

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН)

УТВЕРЖДАЮ:



Зам. директора по научной работе

М.Ю. Глявин

15» ангелия 2022г.

Рабочая программа дисциплины

Лазерная физика

Уровень образования

высшее образование – подготовка кадров высшей квалификации

Научная специальность

1.3.19. Лазерная физика

(шифр, наименование)

Форма обучения

очная

Нижний Новгород

2022

1. Место и цели дисциплины в структуре программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

Дисциплина «Лазерная физика» относится к числу специальных дисциплин программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (далее – программы аспирантуры), является обязательной для освоения и изучается на третьем году обучения, в пятом семестре.

Основными целями освоения дисциплины являются формирование у аспирантов современного представления об основных физических процессах, происходящих при генерации и усилении лазерного излучения, и о методах управления его пространственными, временными и спектральными параметрами; освоение аспирантами основных знаний о физической сути, методах описания и способах экспериментальной реализации различных режимов работы лазера (непрерывный режим, свободная генерация, модуляция добротности, синхронизация мод).

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Аспирант, освоивший дисциплину «Лазерная физика», должен:

Знать основные методы описания процессов накачки, спонтанного излучения, усиления и генерации лазерного излучения. Иметь понятие об открытом резонаторе, его модах и условиях самовозбуждения.

Знать особенности селекции продольных, поперечных и поляризационных мод в задающем генераторе.

Знать основные явления в лазерных усилителях: усиление по слабому сигналу, насыщение усиления, тепловые эффекты, усиление сверхкоротких импульсов.

Уметь применять полученные знания для исследования путей высокоэффективной генерации и усиления излучения и возможности управления основными характеристиками лазерного излучения.

Уметь использовать полученные знания для изучения процессов генерации и усиления излучения в различных лазерных средах, анализировать результаты использования простых моделей для описания взаимодействия излучения с инверсной средой при его генерации и усилении в различных резонаторных и усилительных схемах лазеров.

Владеть представлениями об особенностях основных типов лазеров: лазеры на кристаллах с примесными ионами группы железа, лазеры на примесных редкоземельных ионах, волоконные лазеры, газовые лазеры на нейтральных атомах, ионные газовые лазеры, лазеры на парах металлов, молекулярные газовые лазеры, газодинамические лазеры, эксимерные лазеры, химические лазеры, полупроводниковые лазеры, лазеры на свободных электронах.

Владеть современными уровнем научных исследований, в том числе, современными теоретическими и численными моделями, используемыми в лазерной физике, с учетом отечественного и зарубежного опыта.

По результатам освоения дисциплины «Лазерная физика» аспиранты сдают кандидатский экзамен по научной специальности 1.3.19. Лазерная физика.

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 114 часов, из которых 34 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятия лекционного типа, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 36 часов – подготовка к сдаче кандидатского экзамена, 44 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

Структура дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	в том числе			Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Контактная работа, часов			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Всего	
Введение в лазерную физику	6	2		2	4
Линия перехода. Уширение спектральных линий.	6	2		2	4
Когерентное усиление излучения.	8	4		4	4
Открытые резонаторы.	6	2		2	4
Стационарная генерация	6	2		2	4
Уравнения для разности населенностей и интенсивности в резонаторе	8	4		4	4
Модуляция добротности	8	4		4	4
Синхронизация мод и ультракороткие лазерные импульсы	8	4		4	4
Селекция мод	6	2		2	4
Термооптика твердотельных лазеров	8	4		4	4
Типы лазеров	6	2		2	4
Аттестация по дисциплине – кандидатский экзамен				2	36
Итого				114	

Содержание дисциплины

Введение в лазерную физику. Что такое лазер. Место лазеров в современном мире. Основные понятия. Переходы в атоме под действием электромагнитного излучения. Спонтанные и вынужденные переходы. Коэффициенты Эйнштейна.

Линия перехода. Уширение спектральных линий. Однородное и неоднородное уширение спектральных линий. Механизмы уширения и форма спектральных линий.

