

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)



УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

« 4 » января 2025 г.

**ПРОГРАММА
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ОПТИКА
по научной специальности
1.3.6 Оптика**

Санкт-Петербург

2025 г.

1. Общие сведения

В основу настоящей программы положены основные разделы оптики, касающиеся основных задач данной области и основ технологии и работы оптических приборов.

Кандидатский экзамен проводится в устной форме и состоит из 2-х вопросов по билету и презентации по теме диссертационного исследования о выполненной работе за период обучения в аспирантуре, в соответствии с индивидуальным планом работы.

2. Электромагнитная теория света

Спектр электромагнитных колебаний, излучение абсолютно черного тела. Уравнения Максвелла. Вектор Умова-Пойнтинга. Волновое уравнение. Плоские и сферические волны. Параболическое приближение. Фазовая и групповая скорости света. Поляризация света. Вектор Джонса. Параметры Стокса. Сфера Пуанкаре. Расчетные методы Джонса и Мюллера. Отражение и преломление света на границе раздела изотропных сред. Формулы Френеля. Полное внутреннее отражение. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Классическая теория дисперсии света. Распространение света в анизотропных и гиротропных средах. Эллипсоид Френеля. Оптические свойства одноосных и двуосных кристаллов. Двойное лучепреломление. Коническая рефракция. Электрооптические эффекты Керра и Погкельса. Оптическая активность. Эффект Фарадея. Оптика движущихся сред. Опыты Физо и Майкельсона. Преобразования Лоренца.

3. Геометрическая оптика

Геометрическая оптика и параксиальное приближение. Формирование оптического изображения. Основные законы геометрической оптики. Параксиальное приближение. Сферические зеркала и линзы. Построение изображения с помощью линзы. Аберрации оптической системы: астигматизм, дисторсия, кома, хроматические аберрации. Методы борьбы с аберрациями. Уравнение эйконала. Область применения лучевого приближения. Принцип Ферма. Образование каустик в оптических системах. Типы оптических приборов.

4. Интерференция и дифракция световых волн

Интерференция полностью- и частично-когерентного излучения. Комплексная степень когерентности. Двухлучевая и многолучевая интерференция. Спеклы и когерентное излучение. Когерентный шум. Сдвиговая и спекл-интерферометрия. Многослойные покрытия. Дифракция. Дифракционные интегралы Кирхгофа - Гюйгенса. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Влияние дифракции на разрешающую силу систем, образующих изображение. Синтетическая апертура как метод повышения пространственного разрешения. Дифракционная решетка. Основы векторной теории дифракции. Особенности дифракции некогерентного излучения. Пространственные частоты волнового фронта. Фурье преобразование. Дифракция на прямоугольном отверстии. Обратные задачи теории дифракции. Синтез оптических элементов. Киноформная оптика.

5. Теория излучения и взаимодействия световых волн с веществом

Классическая теория взаимодействия излучения с веществом. Резонансное приближение. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Оптический эффект Штарка. Фотонное эхо и самоиндуцированная прозрачность. Солитоны. Релаксационные процессы. Самосогласованные уравнения для поля, поляризации и разности заселенностей. Эффект насыщения. Фотоактивация флуорофоров. Фотообесцвечивание флуорофоров. Законы теплового излучения. Формула Планка. Вероятности спонтанных и вынужденных переходов. Коэффициенты Эйнштейна. Закон Бугера-Ламберта-Бэра. Механизмы уширения спектральных линий в газах и твердых телах. Фотоэффект. Квантование поля. Операторы рождения и уничтожения фотонов. Гамильтониан квантованного поля. Коммутационные соотношения для операторов поля. Однофотонные и многофотонные процессы. Электродипольные, магнитодипольные и квадрупольные радиационные переходы.

Нелинейные восприимчивости. Распространение волн в нелинейной среде. Метод медленно меняющихся амплитуд. Условие синхронизма. Генерация оптических гармоник. Параметрическое преобразование частоты. Самофокусировка света. Комбинационное рассеяние. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Четырехволновое смешивание. Обращение волнового фронта. Вещество в сверхсильном световом поле.

6. Статистическая оптика

Временная и пространственная когерентность световых полей; корреляционные функции первого и высших порядков. Спектральное представление. Теорема Винера-Хинчина. Интерферометрия интенсивностей. Опыт Брауна-Твисса. Квантовые свойства световых полей. Фоковское, когерентное и сжатое состояние поля. Распределение Бозе-Эйнштейна. Параметр вырождения поля. Статистика фотонов. Связь статистик фотонов и фотоотчетов, формула Мандела для распределения фотоотчетов. Дробовой шум. Статистические свойства лазерного излучения. Корреляционная спектроскопия. Эффекты группировки и антигруппировки фотонов. Перепутанные состояния света. Оптическая реализация кубитов и их преобразования. Состояния Белла. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена. Неравенства Белла. Распространение волн в случайно неоднородной среде. Корреляционные и структурные функции амплитуды и фазы. Рассеяние света в дисперсной среде; уравнение переноса, диффузионное приближение. Рассеяние света в биотканях, методы его уменьшения.

7. Спектроскопия

Спектры атомов. Систематика спектров многоэлектронных атомов.

