

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

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан

А. Г. Коротаев

Рабочая программа дисциплины

Полупроводниковая оптоэлектроника

по направлению подготовки

03.03.03 Радиофизика

Направленность (профиль) подготовки :
Радиофизика, электроника и информационные системы

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
М.Л. Громов

Председатель УМК
А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.

ПК-3 Способен использовать современное оборудование для решения задач в области радиофизики и электроники.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.

ИПК 3.1 Понимает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.

ИПК 3.2 Проводит радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля.

2. Задачи освоения дисциплины

– Освоить материал курса, а именно основные типы полупроводниковых оптоэлектронных приборов, их функциональные возможности и области применения.

– Научиться качественно объяснять и математически описать физические процессы, лежащие в основе действия полупроводниковых оптоэлектронных приборов.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплина (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор. Дисциплина входит в модуль «Твердотельная электроника».

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Седьмой семестр, зачет с оценкой

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: «Математический анализ», «Физика», «Дифференциальные уравнения», «Квантовая механика», «Физика полупроводников».

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часов, из которых:

-лекции: 50 ч.

-практические занятия: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Тема 1. Введение

Что такое оптоэлектроника. Использование полупроводников в оптоэлектронике. Полупроводниковая оптоэлектроника.

Тема 2. Поглощение оптического излучения в полупроводнике

Особенности и параметры оптического излучения. Спектр поглощения оптического излучения в полупроводнике. Оптическая генерация избыточных носителей заряда. Рекомбинация носителей заряда. Время жизни избыточных носителей заряда.

Тема 3. Фотопроводимость полупроводников

Фотопроводимость. Собственная фотопроводимость при однородной по объему генерации. Кинетика фотопроводимости и фототока. Фотопроводимость при неоднородной оптической генерации носителей заряда. Влияние поверхностной рекомбинации на спектр стационарной фотопроводимости. Особенности примесной фотопроводимости. Ватт-амперная характеристика.

Тема 4. Фоторезисторы

Основные параметры и характеристики полупроводникового фотоприемника: чувствительность, спектральная характеристика, пороговая мощность, обнаружительная способность, постоянная времени, частотная характеристика. Фоторезисторы. Фоторезисторы на основе собственной фотопроводимости (чувствительность, коэффициент усиления, спектральная характеристика, материалы). Примесные фоторезисторы

Тема 5. Фотодиоды

Природа фотоэффекта в $p-n$ -переходе. Уравнение полупроводникового фотодиода. Режимы работы фотодиода. Основные параметры и характеристики фотодиода. Зависимость величины фототока от длины волны и внутренних параметров фотодиодной структуры. Конструкции и особенности работы фотодиодов различных типов ($p-i-n$ -фотодиоды, фотодиоды с барьером Шоттки, гетероструктурные, лавинные фотодиоды).

Тема 6. Фотоэлектрические преобразователи энергии

Солнечное излучение. Вольт-амперная характеристика и КПД идеального фотопреобразователя. ВАХ и КПД реального фотопреобразователя. Различные типы фотопреобразователей (кремниевые солнечные элементы, фотоэлементы на основе гетероструктур, каскадные фотопреобразователи, фотоэлементы с промежуточной зоной). Концентрирование солнечного излучения.

Тема 7. Излучательная рекомбинация в полупроводниках

Излучательная и безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. Внутренний квантовый выход люминесценции. Спектры рекомбинационного излучения при межзонной и примесной рекомбинации.

Тема 8. Светодиоды

Инжекционная электролюминесценция в $p-n$ -переходах и гетероструктурах. Вывод излучения из кристалла светодиода, внешний квантовый выход, ватт-амперная характеристика, диаграмма направленности. Особенности характеристик светодиодов видимого диапазона. Материалы для светодиодов на различные участки спектра. Конструкции светодиодов.

Тема 9. Инжекционные лазеры

Вынужденное излучение. Принцип действия инжекционного лазера. Условие возникновения лазерного излучения в полупроводнике. Усиление и пороговый ток инжекционного лазера. Спектры излучения. Материалы и конструкции

гетероструктурных лазеров (инжекционные лазеры на двухсторонней гетероструктуре, лазеры с полосковой активной областью, лазеры с вертикальным резонатором).