Когерентное усиление излучения. Сечение перехода. Инверсия заселенностей. Активная среда. Накачка. Усиление излучения. Эффект насыщения усиления и поглощения. Интенсивность насыщения. Коэффициент усиления непрерывного усилителя. Коэффициент усиления импульсного усилителя. Формула Франца-Нодвига. Многопроходные усилители.

Открытые резонаторы. Понятие об открытом резонаторе. Сходство и различие интерферометра Фабри-Перо и лазерного резонатора. Основные положения теории Фокса и Ли. Условие устойчивости резонатора. Резонатор с плоскими зеркалами, конфокальный резонатор. Гауссов пучок в свободном пространстве и в резонаторе с вогнутыми зеркалами. Продольные моды резонатора. Поляризационные моды резонатора. Кольцевой резонатор и его особенности.

Стационарная генерация. Условие самовозбуждения открытого резонатора. Порог генерации. Стационарная генерация. Оптимальный коэффициент отражения зеркала (резонатор Фабри-Перо и кольцевой резонатор).

Уравнения для разности населенностей уровней среды и интенсивности поля в резонаторе. Уравнение для разности населенностей для 3-х-уровневой и 4-х-уровневой модели. Выходная мощность непрерывного генератора. Уравнение для интенсивности поля в резонаторе.

наторе. Время установления стационарного режима и релаксационная частота для 3х-уровневой и 4х-уровневой модели. Свободная генерация.

Модуляция добротности. Модуляция добротности: идея, уравнения, оптимальный коэффициент отражения выходного зеркала, длительность импульса. Методы реализации модуляции добротности: насыщающийся поглотитель, вращающееся зеркало, электрооптический модулятор, акустооптический модулятор, ОВФ-зеркало.

Синхронизация мод и ультракороткие лазерные импульсы. Генерация на двух и более продольных модах. Синхронизация мод: идея, уравнения, параметры выходного излучения. Методы синхронизации мод: насыщающийся поглотитель, электрооптический модулятор, акустооптический модулятор, керровская линза. Ультракороткие лазерные импульсы: генерация, усиление, диагностика.

Селекция мод. Селекция продольных, поперечных, поляризационных мод в резонаторе: принципы и методы экспериментальной реализации. Подавление двунаправленной генерации в кольцевом резонаторе. Взаимные и невзаимные оптические элементы.

Термооптика твердотельных лазеров. Источники тепла в лазерах. Основные тепловые эффекты в лазерах: тепловая линза, деполяризация, механическое разрушение. Параметры качества среды с точки зрения минимизации тепловых эффектов. Критерии оценки качества пучка. Методы подавления и компенсации тепловых эффектов. Понятие об импульсно-периодическом режиме.

Типы лазеров. Газовые лазеры (в том числе атомарные, ионные, молекулярные, химические, фотодиссоционные, эксимерные и т.д.). Твердотельные лазеры. Лазеры на красителях. Полупроводниковые лазеры. Лазеры на свободных электронах.

4. Образовательные технологии

Основными видами образовательных технологий дисциплины «Лазерная физика» являются занятия лекционного типа и самостоятельная работа обучающегося. Аспирантам даются задания по самостоятельной подготовке материалов по тематике занятий, которые впоследствии обсуждаются с научными руководителями. При необходимости организуются групповые и индивидуальные консультации обучающихся с руководителем образовательной программы.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов.

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки ИПФ РАН, в компьютерном классе с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе дисциплины и контролируется научным руководителем аспиранта. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, доступные ресурсы в Интернет по тематике курса, а также конспекты и презентации лекций.

6. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Лазерная физика» проводится в форме кандидатского экзамена по научной специальности 1.3.19. Лазерная физика с оценкой по следующей шкале: «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично»). Кандидатский экзамен сдается по совокупности всех освоенных за время обучения специальных дисциплин.

