

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»

Физический факультет
Кафедра физики наноструктур и наноэлектроники

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ про-
токол № 13 от «30» ноября 2022 г.

Рабочая программа дисциплины

Физические основы полупроводниковых лазеров

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки: 11.04.04 Электроника и наноэлектроника
Направленности (профили): твердотельная электроника и наноэлектроника

Форма обучения
очная

Нижний Новгород

2023

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Физические основы полупроводниковых лазеров» относится к выборным дисциплинам формируемой участниками образовательных отношений части основной образовательной программы по направлению подготовки магистров 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» и осваивается в течение 2 семестра первого года обучения в магистратуре. «Физические основы полупроводниковых лазеров» является одним из завершающих разделов квантовой электроники. Курс базируется на знаниях студентов, приобретенных в курсах общей физики, математической физики, квантовой механики, квантовой радиофизики, физики полупроводников, классической электродинамики и др.

Целями освоения дисциплины являются:

- формирование у студентов современных представлений о физических принципах и подходах лежащих в основе различных полупроводниковых источников стимулированного излучения, ознакомление с их характеристиками, существующими на сегодняшний день проблемами и тенденциями.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
ПК-3. Способность применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и нанoeлектроники	ПК-3.1. Знание фундаментальных основ технологических процессов получения материалов и компонентов электроники и нанoeлектроники. ПК-3.2. Умение проводить экспериментальные работы по отработке и внедрению новых технологических процессов производства изделий микроэлектроники ПК-3.3. Опыт разработки методик экспериментальной проверки техно-	<i>31 (ПК-3) Знать</i> основные явления и эффекты при взаимодействии света и вещества. <i>У1 (ПК-3) Уметь</i> пользоваться основными подходами для описания основных характеристик полупроводниковых лазеров. Уметь ориентироваться в современной научной литературе по вопросам физики полупроводниковых лазеров. <i>В1 (ПК-3) Владеть</i> навыками решения задач, освоенных на полученных	Вопросы по темам/разделам дисциплины. Комплект задач и заданий к лабораторному практикуму. Фонд тестовых заданий

	логических процессов и исследования параметров наноструктурированных материалов	в ходе освоения дисциплины знаниях.	
--	---	-------------------------------------	--

Окончательное завершение формирования компетенции ПК-3 происходит при прохождении практики и выполнении научно-исследовательской работы.

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 32 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (16 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа (семинары, научно-практические занятия), 1 час - мероприятия промежуточного контроля), 39 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

3.1. Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость	2 ЗЕТ
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	33
- занятия лекционного типа	16
- лабораторные занятия	16
самостоятельная работа	39
контроль самостоятельной работы	1
Промежуточная аттестация	2 семестр – зачет

3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма итоговой аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе					
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы					Самостоятельная работа обучающегося
		из них					
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Консультации	Всего	
Тема 1. Введение. Вопросы теории взаимодействия света и вещества	12	3	3			6	6
Тема 2. Состояния электронов и их числа заполнения.	12	3	3			6	6
Тема 3. Оптика межзонных переходов	12	3	3			6	6
Тема 4. Лазеры на межзонных переходах	12	3	3			6	6
Тема 5. Упрощенная теория полупроводникового лазера	12	2	2			4	8
Тема 6. Лазеры на внутризонных переходах	11	2	2			4	7
Контроль самостоятельной работы	1					1	
Итоговая аттестация зачёт							

4. Образовательные технологии

При изучении данного курса используются современные образовательные технологии. Предусматривается широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (компьютерное моделирование, разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Студенты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий, написание рефератов с предоставлением докладов или кратких сообщений, а также теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, студенты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, мастер-классы экспертов и специалистов в области качественно-численного анализа конкретных современных задач физики полупроводниковых лазеров.

Формой итогового контроля знаний студентов по дисциплине является зачёт, в ходе которого оцениваются уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, выполнение домашних заданий с последующей проверкой навыков решения задач.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к экзамену по дисциплине.

Выполнение домашних заданий осуществляется раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

Задачи для выполнения самостоятельных контрольных работ по каждому разделу дисциплины и темы рефератов составляются преподавателем самостоятельно при ежегодном обновлении банка тестовых заданий. Количество вариантов зависит от числа обучающихся.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине, включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

ПК-3. Способность применять фундаментальные представления о физических явлениях для достижения требуемых функциональных качеств приборов, схем и устройств электроники и наноэлектроники.