Тема 10. Современные тенденции в разработке и использовании оптоэлектронных приборов и устройств

Волоконно-оптические системы передачи. Оптоэлектронные интегральные микросхемы. Системы оптической обработки информации. Оптоэлектронные датчики. Новые материалы для оптоэлектронных приборов

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, тестов по лекционному материалу, выполнения практических заданий, выполнения домашних заданий и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет с оценкой в седьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Примерный перечень теоретических вопросов

1. Собственная биполярная фотопроводимость при однородной по объему оптической генерации. Дать определение фотопроводимости. Сформулировать условие однородной оптической генерации. Исходя из уравнения непрерывности для электронов $\frac{\partial n}{\partial t} = g - r + \frac{1}{e} \operatorname{div} \vec{J}_n$, где $\vec{J}_n = eD_n \operatorname{grad} n + en\mu_n \vec{E}$, получить выражения для $\Delta n_{\text{ст}}$, $\sigma_{\text{ф}}^{\text{ст}}$ и $I_{\text{ф}}^{\text{ст}}$.

2. Используя выражение для темпа межзонной излучательной рекомбинации $r = \frac{\Delta n}{\tau_n} = \gamma_r (n_0 + p_0 + \Delta n) \cdot \Delta n$, проанализировать характер зависимости $I_{\text{ф}}^{\text{ст}} \sim \Delta n_{\text{ст}}$ от плотности потока фотонов при низком и высоком уровнях возбуждения.

3. Исходя из уравнения непрерывности, получить выражение для зависимости избыточной концентрации электронов от времени при включении освещения:

$\Delta n(t) = g_0 \tau_n (1 - e^{-t/\tau_n})$. Дать пояснение, при каких приближениях справедливо это выражение. Записать выражение, связывающее величину фототока с избыточной концентрацией электронов.

4. Исходя из уравнения непрерывности, получить выражение для зависимости избыточной концентрации электронов от времени при выключении освещения:

$\Delta n(t) = g_0 \tau_n e^{-t/\tau_n}$. Дать пояснение, при каких приближениях справедливо это выражение. Записать выражение, связывающее величину фототока с избыточной концентрацией электронов.

5. Исходя из выражения для распределения концентрации избыточных носителей заряда в образце полупроводника при неоднородной оптической генерации

$(g(x) = g_0 e^{-\alpha x})$: $\Delta n(x) = \frac{g_0 \tau_n}{\alpha^2 L^2 - 1} \left[\frac{\alpha L^2 + s_0 \tau_n}{L + s_0 \tau_n} e^{-\frac{x}{L}} - e^{-\alpha x} \right]$, проанализировать зависимость

стационарного значения фототока $I_{\text{ф}}^{\text{ст}} \sim \delta n_{\text{ст}}$ от длины волны λ в случае малой скорости поверхностной рекомбинации. Дать физическую интерпретацию полученному спектру.

6. Исходя из выражения для распределения концентрации избыточных носителей заряда в образце полупроводника при неоднородной оптической генерации

$$(g(x) = g_0 e^{-\alpha x}): \Delta n(x) = \frac{g_0 \tau_n}{\alpha^2 L^2 - 1} \left[\frac{\alpha L^2 + s_0 \tau_n}{L + s_0 \tau_n} e^{-\frac{x}{L}} - e^{-\alpha x} \right], \text{ проанализировать зависимость}$$

стационарного значения фототока $I_{\phi}^{ст} \sim \delta n_{ст}$ от длины волны λ в случае высокой скорости поверхностной рекомбинации. Дать физическую интерпретацию полученному спектру.

7. Фоторезистор. Принцип действия. Собственные и примесные фоторезисторы. Конструкция и схема включения фоторезистора. Получить выражение для оптимальной величины сопротивления нагрузки $R_{н}^{opt}$.

8. Коэффициент усиления фоторезистора K_{ϕ} . Пояснить физический смысл внутреннего усиления в фоторезисторе.

9. Исходя из выражения для напряжения фотосигнала на оптимальном сопротивлении нагрузки: $U_{\phi}^{max} \cong \frac{E_0 R_0 \Delta G}{4}$, получить выражения для фотонапряжения U_{ϕ}^{max} и вольтовой монохроматической чувствительности $S_{U\lambda}$ собственного фоторезистора.

10. Природа фотоэффекта в $p-n$ -переходе. Уравнение фотодиода. Режимы работы фотодиода (режим короткого замыкания, холостого хода, вентильный, фотодиодный).

11. Исходя из выражения для электронной составляющей плотности фототока в $p-n$ -фотодиоде с тонкой p -областью ($W_p \ll L_n$), сильно поглощающей излучение ($\alpha W_p \gg 1$):

$$J_{\phi} \cong J_{n\phi} \cong e\beta\Phi_0(1-R) \frac{1 + \frac{s_p}{\alpha D_n}}{1 + \frac{s_p W_p}{D_n}},$$

проанализировать зависимость фототока от α (и λ) при различной величине скорости поверхностной рекомбинации s_p . Дать физическое объяснение полученным спектрам.

