

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Высшая школа общей и прикладной физики

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол № 10 от 02.12.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Основы физики полупроводниковых лазеров

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
03.04.02 - Физика

Направленность образовательной программы
Общая и прикладная физика

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.02.02.04 Основы физики полупроводниковых лазеров относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

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	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-3: Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	ПК-3.1: Демонстрация способности свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	ПК-3.1: Знать основные явления и эффекты при взаимодействии света и вещества. Уметь пользоваться основными подходами для описания основных характеристик полупроводниковых лазеров. Владеть навыками решения проблемных вопросов, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.	Индивидуальное устное собеседование	Зачёт: Контрольные вопросы

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	2
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	0
- КСР	1
самостоятельная работа	39
Промежуточная аттестация	0 Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
Ф	Ф	Ф	Ф	Ф	
1. Введение. Вопросы теории взаимодействия света и вещества	10	4		4	6
2. Состояния электронов и их числа заполнения.	10	4		4	6
3. Оптика межзонных переходов	12	6		6	6
4. Лазеры на межзонных переходах	12	6		6	6
5. Упрощенная теория полупроводникового лазера	13	6		6	7
6. Лазеры на внутризонных переходах	14	6		6	8
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	72	32	0	33	39

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Вопросы теории взаимодействия света и вещества
2. Состояния электронов и их числа заполнения.
3. Оптика межзонных переходов
4. Лазеры на межзонных переходах
5. Упрощенная теория полупроводникового лазера
6. Лазеры на внутризонных переходах

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

а) основная литература:

- 1) Ландау Л. Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред.- Физматлит, 2005, 656 с.
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5922101234.html>
- 2) Файн В.М. Ханин Я.И. Квантовая радиофизика. М., Сов. Радио, 1965, т. 1,2. – 9 экз.
- 3) Берестецкий В.Б., Ахиезер А. И. Квантовая электродинамика.- М. Наука, 1981. 431 с. – 6 экз.

4) Волоконные технологические лазеры [Электронный ресурс] : Учеб. пособие / Ю. В. Голубенко, А. В. Богданов, Ю. В. Иванов, Р. С. Третьяков. - М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. - http://www.studentlibrary.ru/book/bauman_0153.html

б) дополнительная литература:

- 1) Гинсбург В. Л. Рухадзе А. А. Волны в магнитоактивной плазме.- М. Наука, 1975. – 3 экз.
- 2) Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников.- М. Наука, 1978. – 4 экз.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины)

- 1) А.А. Афоненко, В.К. Кононенко, И.С. Манак. Теория полупроводниковых лазеров. Учебное пособие. <http://www.rfe.by/media/kafedry/kaf2/publications/afonenko/teoriya-polupr-lazerov.pdf>
- 2) 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>

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Индивидуальное устное собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

- 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).
- 20) Принцип формирования инверсной населенности электронных состояний и стимулированное излучение на межзонных переходах в полупроводниках, понятие квазиуровня Ферми.
- 21) Полупроводниковые лазеры с оптической накачкой.
- 22) Полупроводниковые лазеры с возбуждением электронным пучком.
- 23) Полупроводниковые лазеры с инжекционной накачкой на простом p-n переходе.
- 24) Особенности и преимущества полупроводникового инжекционного лазера на двойном гетеропереходе
- 25) Упрощенная теория полупроводниковых лазеров, пороговый ток, коэффициент усиления, эффективность излучения и т.д.
- 26) Полупроводниковые лазеры на межзонных переходах валентной зоны германия в скрещенных электрическом и магнитном полях.
- 27) Стимулированное излучение тяжелых дырок германия при их баллистическом разогреве в электрическом поле (НЕМАГ).
- 28) Квантово-каскадные лазеры на межподзонных переходах квантовых ям.

