

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Laser Physics/Физика лазеров
по направлению:	Фотоника и оптоинформатика
профиль подготовки:	Фотоника, квантовые технологии и двумерные материалы Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики и технологии наноструктур
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

- лекции: 30 час.
- семинары: 30 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составили:

П.Б. Гинзбург, д-р физ.-мат. наук
Д.С. Филонов, phd (к.ф.-м.н.)

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и технологии наноструктур 01.02.2021

Аннотация

Дисциплина знакомит студентов с концепцией работы лазера и основными понятиями лазерной физики. Слушатели узнают основные методы описания взаимодействия света и материи; принципы работы лазера; классификацию лазеров и особенности их работы, а также области применения лазеров в современной технике.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

дать студентам знания о базовых концепциях работы лазера и лазерной физики

Задачи дисциплины

- Получение знаний о методах характеристики источников света
- Получение знаний о базовых методах описания процессов взаимодействия света и вещества
- Изучение принципов действия лазера
- Изучение классификации лазеров и режима их работы
- Изучение применений лазеров в современных технологиях

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области фотоники и оптоинформатики
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований в области фотоники и оптоинформатики к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

1. Методы описания основных процессов взаимодействия света с веществом
2. Методы конструирования оптических резонаторов
3. Методы описания динамики лазеров посредством скоростных уравнений
4. Характеристики излучения, генерируемого лазерным источником
5. Области применения лазерной физики

уметь:

1. Формулировать уравнения динамики лазеров
2. Подбирать правильную характеристику оптического резонатора, отвечающего конкретному приложению
3. Решать систему связанных уравнений, описывающих динамику взаимодействия активной среды и света в резонаторе
4. Оценивать свойства, включая фотонную статистику, излучения, генерируемого лазером

владеть:

1. Методами описания лазерной динамики
2. Методами конструирования лазерных резонаторов
3. Методами описания взаимодействия светом со средой
4. Методами построения моделей сложных физических процессов

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Вводное занятие: история лазеров и их развитие	2	2		2
2	Источники света и их характеристика	2	2		2
3	Взаимодействие света с веществом (поглощение, спонтанное и вынужденное излучение)	2	2		2
4	Спектральные характеристики процессов поглощения и излучения, гомогенное и негетогенное уширение линий	2	2		2
5	Оптические усилители, скоростные уравнения	3	3		3
6	Лазерная генерация, условия порога генерации, сатурация и другие эффекты	2	2		2
7	Оптимальные условия работы лазера	2	2		2

8	Одномодовые и многомодовые лазеры	2	2		4
9	Характеризация лазерных источников	3	3		6
10	Статистика лазерного излучения, переход порога генерации	2	2		4
11	Лучевая оптика, матрица ABCD	2	2		4
12	Условия стабильности оптических резонаторов	2	2		4
13	Гауссовы пучки, стабильность оптических резонаторов	2	2		4
14	Обобщение материала	2	2		4
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Вводное занятие: история лазеров и их развитие

История развития источников света. Основные вехи в разработках лазерных технологиях и их приложения. Обзор материалов курса.

2. Источники света и их характеристика

Базовые понятия характеристики источников света, понятие когерентности (пространственной и временной). Методы измерения когерентности. Значимость лазерных технологий в проблемах нитрометрии.

3. Взаимодействие света с веществом (поглощение, спонтанное и вынужденное излучение)

Введение базовых понятий поглощения и излучения. Модель абсолютно черного тела. Понятие спонтанного излучения в модели Планка. Коэффициенты Эйнштейна. Скоростные уравнения Эйнштейна для описания спектра излучения абсолютно черного тела.

4. Спектральные характеристики процессов поглощения и излучения, гомогенное и негомогенное уширение линий

Понятие ширины линии в процессах спонтанного излучения. Однородное и неоднородное уширение линий. Уширения спектральных линий в газовых и твердотельных излучателях.

5. Оптические усилители, скоростные уравнения

Формулировка скоростных уравнений для трех- и четырехуровневых систем. Решение уравнений в режиме непрерывной и импульсной накачки. Формулировка условий для создания инверсии населенности.

6. Лазерная генерация, условия порога генерации, сатурация и другие эффекты

Формулировка скоростных уравнений для описания излучения в оптических резонаторах. Связанные уравнения для описания лазерной генерации. Формулировки условий для достижения лазерной генерации.