12. Квантовая эффективность фотодиода. Исходя из выражений для генерационной и дырочной составляющих фототока

$$J_{i\phi} = -\frac{eg_0}{\alpha} e^{-\alpha W_p} (1 - e^{-\alpha d}), \quad J_{p\phi} = \frac{e\alpha\beta\Phi_0(1-R)L_p}{1 + \alpha L_p} e^{-\alpha(d+W_p)},$$

получить выражение для квантовой эффективности $p-n$ -фотодиода в спектральном диапазоне, где вкладом p -области в фототок можно пренебречь ($\alpha W_p \ll 1$). Объяснить зависимость квантовой эффективности от длины волны излучения, толщины области пространственного заряда и диффузионной длины дырок.

13. Монохроматическая чувствительность фотодиода. Связь с квантовой эффективностью. Спектральная характеристика фотодиода. Причины уменьшения S_{λ} в коротковолновой и длинноволновой областях спектра.

14. $P-i-n$ -фотодиод, фотодиод с барьером Шоттки: их конструкции, квантовые эффективности, особенности спектральных характеристик, быстродействие.

15. Гетеропереход. Энергетическая диаграмма $P-n$ -гетероперехода. Фотодиод с гетеропереходом на основе твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ (конструкция, квантовая эффективность, быстродействие, спектральная характеристика).

16. Солнечное излучение. Фотопреобразователи. Зависимость КПД идеального фотопреобразователя от ширины запрещенной зоны полупроводника. Примеры конструкций фотопреобразователей.

17. Излучательная и безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. Внутренний квантовый выход люминесценции полупроводникового материала. Излучательные свойства прямозонных и непрямозонных полупроводников.

18. Инжекционная электролюминесценция в $p-n$ -переходе. Получить и проанализировать выражение для коэффициента инжекции в идеальном $p-n$ -переходе. Особенности инжекционной электролюминесценции в одинарной и двойной гетероструктурах.

19. Внешний квантовый выход светодиода. Получить выражение для мощности излучения диода. Излучательная характеристика ИК-светодиода. Коэффициент вывода излучения, основные механизмы потерь излучения в кристалле светодиода.

20. Светодиоды видимого диапазона спектра. Световой поток. Относительная спектральная световая эффективность. Излучательная характеристика светодиода. Световая отдача. Материалы и конструкции светодиодов на различные участки спектра.

21. Принцип действия инжекционного лазера с $p-n$ -переходом. Необходимое условие возникновения лазерного излучения в полупроводнике (вывести).

22. Пороговый ток инжекционного лазера (получить выражение для плотности порогового тока). Параметры активной области, влияющие на пороговый ток лазера. Конструкция инжекционного лазера на основе двойной гетероструктуры.

Примеры задач:

1. В процессе релаксации после выключения освещения фототок через полупроводниковый образец уменьшился в два раза в течение 1,2 мкс. Считая рекомбинацию избыточных носителей заряда линейной, определить их объемное время жизни $\tau = \tau_n = \tau_p$. Напряжение на образце поддерживается постоянным.

2. Оцените толщину i -области p^+i-n^+ -фотодиода, при которой монохроматическая токовая чувствительность S_{λ} будет равна 0,3 А/Вт для излучения с длиной волны 1,06 мкм и коэффициентом поглощения в полупроводнике 200 см^{-1} . Толщина p^+ -области 0,5 мкм, коэффициент отражения 0,1, диффузионная длина дырок в n^+ -области 2 мкм. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта $\beta = 1$.

3. Полная мощность, излучаемая ИК-диодом при токе 100 мА, равна 15 мВт. Длина волны в максимуме спектра излучения $\lambda_m = 0,96 \text{ мкм}$. Рассчитать коэффициент вывода излучения из активной области диода, если соотношение излучательного и безызлучательного времен жизни в ней равно 0,3 и имеет место практически односторонняя инжекция электронов в активную p -область.

4. Рассчитать величину светового потока от зеленого светодиода ($\lambda_m = 555 \text{ нм}$) при токе через диод 100 мА и внешнем квантовом выходе 0,01.