Критерии оценок:

Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все заданные теоретические вопросы; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированное решение сформулированной задачи с незначительными недочетами, способен успешно решить дополнительную задачу. 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. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше
Хорошо	В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все заданные теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полное решение сформулированной задачи с некоторыми недочетами. 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. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 90%.
Удовлетворительно	Минимально достаточный уровень подготовки. Аспирант показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированное решение сформулированной задачи. 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. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.
Неудовлетворительно	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы, как на заданные теоретические вопросы, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решение сформулированной задачи с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владении методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.

Вопросы по программе кандидатского экзамена

1. Волновая оптика световых пучков и импульсов: уравнения Максвелла и волновое уравнение.
2. Уравнения квазиоптики, уравнения для медленно меняющихся амплитуд электромагнитного поля.
3. Гауссовы пучки, их преобразование оптическими системами. Дифракционное расплывание, длина дифракции.
4. Фурье-оптика волновых пучков и импульсов; пространственная фильтрация.
5. Материальная дисперсия сплошной среды. Распространение импульсов в диспергирующих средах: групповая скорость, дисперсионное расплывание.
6. Отклик вещества на действие электромагнитного поля. Векторы поляризации и намагнитченности среды. Разложение поляризации в ряд по степеням поля.
7. Многофотонные резонансные процессы. Обобщенная двухуровневая система. Уравнения Блоха. Когерентные нестационарные процессы.
8. Взаимодействие электромагнитного излучения с кристаллами. Зонная структура энергетических уровней. Диэлектрики, полупроводники, металлы.
9. Квантование поля. Операторы рождения и уничтожения фотонов. Гамильтониан квантованного поля. Коммутационные соотношения для операторов поля.

10. Пространственная и временная когерентность. Корреляционные функции первого и второго порядка.
11. Уравнение переноса излучения (УПИ). Диффузионное приближение УПИ, баллистические и диффузные фотоны, длина свободного пробега фотона.
12. Чистые и смешанные состояния. Матрица плотности, населенность и квантовая когерентность.
13. Взаимодействие излучения с веществом: двухуровневое приближение, приближение вращающейся волны, приближение медленно меняющихся амплитуд. Адиабатическое исключение переменных.
14. Уровни энергии атомов, молекул, кристаллов. Поглощение и испускание электромагнитного излучения. Вероятности спонтанных и индуцированных переходов.
15. Методы создания инверсии населенностей. Релаксационные процессы. Ширина линии перехода. Коэффициент усиления. Эффект насыщения.
16. Принцип действия лазеров. Оптические резонаторы. Спектр мод резонатора. Добротность резонатора. Устойчивые и неустойчивые резонаторы.
17. Балансные уравнения одномодового лазера. Стационарные состояния и релаксационные колебания.
18. Методы модуляции добротности резонатора лазера. Методы активной и пассивной синхронизации мод излучения в лазере
19. Непрерывный и импульсный лазерный усилитель. Влияние усиленного спонтанного излучения на запасенную энергию
20. Источники тепла в лазерах. Основные тепловые эффекты в лазерах и критерии оценки качества пучка
21. Использование активных элементов дисковой, слэбовой геометрии, а также оптического волокна в лазерах с высокой средней мощностью.
22. Трехволновое взаимодействие световых волн в нелинейных кристаллах: особенности распространения волн в анизотропных средах; фазовый и групповой синхронизм.
23. Генерация суммарных и разностных частот. Параметрическое усиление и генерация.
24. Усиление фемтосекундных импульсов и способы получения сверхсильных оптических полей. Метод усиления чирпованных импульсов (СРА-method). Параметрическое усиление чирпованных импульсов (ОРСРА).
25. Природа кубической нелинейности. Самовоздействие световых импульсов в средах с кубической нелинейностью.
26. Вынужденное комбинационное рассеяние света: характеристика явления. Параметрическая связь стоксовой и антистоксовой компонент при попутном рассеянии.
27. Обращение волнового фронта света при вынужденном бриллюэновском рассеянии и четырехволновом параметрическом смещении. Использование ОВФ в лазерной оптике.
28. Нелинейно-оптические методы генерации когерентного терагерцового излучения.
29. Одно- и многофотонная ионизация атомов и молекул. Туннельная и надбарьерная ионизация атомов и ионов.
30. Пондеромоторное ускорение фотоэлектронов. Генерация высоких оптических гармоник и суперконтинуума. Генерация каскада комбинационных частот.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. О. Звелто, Принципы лазеров, СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 4 экз.
2. Крюков П.Г. «Фемтосекундные импульсы» М.: Физматлит, 2008 – 3 экз.
3. Карлов *Н.В.* Лекции по квантовой электронике. - М., Наука, 1988, 336 – 3 экз.