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«незачет»		«зачет»				
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать основные явления и эффекты при взаимодействии света и вещества	отсутствие знаний материала	наличие грубых ошибок в основном материале	знание основного материала с рядом негрубых ошибок	знание основного материала с рядом заметных погрешностей	знание основного материала с незначительными погрешностями	знание основного материала без ошибок и погрешностей	знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
<u>Умения</u> Уметь пользоваться основными подходами для описания основных характеристик полупроводниковых лазеров. Уметь ориентироваться в современной научной литературе по вопросам физики полупроводниковых лазеров.	Полное отсутствие умения использовать основные знания физики полупроводниковых лазеров для решения задач	Неумение использовать основные знания физики полупроводниковых лазеров для решения задач (демонстрация грубых ошибок, противоречащих основным законам)	Умение использовать основные знания физики полупроводниковых лазеров для решения стандартных задач с негрубыми ошибками	Умение использовать все изученные знания физики полупроводниковых лазеров для решения стандартных задач с негрубыми ошибками	Умение использовать все изученные знания физики полупроводниковых лазеров для решения стандартных задач с незначительными погрешностями	Умение использовать все изученные знания физики полупроводниковых лазеров для решения стандартных задач и задач повышенной сложности с незначительными погрешностями	Умение использовать все изученные знания физики полупроводниковых лазеров для решения стандартных задач и задач повышенной сложности

<u>Навыки</u> Владеть навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Полное отсутствие навыка решения стандартных задач	Не владение навыками решения стандартных задач (демонстрация грубых ошибок, противоречащих основным понятиям физики полупроводниковых лазеров)	Владение навыками решения стандартных задач по основным разделам курса с негрубыми ошибками	Владение навыками решения стандартных задач по всем разделам курса с негрубыми ошибками	Владение навыками решения стандартных задач по всем разделам курса с незначительными погрешностями	Владение навыками решения стандартных задач и задач повышенной сложности с незначительными погрешностями	Владение навыками решения стандартных задач и задач повышенной сложности
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

6.2. Описание шкал оценивания

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Экзамен проводится в устной форме. Устная часть экзамена заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ. Практическая часть экзамена предусматривает решение двух задач по различным разделам курса.

Оценка	Уровень подготовки
Превосходно	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит исчерпывающие, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение уверенно применять на практике приобретенные навыки, владение в полной мере методиками решения задач. 100 % -ное выполнение контрольных экзаменационных заданий

Отлично	<p>Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше</p>
Очень хорошо	<p>Хорошая подготовка. Студент дает ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями; неполно отвечает на дополнительные вопросы; приводит достаточно аргументированные и почти полные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами; или исчерпывающее решение приводится только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена с заметными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.</p>
Хорошо	<p>В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Студент дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.</p>
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p>

Неудовлетворительно	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.
Плохо	Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, демонстрирует полное непонимание сформулированных в билете задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20 %.

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование,
- устные и/или письменные ответы на вопросы.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии:

- практические контрольные задания (далее – ПКЗ), включающие одну или несколько задач.

По сложности ПКЗ разделяются на простые (стандартные) и комплексные задания. Простые ПКЗ предполагают решение в одно или два действия, применяются для оценки умений. Комплексные задания (задания повышенной сложности) требуют поэтапного решения и развернутого ответа с применением нестандартных подходов к решению. Комплексные практические задания применяются для оценки владений навыками.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Теоретические вопросы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

- 1) Метод возмущений первого порядка в теории электронных переходов.
- 2) Вывод и рамки применимости золотого правила Ферми.
- 3) Спонтанное и вынужденное излучение света.
- 4) Излучение абсолютно черного тела.
- 5) Термодинамические соотношения Эйнштейна.
- 6) Полуклассический подход в теории взаимодействия света и вещества. Оператор взаимодействия в дипольном приближении.
- 7) Соотношение между коэффициентом оптического поглощения и темпом индуцированных светом переходов.