7. Оптимальные условия работы лазера

Анализ переходных эффектов в лазерной генерации. Временная лазерная модуляция. Оптимальные условия лазерной генерации, связанные с конструкцией оптического резонатора. Анализ резонатора Фабри-Перо.

Семестр: 2 (Весенний)

8. Одномодовые и многомодовые лазеры

Формулировка уравнений лазерной генерации в режимах существования одной или многих мод в оптическом резонаторе. Обсуждение однородного и неоднородного уширения линий. Условия биения мод.

9. Характеризация лазерных источников

Непрерывные и импульсные лазеры, модуляция добротности и синхронизация мод. Анализ активных сред для лазерной генерации. Обзор полупроводниковых лазеров и нанолазеров.

10. Статистика лазерного излучения, переход порога генерации

Шум лазерных источников, модель уширения линий Шавлова-Таунса. Статистика фотонов ниже и выше порога лазерной генерации.

11. Лучевая оптика, матрица ABCD

Формулировка распространения света в лучевой оптике. Матрица ABCD для базовых оптических элементов. Анализ оптических элементов с помощью матричной оптики.

12. Условия стабильности оптических резонаторов

Оценка стабильности оптических резонаторов с помощью матрицы ABCD. Проектирование оптических цепей.

13. Гауссовы пучки, стабильность оптических резонаторов

Решение задачи дифракции в формулировке Гауссовых пучков. Основные свойства Гауссовых пучков. Распространение Гауссовых пучков в оптических цепях в формулировке матричной оптики. Условия стабильности оптических резонаторов.

14. Обобщение материала

Обзор пройденного материала. Решение типовых задач.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

1. Лекционные занятия:

- 1.1. комплект электронных презентаций/слайдов,
- 1.2. аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук)
- 1.3. специальные технические средства для обучающихся инвалидов и лиц с ОВЗ

2. Практические занятия:

- 2.1. учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа,
- 2.2. презентационная техника (проектор, экран, компьютер/ноутбук, лазерная указка),
- 2.3. рабочее место преподавателя, оснащенное компьютером с доступом в Интернет,
- 2.4. рабочие места студентов, оснащенные компьютерами с доступом в Интернет, предназначенные для работы в электронной образовательной среде,
- 2.5. пакеты ПО общего назначения (текстовые редакторы, графические редакторы)
- 2.6. специальные технические средства для обучающихся инвалидов и лиц с ОВЗ

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Принципы лазеров [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / О. Звелто ; пер. с англ. Д. Н. Козлова [и др.] ; под науч. ред. Т. А. Шмаонова ; рус. пер. перераб. и доп. при участии автора книги .— 4-е изд. — СПб. : Лань, 2008 .— 720 с.

Literature fund of the basic departament:

- A. Siegman, Lasers; University Science Book: Mill Valley California, 1986

Дополнительная литература

Literature fund of the basic departament:

- R. Loudon. The Quantum Theory of Light; Springer, 2009
- Marlan O. Scully et al, Quantum Optics; Cambridge University Press, 2012

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

- <https://lms.mipt.ru/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=pLl3q6WKtxw&list=PLLYQF5WvJdJUIWvYHSG0km9MHf4Vud6yc>
- https://www.rp-photonics.com/laser_optics.html

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

При подготовке и проведении лекционных занятий используется сеть интернет.

Кроме того, используется Libre Office, а также графический пакет Ink Scape.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

При изучении дисциплины «Физика лазеров» обучающимся рекомендуется посещать по возможности все лекционные и практические занятия. При самостоятельной работе рекомендуется изучить все указанные источники, приводимые в списке дополнительной литературы. Самостоятельно прослушать курсы вспомогательных лекций.

При выполнении домашних заданий проводить сверку промежуточных результатов у преподавателя. Отвечать на все теоретические вопросы, приведенные в разделе «дополнительные вопросы» в каждом домашнем задании.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Фотоника и оптоинформатика
профиль подготовки:	Фотоника, квантовые технологии и двумерные материалы Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики и технологии наноструктур
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Разработчики:

П.Б. Гинзбург, д-р физ.-мат. наук
Д.С. Филонов, phd (к.ф.-м.н.)