4. Оптические системы с усилителями яркости / ИПФ АН ССР, 1988 [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН] <http://www.iapras.ru/biblio/new/optus.pdf>

б) дополнительная литература:

1. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая оптика. Физмалит, 2003 – 1 экз. (<http://padaread.com/?book=39910>)

2. Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. М., 1999 – 2 экз.

3. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М., 2000. – 4 экз.

4. В.И. Беспалов, Г.А.Пасманик Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы. [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН] <http://www.iapras.ru/biblio/img/nell.pdf>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Специальные помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет";
- Лицензионное программное обеспечение (*Windows, Microsoft Office*);
- Обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются (при необходимости) электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Автор

_____ Е.А. Хазанов

ПРОГРАММА-МИНИМУМ
кандидатского экзамена по специальности

1.3.19. Лазерная физика
по физико-математическим наукам

Введение

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: электродинамика, теория поля, квантовая электроника, оптика и спектроскопия. Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии по физике при участии Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова и Института общей физики РАН.

1. Основы физики лазеров и лазерной техники

Уравнения Максвелла. Потенциальные и вихревые поля. Теорема Умова-Пойнтинга. Поляризация электромагнитных волн; параметры Стокса.

Уровни энергии атомов, молекул, кристаллов. Поглощение и испускание электромагнитного излучения. Вероятности спонтанных и индуцированных переходов.

Принцип действия лазеров. Методы создания инверсии населенностей. Релаксационные процессы. Ширина линии перехода. Коэффициент усиления. Эффект насыщения.

Оптические резонаторы. Спектр мод резонатора. Добротность резонатора. Устойчивые и неустойчивые резонаторы. Методы модуляции добротности резонатора лазера. Методы активной и пассивной синхронизации мод излучения в лазере.

Основные типы лазеров. Динамика лазерной генерации. Классификация режимов лазерной генерации. Порог генерации. *Мультистабильность и динамический хаос в лазерах.*

Флуктуации лазерного излучения. Естественная ширина линии и естественная расходимость лазерного излучения. Предельная пространственная когерентность лазерных пучков.

Стабилизация частоты генерации (активная и пассивная). Стабилизация интенсивности. Перестройка частоты лазерной генерации. Методы измерения длительности лазерных импульсов.

2. Вещество в лазерном поле. Лазерная диагностика

Отклик вещества на действие электромагнитного поля. Вектора поляризации и намагниченности среды. Разложение поляризации в ряд по степеням поля. Временная (частотная) и пространственная дисперсия. Тензоры линейной и нелинейной восприимчивостей вещества. *Влияние симметрии среды на нелинейный отклик. Механизмы поверхностного нелинейного отклика.*

Резонансные процессы. Двухуровневый атом. Уравнения Блоха. Когерентные нестационарные процессы: оптическая нутация, затухание свободной поляризации, солитоны самоиндуцированной прозрачности, фотонное эхо, сверхизлучение Дике. *Светоиндуцированный дрейф в газах.*

Многофотонные резонансные процессы. Обобщенная двухуровневая система. Многофотонное поглощение. Вынужденное комбинационное рассеяние. Генерация гармоник. Смещение частот. Параметрическое рассеяние.