- 8) Классический подход в теории взаимодействия света и вещества. Материальные соотношения и понятия о высокочастотной диэлектрической проницаемости и проводимости.
- 9) Соотношение между коэффициентом поглощения света и компонентами диэлектрической проницаемости среды.
- 10) Поглощение света свободными электронами в приближении тождественных частиц. Формула Друде-Лоренца
- 11) Формулировка кинетического уравнения Больцмана и его приближенных методов решения в приложении к вопросам взаимодействия света с газом заряженных частиц.
- 12) Квантовый подход в теории взаимодействия света и вещества. Электромагнитное поле как совокупность гармонических операторов, понятие фотона.
- 13) Спонтанное излучение света двухуровневой системой в квантовой теории поля.
- 14) Индуцированные светом переходы в первом порядке квантовой теории взаимодействия света и вещества и коэффициент поглощения/усиления света.
- 15) Оптика межзонных переходов в полупроводниках. Матричные элементы и поглощение на межзонных и внутризонных оптических переходах.
- 16) Плотность населенности электронных состояний в полупроводнике.
- 17) Вывод выражения для коэффициента поглощения/усиления света на межзонных переходах в полупроводнике.
- 18) Безызлучательные переходы и методы формирования инверсной населенности электронных состояний (на простых примерах).
- 19) Принцип формирования инверсной населенности электронных состояний и стимулированное излучение на межзонных переходах в полупроводниках, понятие квазиуровня Ферми.
- 20) Полупроводниковые лазеры с оптической накачкой.
- 21) Полупроводниковые лазеры с возбуждением электронным пучком.
- 22) Полупроводниковые лазеры с инжекционной накачкой на простом p-n переходе.
- 23) Особенности и преимущества полупроводникового инжекционного лазера на двойном гетеропереходе
- 24) Упрощенная теория полупроводниковых лазеров, пороговый ток, коэффициент усиления, эффективность излучения и т.д.
- 25) Полупроводниковые лазеры на межзонных переходах валентной зоны германия в скрещенных электрическом и магнитном полях.
- 26) Стимулированное излучение тяжелых дырок германия при их баллистическом разогреве в электрическом поле (НЕМАГ).
- 27) Квантово-каскадные лазеры на межподзонных переходах квантовых ям.

Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Для оценки сформированности компетенции ПК-3.

Задача 1.1. Вывести золотое правило Ферми.

Задача 1.2. Вывести спектральную плотность излучения абсолютно черного тела. Рассмотреть предельные случаи высоких и низких частот.

Задача 2.1. Вывести выражения для коэффициента поглощения света на межзонных переходах в полупроводнике.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Физические основы полупроводниковых лазеров»

а) основная литература:

1. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников.- М. Наука, 1978. <https://e.lanbook.com/book/212255>, <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=800200&idb=0>.
2. Ярив А. Квантовая электроника. М. , Сов. Радио, 1980. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=321585&idb=0>.
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред.- М. Наука, 1957, 1959. 620 с. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=741032&idb=0>, <http://znanium.com/catalog/document?id=369179>.

б) дополнительная литература:

1. Файн В.М. Ханин Я.И. Квантовая радиофизика. М., Сов. Радио, 1965, т. 1,2. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=321579&idb=0>
2. Звелто О. Принципы лазеров.- М. Мир, 1990. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=313602&idb=0>.
3. Квантовая оптика и квантовая радиофизика. Пер. под ред. О.В. Богданкевича и О.Н.Крохина.- М., Мир, 1966. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=450748&idb=0>.
4. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. М., Наука, Гл. ред. Физ.-мат. Литературы, 1989. - 280с. <http://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=352535&idb=0>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

1. А.И. Слепцов, А.А. Алексеев. Исследование свойств полупроводникового лазера и изучение возможностей его использования в лабораторных и демонстрационных опытах по физике. Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова Выпуск № 4 / том 5 / 2008. <http://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svoystv-poluprovodnikovogo-lazera-i-izuchenie-vozmozhnostey-ego-ispolzovaniya-v-laboratornyh-i-demonstratsionnyh-opytah#ixzz3aCJAdpIN>.
2. Журнальный портал ФТИ им. А.Ф. Иоффе <http://journals.ioffe.ru/>.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории.

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории. Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их

графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 11.04.04 – «Электроника и нанoeлектроника».

Автор

В.Н. Шастин, заведующий лабораторией ИФМ РАН, гл. н. с. отдела физики полупроводников, д. ф.-м. н., профессор.

Рецензент

В.Я. Алёшкин, гл. н. с. отдела физики полупроводников, д. ф.-м. н., профессор

Заведующий межфакультетской базовой кафедрой «Физика наноструктур и нанoeлектроника» З.Ф.Красильник.

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ, протокол б/н от «17» ноября 2022 г.

Председатель Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ А.А. Перов