Оценка успеваемости студента формируется в соответствии с таблицей.

| Компетенция | Индикатор компетенции | Критерии оценивания результатов обучения | | | |
|--|---|--|---|--|---|
| | | Неудовлетворительно | Удовлетворительно | Хорошо | Отлично |
| ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.. | ИОПК-1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности. | Не имеет представления о назначении и характеристиках полупроводникового оптоэлектронного прибора. Не имеет представления о теоретических моделях и использовании экспериментального оборудования для определения характеристик полупроводниковых структур и приборов. | Имеет отрывочные знания моделей оптоэлектронных полупроводниковых приборов. Понимает содержание теоретических моделей и экспериментов для определения характеристик оптоэлектронного полупроводниковых приборов, но допускает существенные ошибки при проведении измерений. | Допускает отдельные неточности в описании назначения и основных характеристик оптоэлектронного полупроводникового прибора. Проводит теоретические расчёты и эксперименты для определения характеристик полупроводниковых приборов, допуская незначительные ошибки. | Имеет полное представление о моделях оптоэлектронных полупроводниковых приборов и выражений, описывающих их свойства. Свободно использует теоретические модели и экспериментальные методы для определения характеристик оптоэлектронных полупроводниковых приборов. |
| ПК-3 Способен использовать современное оборудование для решения задач в области радиофизики и электроники. | ИПК-3.1 Понимает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач. | Не имеет представления о принципе действия и назначении оптоэлектронных полупроводниковых приборов. Не имеет представления об основных выражениях полупроводниковой электроники | Неполные знания принципов действия полупроводниковых оптоэлектронных приборов. Неполные знания в области применения основных выражения полупроводниковой электроники | В целом успешное, но с отдельными пробелами, знание принципов действия полупроводниковых оптоэлектронных приборов. В целом успешное, но имеются отдельные пробелы в области применения основных выражения полупроводниковой электроники | Уверенное знание принципов действия полупроводниковых оптоэлектронных приборов. Уверенное знание и применение основных выражения полупроводниковой электроники и |

| | | | | | |
|--|---|---|---|--|--|
| | ИПК-3.2 Проводит радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля. | Полное непонимание принципа измерения параметра или характеристик и оптоэлектронного полупроводникового прибора. Отсутствие навыков работы с радиоизмерительными приборами. | Испытывает затруднения в объяснении смысла измеряемого параметра или характеристик и полупроводникового оптоэлектронного прибора и принципа работы измерительной установки. Слабое владение навыками измерений параметров и характеристик с использованием современных радиоизмерительных приборов. | Допускает незначительные ошибки в объяснении смысла измеряемого параметра или характеристик и полупроводникового оптоэлектронного прибора и принципа работы измерительной установки. Не совсем уверенное владение навыками измерений параметров и характеристик полупроводниковых приборов с использованием современных радиоизмерительных приборов. | Полностью понимает смысл измеряемого параметра или характеристики оптоэлектронного полупроводникового прибора и принцип работы измерительной установки. Успешное владение навыками измерений параметров и характеристик полупроводниковых приборов с использованием современных радиоизмерительных приборов. |
|--|---|---|---|--|--|

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=1825>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (п. 9, 10).

в) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=1825>

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

– Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: учебное пособие для студентов вузов / А.Н. Игнатов. - Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2016. - 538 с

– Гермогенов В.П. Материалы, структуры и приборы полупроводниковой оптоэлектроники: учебное пособие: для студентов старших курсов вузов / В.П. Гермогенов; Нац. исслед. Том. гос. ун-т. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. – 271 с. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000511917>

- б) дополнительная литература:
- Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. – 2-е изд. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.
 - Задачи по полупроводниковой оптоэлектронике: задачник / Сост. В.П. Гермогенов. –Томск: Томский госуниверситет, 2014. – 21 с

- в) ресурсы сети Интернет:
- Полупроводниковые и оптоэлектронные приборы (Методичкус): электронный ресурс. – URL: <https://3ys.ru/poluprovodnikovye-i-optoelektronnye-pribery.html>
 - Светодиоды (иллюстрации Ф. Шуберта): электронный ресурс. – URL: <https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>
 - Физика и техника полупроводников (научный журнал РАН): электронная версия. – URL: <https://journals.ioffe.ru/journals/2>
 - eLIBRARY.RU: Научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/>

13. Перечень информационных технологий

- а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:
- Microsoft Office 2010 Russian Academic Open, Microsoft Windows Professional 7 Academic Open (Лицензия №47729022 от 26.11.2010).
 - Пакет программного обеспечения PTC MathCad Education (Договор поставки №7193 от 14.10.2015).
 - Пакет SMath Studio для решения задач на практических занятиях (в свободном доступе).
 - Публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Справочник по электронным компонентам. – URL: <http://kazus.ru/>

в) профессиональные базы данных:

- Новые полупроводниковые материалы. Характеристики и свойства: база данных ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – URL: <http://www.matprop.ru/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате («Adobe Connect»).

15. Информация о разработчиках

Копьев Виктор Васильевич, кандидат физико-математических наук, Радиофизический факультет ТГУ, доцент.