Взаимодействие электромагнитного излучения с кристаллами. Зонная структура энергетических уровней. Энергия Ферми. Диэлектрики, полупроводники, металлы. Возбуждения в кристаллах: фононы, поляритоны, экситоны. Основные нелинейные кристаллы.

Спектроскопия насыщения неоднородно уширенных переходов. Двухфотонная спектроскопия, свободная от доплеровского уширения. Спектроскопия когерентного антистоксова рассеяния света. Спектроскопия многоволнового смещения.

2. Волновые процессы. Нелинейная волновая оптика.

Прикладная нелинейная оптика

Волновая оптика световых пучков и импульсов: уравнения Максвелла, волновое уравнение, уравнения квазиоптики, уравнения для медленно меняющихся амплитуд. Гауссовы пучки, их преобразование оптическими системами. Дифракционное расплывание, длина дифракции. Волны в световодах. Дифракция случайных волновых полей, теорема Ван Циттерта-Цернике.

Материальная дисперсия сплошной среды. Распространение импульсов в диспергирующих средах: групповая скорость, дисперсионное расплывание, эффекты дисперсии высших порядков. Спектрально ограниченный импульс.

Волны в пространственно- периодических средах. Запрещенная зона. Фотонные кристаллы и их дисперсионные свойства.

Фурье-оптика волновых пучков и импульсов; пространственная фильтрация. Основы адаптивной оптики: управление фазой световых колебаний в пространстве и во времени, формирование пучков и импульсов с заданной структурой.

Волны в слабонелинейных и диспергирующих средах: методы описания и классификация нелинейных эффектов.

Самовоздействие световых пучков. Природа кубической нелинейности. Самофокусировка в средах с керровской нелинейностью, критическая мощность, длина самофокусировки. Мелкомасштабная самофокусировка. Филаментация. *Пространственные оптические солитоны.*

Самовоздействие световых импульсов в средах с кубической нелинейностью: самомодуляция, солитоны, компрессия и расплывание. Самовоздействие случайно-модулированных импульсов. Формирование сверхкоротких импульсов методами фазовой самомодуляции и компрессии.

Генерация оптических гармоник. Фазовый синхронизм и его реализация, групповой синхронизм. Спонтанное параметрическое рассеяние света. Параметрическое усиление и генерация. Генерация суммарных и разностных частот. Вынужденное комбинационное рассеяние. Рамановские усилители и генераторы. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Обращение волнового фронта.

Оптические бистабильные и мультистабильные системы. *Оптические логические элементы. Продольная неустойчивость в нелинейных резонаторах: от периодических колебаний через удвоение периода к оптическому хаосу. Поперечные пространственные эффекты в нелинейных резонаторах, образование и эволюция пространственных структур. Оптическое моделирование нейронных сетей.*

4. Воздействие лазерного излучения на вещество. Лазерная фотофизика и фотобиология. Физические основы лазерных технологий

Одно- и многофотонная ионизация атомов и молекул. Туннельная и надбарьерная ионизация атомов и ионов. Пондеромоторное ускорение фотоэлектронов. Уширение спектра. Генерация высоких оптических гармоник и суперконтинуума. Генерация каскада комбинационных частот.

Лазерный пробой газов. Лазерная искра. Лазерная плазма. Лазерный термоядерный синтез. *Энергетические спектры электронов, ионов и рентгеновского излучения лазерной плазмы. Ядерные реакции в лазерной плазме.*

Многофотонная диссоциация молекул в лазерном поле. Столкновительный и бесстолкновительный режимы многофотонной диссоциации. Лазерное разделение изотопов. Оптическое стимулирование химических реакций.

Лазерное управление движением частиц. Оптическое охлаждение и захват атомов и ионов. *Атомные часы.* Управление атомными пучками с помощью лазеров. Лазерные методы ускорения частиц.