Критерии оценивания (оценочное средство - Индивидуальное устное собеседование)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	<p>Справедливо одно из следующих утверждений: (1). Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов. Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач. (2). Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме. Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов. (3). Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. (4). Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами. (5). Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.</p>
не зачтено	<p>Справедливо одно из следующих утверждений: (1). Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки. (2). Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа.</p>

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
Знания	Отсутствие	Уровень	Минимальн	Уровень	Уровень	Уровень	Уровень
	не зачтено			зачтено			

	знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	о допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отделенным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»

не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

- 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).
- 20) Принцип формирования инверсной населенности электронных состояний и стимулированное излучения на межзонных переходах в полупроводниках, понятие квазиуровня Ферми.
- 21) Полупроводниковые лазеры с оптической накачкой.
- 22) Полупроводниковые лазеры с возбуждением электронным пучком.
- 23) Полупроводниковые лазеры с инжекционной накачкой на простом p-n переходе.
- 24) Особенности и преимущества полупроводникового инжекционного лазера на двойном гетеропереходе
- 25) Упрощенная теория полупроводниковых лазеров, пороговый ток, коэффициент усиления, эффективность излучения и т.д.
- 26) Полупроводниковые лазеры на межзонных переходах валентной зоны германия в скрещенных электрическом и магнитном полях.
- 27) Стимулированное излучение тяжелых дырок германия при их баллистическом разогреве в электрическом поле (НЕМАГ).
- 28) Квантово-каскадные лазеры на межподзонных переходах квантовых ям.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Справедливо одно из следующих утверждений: (1). Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов. Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач. (2). Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме. Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов. (3). Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. (4). Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок.

Оценка	Критерии оценивания
	<p>Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами. (5). Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок. Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.</p>
не зачтено	<p>Справедливо одно из следующих утверждений: (1). Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продemonстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продemonстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки. (2). Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа.</p>

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Ландау Лев Давидович. Электродинамика сплошных сред. - М. : Физматгиз, 1959. - 532 с. : черт. - (Теоретическая физика). - 11.70., 1 экз.
2. Файн Вениамин Моисеевич. Квантовая радиофизика. - М. : Советское радио, 1965. - 608 с. : ил. - 2.02., 4 экз.
3. Ахиезер Александр Ильич. Квантовая электродинамика. - 4-е изд., перераб. - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. - 431 с. - 4347.00., 5 экз.
4. Богданов А. В. Волоконные технологические лазеры и их применение : учебное пособие для вузов / Богданов А. В., Голубенко Ю. В.; Голубенко Ю. В. - 5-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2023. - 236 с. - Допущено УМО вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Машиностроение». - Книга из коллекции Лань - Инженерно-технические науки. - ISBN 978-5-507-47811-8., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=864463&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Гинзбург Виталий Лазаревич. Волны в магнитоактивной плазме. - Изд. 2-е, перераб. - М. : Наука, 1975. - 255 с. : с черт. - (Современные проблемы физики). - 0.90., 2 экз.
2. Ансельм Андрей Иванович. Введение в теорию полупроводников = Introduction to the Semiconducting Theory : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по физ. и техн. направлениям и специальностям. - Изд. 3-е, стер. - СПб. : Лань, 2008. - 624 с. : ил. - (Классическая учебная литература по физике / ред. совет: Ж. И. Алферов (пред.) [и др.]) (Учебники для вузов. Специальная литература) (Лучшие классические учебники). - ISBN 978-5-8114-0762-0 : 419.50., 25

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

- 1) А.А. Афоненко, В.К. Кононенко, И.С. Манак. Теория полупроводниковых лазеров. Учебное пособие. <http://www.rfe.by/media/kafedry/kaf2/publications/afonenko/teoriya-polupr-lazerov.pdf>
- 2) 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#ixzz3aCJAdplN>

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: 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.

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 ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.04.02 - Физика.

Автор(ы): Дубинов Александр Алексеевич, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Викторов Михаил Евгеньевич, кандидат физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 31.01.2025, протокол № 2.