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области фотоники и оптоинформатики
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований в области фотоники и оптоинформатики к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Laser Physics/Физика лазеров» обучающийся должен:

знать:

1. Методы описания основных процессов взаимодействия света с веществом
2. Методы конструирования оптических резонаторов
3. Методы описания динамики лазеров посредством скоростных уравнений
4. Характеристики излучения, генерируемого лазерным источником
5. Области применения лазерной физики

уметь:

1. Формулировать уравнения динамики лазеров
2. Подбирать правильную характеристику оптического резонатора, отвечающего конкретному приложению
3. Решать систему связанных уравнений, описывающих динамику взаимодействия активной среды и света в резонаторе
4. Оценивать свойства, включая фотонную статистику, излучения, генерируемого лазером

владеть:

1. Методами описания лазерной динамики
2. Методами конструирования лазерных резонаторов
3. Методами описания взаимодействия светом со средой
4. Методами построения моделей сложных физических процессов

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Не предусмотрено.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Первый семестр - примеры задания контрольной работы:

Каждый вариант задания содержит 1 задачу, которая является аналитическим расчётом. Предлагается 15 вариантов. Условия задач изданы в печатном виде. Решения заданий представляются в печатной форме.

Контрольное задание 1 (Интерферометры Фабри-Перо и спектральный отклик)

Целью данного вопроса является проведение базового анализа эталона Фабри-Перо и применение его к нескольким различным источникам света.

1. Эталон Фабри-Перо представляет собой параллельную пластину прозрачного материала с индексом преломления n . Ширина пластины равна d .
2. Монохроматическая плоская волна на заданной частоте воздействует на пластину под углом α . Вывести резонансное условие (при максимальной передаче), связывающее геометрию пластины, ее показатель преломления и частоту падающей волны. Выражения должны быть выведены из базовых принципов.
3. Точечный источник белого света расположен в непосредственной близости от эталона. Опишите образование цветных интерференционных полос на экране за эталоном. Опишите радиусы полос, которые зависят от геометрии системы и длины волны света.
4. Опишите свойство временной когерентности источника света (3-4 предложения максимум).
5. Плоская волна падает на эталон под прямым углом. Источник, генерирующий плоскую волну, имеет конечное время когерентности τ_c . Запишите примерное выражение, описывающее прохождение через эталон. Подсказка: почему важна связь между τ_c и d ? Каков физический смысл этого соотношения?
6. Предложите метод измерения когерентности света с эталоном Фабри-Перо. (Примечание: на практике другие интерферометры являются предпочтительным выбором по сравнению с этой задачей). Бонус: предложить другие интерферометры, которые удобнее использовать для оценки свойств когерентности источника.

Второй семестр

Вопросы для самопроверки:

1. Сформулировать уравнение лазерной генерации
2. Сконструировать оптический резонатор
3. Сформулировать основные характеристики лазерного источника

4. Описать основные процессы взаимодействия между светом и веществом
5. Решить скоростные уравнения лазерного усилителя
6. Вывести условия порога лазерной генерации
7. Рассчитать резонатор Фабри-Перо
8. Найти матрицу ABCD для оптической системы

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Формулировка уравнений лазерной генерации в режимах существования одной или многих мод в оптическом резонаторе. Однородное и неоднородное уширения линий. Условия биения мод.
2. Формулировка распространения света в лучевой оптике. Матрица ABCD для базовых оптических элементов. Анализ оптических элементов с помощью матричной оптики.

Билет 2.

1. Непрерывные и импульсные лазеры, модуляция добротности и синхронизация мод. Анализ активных сред для лазерной генерации.
2. Решение задачи дифракции в формулировке Гауссовых пучков. Основные свойства Гауссовых пучков. Распространение Гауссовых пучков в оптических цепях в формулировке матричной оптики. Условия стабильности оптических резонаторов.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Оценивание знаний происходит в форме дифференцированного зачета (9-й семестр) и экзамена (10-й семестр). Дифференцированный зачет и экзамен проводятся по билетам. Никакие вспомогательные средства не допускаются. Студент представляет свое решение поставленной задачи и ответ на вопрос билета экзаменатору. Затем экзаменатор задает студенту несколько вопросов, которые равномерно охватывают содержание курса. Итоговая оценка выставляется на основе качества ответов и продемонстрированного уровня понимания.