Поглощение и релаксация энергии лазерного излучения в полупроводниках и металлах. Электрон- электронная, электрон- фононная и фонон- фононная релаксация. Времена релаксации. Нормальный и аномальный скин эффект.

Лазерный нагрев вещества. Лазерное плавление и испарение поверхности. Лазерный отжиг и легирование полупроводников. Лазерная закалка металлов. Процессы абсорбции и десорбции в поле лазерного излучения. Лазерная фотохимия, типы фотохимических реакций. Фотоакустические явления. Механизмы лазерного возбуждения звука. Фотоакустическая спектроскопия и микроскопия.

Лазерная фотобиология. *Фотобиологические реакции: энергетические (фотосинтез), информационные (зрение), биосинтетические, деструктивно- модифицирующие (фотосенсибилизация, фотоионизация) и лазерные методы из изучения.* Лазерная микро- и макродиагностика биомолекул, клеток и биотканей. Лазерная оптико-акустическая томография.

5. Элементы квантовой оптики

Квантование поля. Операторы рождения и уничтожения фотонов. Гамильтониан квантованного поля. Коммутационные соотношения для операторов поля.

Пространственная и временная когерентность. Корреляционные функции первого и второго порядка. Когерентность высших порядков. Фоковское, когерентное и сжатое состояния поля. Пуассоновская, субпуассоновская и суперпуассоновская статистика фотонов. Группировка и антигруппировка фотонов. Счет фотонов. Дробовой шум. Связь статистики фотонов и фотоотсчетов, формула Мандела.

Перепутанные состояния света. Оптическая реализация кубитов и их преобразования. Состояния Белла. Парадокс Эйнштейна- Подольского- Розена. Неравенства Белла. Квантовая криптография. Квантовая телепортация.

Рекомендуемая основная литература

1. Н.В.Карлов. Лекции по квантовой электронике. М., 1988
2. И.Р.Шен. Принципы нелинейной оптики. М., 1989
3. О.Звелто. Принципы лазеров. М., 1989
4. Я.И.Ханин. Основы динамики лазеров. М., 1999
5. Л.Аллен, Дж.Эберли. Оптический резонанс и двухуровневые атомы. М., 1978
6. С.А.Ахманов, С.Ю.Никитин. Физическая оптика. М., 1998
7. М.Б.Виноградова, О.В.Руденко, А.П.Сухоруков. Теория волн. М., 1979

Дополнительная литература

1. Ю.А.Ильинский, Л.В.Келдыш. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. М., 1989
2. Д.Н.Клышко. Физические основы квантовой электроники. М., 1986
3. С.А.Ахманов, В.А.Выслоух, А.С.Чиркин. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М., 1988
4. Л.Мандель, Э.Вольф. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М. 2000
5. В.М.Акулин, Н.В.Карлов. Интенсивные резонансные взаимодействия в квантовой электронике. М., 1987
6. Дж.Гудмен. Введение в Фурье-оптику. М., 1970
7. Дж.Гиббс. Оптическая бистабильность. М., 1988
8. А.П.Сухоруков. Нелинейные волновые взаимодействия в оптике и радиофизике. М., 1988
9. В.С.Летохов, В.П.Чеботаев. Принципы нелинейной лазерной спектроскопии. М., 1990
10. А.В.Приезжев, В.В.Тучин, Л.П.Шубочкин. Лазерная диагностика в биологии и медицине». М., 1989
11. В.В.Тучин. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях». Саратов. 1998

12. В.П.Жарков, В.С.Летохов. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. М., 1984
13. А.В.Андреев, В.И.Емельянов, Ю.А.Ильинский. Кооперативные явления в оптике. М., 1988
14. В.Э.Гусев, А.А.Карабутов. Лазерная оптоакустика. М., 1991

Примечания. Для соискателей ученой степени кандидата физико-математических наук: разделы 1—5 программы.

