

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» \_\_\_\_\_ 2022 г.  
*апрель*

**Программа кандидатского экзамена по научной специальности**

**1.3.19. Лазерная физика**

---

Нижний Новгород  
2022

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. Фо-

тоакустические 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.Мандел, 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  $\pi$ - 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 односторонней 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 чирпованных импульсов (SPR method). Параметрическое усиление чирпованных импульсов (OPCPA).
  - Дисперсионные устройства для временного преобразования фемтосекундных импульсов (стретчер и компрессор). Точность восстановления фемтосекундных импульсов в SPR 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,  $\alpha$ -LiIO<sub>3</sub>, KTP, LiNbO<sub>3</sub>, 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 Манделъштама–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 смещении. 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 генераторы света», М.: Радио и связь, 1982.
14. Дмитриев В.Г., Гурздян 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., Рябкин 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.