником?

В ответе необходимо охарактеризовать основные особенности энергетического спектра электронов в квантовой яме, представить сравнение энергетических спектров электронов в квантовой яме и объемном полупроводнике.

### **Информация о разработчиках**

Алмаев Алексей Викторович, кандидат физ.-мат. наук, кафедра полупроводниковой электроники, радиофизического факультета ТГУ, доцент.