Для соискателей ученой степени кандидата технических наук: разделы 1—4 программы, за исключением вопросов, *выделенных курсивом.*

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА
кандидатского экзамена по специальности

1.3.19. Лазерная физика

I. Матрица плотности и ее приложения

- Квантовый ансамбль. Чистые и смешанные состояния. Матрица плотности. Населенность и квантовая когерентность.
- Уравнение фон Неймана (квантовое уравнение Лиувилля). Динамическая и диссипативная системы, релаксация. Квантовое кинетическое уравнение. Феноменологический и квантовый подход к описанию релаксации. Связь между скоростью релаксации квантовой когерентности и скоростями релаксации населенностей.
- Взаимодействие излучения с веществом: двухуровневое приближение, приближение вращающейся волны, приближение медленно меняющихся амплитуд, адиабатическое исключение переменных.
- Когерентное взаимодействие: нутации, площадь под импульсом, $\pi/2$ - и π - импульсы. Фотонное эхо и самоиндуцированная прозрачность.

II. Динамика лазеров

- Одномодовый и многомодовый режимы генерации лазера. Причины возникновения многомодовых режимов генерации. Методы селекции мод.
- Балансные уравнения одномодового лазера. Стационарные состояния и релаксационные колебания.
- Фазочувствительное взаимодействие мод в многомодовых лазерах. Нестационарные процессы в твердотельном кольцевом лазере, спектр релаксационных колебаний при однонаправленной генерации.

III. Фемтосекундные лазеры и сверхсильные оптические поля

- Активные широкополосные среды. Компенсация материальной дисперсии. Методы синхронизации мод.
- Усиление фемтосекундных импульсов и способы получения сверхсильных оптических полей. Системы прямого усиления и метод усиления chirпованных импульсов (CPA-method). Параметрическое усиление chirпованных импульсов (OPCPA).
- Дисперсионные устройства для временного преобразования фемтосекундных импульсов (стретчер и компрессор). Точность восстановления фемтосекундных импульсов в CPA системах.
- Методы измерения параметров фемтосекундных импульсов. Сканирующий и одноимпульсный автокорреляторы. Спектральные измерители.

IV. Взаимодействие лазерного излучения с веществом

- Пробой газов лазерным излучением. Многофотонная и лавинная ионизация. Нагрев и испарение твердых тел лазерным излучением. "Тепловая" модель лазерного испарения.
- Особенности взаимодействия сверхсильных полей с веществом. Электрон и атом в сверхсильном поле. Ионизация атома. Формула Келдыша. Многофотонный и туннельный пределы. Надпороговая ионизация. Генерация высоких гармоник. Генерация аттосекундных импульсов. Стабилизация атома.

V. Волноводная оптика

- Многомодовые и одномодовые оптические волокна; изотропные и анизотропные волокна; волноводная и материальная дисперсия волоконных световодов; коэффициенты связи собственных мод.
- Особенности информационной емкости волоконных линий связи, волоконные датчики физических величин.

- Элементы интегральной оптики и их применение.

VI. Нелинейные волновые взаимодействия в квадратичных и кубичных средах

- Трехволновое взаимодействие световых волн в кристаллах: особенности распространения волн в анизотропных средах; типы синхронизма. Трехволновое взаимодействие в средах с периодической доменной структурой (quasi-phase-matching).
- Параметрическая генерация света: параметрическая диффузия при расстройке групповых скоростей; комбинированные пространственно-временные эффекты при усилении пучков и импульсов. Трехчастотные солитоны.
- Материалы для преобразования частоты лазерного излучения и электрооптические материалы: KDP, DKDP, α -LiIO₃, KTP, LiNbO₃, BBO, LBO. Основные свойства, способы получения.
- Вынужденное комбинационное рассеяние света: характеристика явления. Стационарный и нестационарный режимы рассеяния, пороговая мощность и пороговая энергия, попутное и обратное рассеяние, ширина линии рассеянного излучения. Параметрическая связь стоксовой и антистоксовой компонент при попутном рассеянии. Преобразование частоты и пространственной структуры световых пучков при вынужденном комбинационном рассеянии.
- Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна и вынужденное температурное рассеяние. Частотный сдвиг и ширина линии рассеяния при различных углах рассеяния. Пространственная структура рассеянного излучения.
- Обращение волнового фронта света при вынужденном бриллюэновском рассеянии и четырехволновом параметрическом смешении. Характеристика явления и основные методы реализации. Использование ОВФ в лазерной оптике.
- Нелинейно-оптические методы генерации когерентного терагерцового излучения.

VII. Оптика мутных сред

- Уравнение переноса излучения (УПИ)
- Диффузионное приближение УПИ, баллистические и диффузные фотоны, длина свободного пробега фотона.
- Оптическая когерентная и оптическая диффузионная томография биотканей.

VIII. Термооптика твердотельных лазеров

- Источники тепла в лазерах. Основные тепловые эффекты в лазерах: Термонаведенные напряжения и деформации, фотоупругий эффект, тепловая линза.
- Понятие о деполяризованном (в пространстве) излучении, степень деполяризации. Идеально поляризованное и идеально деполяризованное излучение.
- Параметры качества среды с точки зрения минимизации тепловых эффектов, термооптические постоянные. Лазерная керамика.
- Критерии оценки качества пучка: число Штреля, интеграл перекрытия, параметр M^2 .
- Импульсно-периодический режим работы лазера и его особенности.
- Методы подавления и компенсации тепловых эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Файн В. М. «Фотоны и нелинейные среды», М.: Советское радио, 1972.
2. Ахманов С.А., Вислоух В.А., Чиркин А.С. «Оптика фемтосекундных лазерных импульсов», М.: Наука, 1988.
3. Райзер Ю.П. «Лазерная искра и распространение разрядов», М.: Наука, 1974.
4. Федоров М.В. «Электрон в сильном световом поле», М.: Наука, 1991.
5. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. «Атом в сильном световом поле», М.: Энергоиздат, 1984.
6. Protopapas M., Keitel C.H., Knight P.L. Atomic Physics with Super-High Intensity Lasers. – Reports on Progress in Physics, 1997, v. 60, pp. 389–486.

7. Маркузе Д. «Оптические волноводы», М.: Мир, 1974.
8. Снайдер А., Лав Дж. «Теория оптических волноводов», М.: Радио и связь, 1987.
9. Шен И.Р. «Принципы нелинейной оптики», М.: Наука, 1989.
10. Periodically Poled Lithium Niobate and Quasi-Phase-Matched Optical Parametric Oscillators. – IEEE Journal of Quantum Electronics, v. 33, No. 10.
11. Сухоруков А.П. «Нелинейные волновые взаимодействия в оптике и радиофизике», М.: Наука, 1988.
12. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. «Прикладная нелинейная оптика», М.: Мир, 1976.
13. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. «Прикладная нелинейная оптика: генераторы второй гармоники и параметрические генератора света», М.: Радио и связь, 1982.
14. Дмитриев В.Г., Гурзядян Г.Г. и др. «Нелинейнооптические кристаллы», М., 1991.
15. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. «Обращение волнового фронта», М.: Наука, 1985.
16. Беспалов В. И., Пасманик Г.А. «Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы», М.: Наука, 1986.
17. Емелин М.Ю., Рябикин М.Ю. "Аттосекундные световые импульсы", в кн.:
18. "Нелинейные волны'2008" (отв. ред. А.В. Гапонов-Грехов, В.И. Некоркин), Н.Новгород: ИПФ РАН, 2009, с. 60-102.
19. Agostini P., DiMauro L.F. "The physics of attosecond light pulses", Rep. Prog. Phys., 2004, v. 67, pp. 813-855.
20. Блум К. «Теория матрицы плотности и ее приложения» М.: Мир, 1983.
21. Ханин Я.И. «Лекции по квантовой радиофизике», Н.Новгород, ИПФ РАН, 2005.
22. Крюков П.Г. «Фемтосекундные импульсы» М.: Физматлит, 2008.