Термы многоэлектронных атомов, четность волновой функции, правила отбора для дипольных радиационных переходов. Тонкая структура атомных линий. Сверхтонкая структура атомных линий. Атомы во внешнем электрическом поле: эффект Штарка. Атомы во внешнем магнитном поле: эффект Зеемана. Фотоэлектронная спектроскопия. Абсорбционная и флуоресцентная спектроскопия. Спектроскопия квантовых биений. Спектроскопия ридберговских атомов. Многофотонная ионизационная спектроскопия. Нелинейная лазерная спектроскопия насыщения. Субдоплеровская лазерная спектроскопия. Оптическая ориентация атомов. Спектроскопия пересечения уровней. Лазерное охлаждение. Конденсат Бозе-Эйнштейна.

Спектры молекул. Приближение Борна-Оппенгеймера. Колебательные спектры двухатомных молекул. Классификация нормальных колебаний многоатомных молекул по типам симметрии. Колебательные спектры многоатомных молекул. Резонанс Ферми. Вращательная структура колебательных полос молекул. Правила отбора во вращательных спектрах молекул. Интенсивности во вращательных спектрах. Комбинационное рассеяние в молекулах и КАРС. Правила отбора в спектрах комбинационного рассеяния. Классификация электронных состояний двухатомных молекул. Правила отбора в электронных спектрах двухатомных молекул. Колебательно-вращательная структура в электронных спектрах молекул. Принцип Франка-Кондона. Синглетные и триплетные состояния молекул, диаграмма Яблонского. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. Лазерно-индуцированная флуоресценция. Внутривибрационная спектроскопия. Фотоакустическая спектроскопия. Терагерцовая спектроскопия. Фемтосекундная лазерная спектроскопия. Фотодиссоциация и преддиссоциация молекул. Охлаждение атомов и молекул лазерным излучением. Конденсат Бозе-Эйнштейна.

Спектроскопия твердого тела. Переходы под действием света в идеальном кристалле. Поглощение в инфракрасной области спектра и взаимодействие света с фононной подсистемой. Запрещенная зона и область прозрачности в диэлектриках. Экситоны Ванье-Мотта и Френкеля. Область фундаментального поглощения. Переходы с основных уровней энергии. Спектроскопия дефектных состояний в кристаллах. Автолокализация экситонов и дырок в диэлектриках. Вторичные эффекты в кристаллах: люминесценция, фотоэмиссия,

дефектообразование под действием света. Классификация люминесценции по длительности свечения и способу ее возбуждения. Молекулярная и рекомбинационная люминесценция. Закон Стокса-Ломмеля. Правило зеркальной симметрии спектров поглощения и люминесценции. Рэлеевское рассеяние и комбинационное рассеяние в кристаллах. Закон Вавилова. Зонная модель люминесценции диэлектриков. Применение люминесценции кристаллов в науке, технике и медицине. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

8. Экспериментальная и прикладная оптика

Источники оптического излучения. Тепловые, газоразрядные и лазерные источники. Синхротронное излучение. Оптические материалы. Характеристики приемников излучения: спектральная и интегральная чувствительность, шумы, инерционность. Приборы с зарядовой связью (ПЗС) - линейки, матрицы.

Техника спектроскопии. Светофильтры, призменные и дифракционные спектральные приборы, интерферометры. Поляризационные устройства. Фурье-спектроскопия. Основные характеристики приборов: аппаратная функция, разрешение, светосила, дисперсия.

Поляризационные устройства и способы поляризации света: пленочный поляроид, кристаллические призменные поляризаторы, интерференционные поляризаторы и светоделители, фазовые пластинки, ромб Френеля. Эффект Поггеля и ячейка Поггеля. Эффект Фарадея. Закон Малюса.

Лазерная оптика. Запись и обработка оптической информации. Механизм записи и воспроизведения волновых полей с помощью двумерных и трехмерных голограмм. Цифровая голография, голографическая и томографическая микроскопия. Переходные и передаточные функции оптических систем обработки информации. Функция рассеяния точки. Использование методов Фурье-оптики для оптической фильтрации и распознавания образов. Коррекция и реконструкция изображений. Методы компьютерной оптики. Микроскопия. Разрешающая способность и увеличение микроскопа. Пространственное разрешение и числовая апертура. Темнопольная микроскопия. Микроскопия фазового контраста. Флуоресцентная микроскопия. Методы повышения пространственного разрешения во флуоресцентной микроскопии. Конфокальная флуоресцентная микроскопия. Волоконная оптика. Типы волоконных световодов. Моды оптических волокон. Направленные ответвители. Волоконные линии связи. Нелинейные эффекты в оптических волокнах.

Лазерные приборы квантовой электроники. Оптическая ориентация в газах и кристаллах. Квантовый магнитометр с оптической накачкой. Квантовый стандарт частоты на сверхтонких переходах в атомах. Лазерный стандарт частоты.

9. Оптика лазеров

Основные принципы работы лазеров, схемы накачки. Теория Лэмба, Лэмбовский провал. Эффекты затягивания частоты и выгорания дыр. Оптические резонаторы. Моды оптических резонаторов. Свойства лазерных пучков. Типы лазеров. Твердотельные лазеры. Лазеры на центрах окраски. Лазеры на растворах органических красителей. Газовые лазеры: лазеры на нейтральных атомах, ионные лазеры, молекулярные лазеры, лазеры на самоограниченных переходах. Эксимерные лазеры. Химические лазеры. Полупроводниковые лазеры. Лазеры на гетеропереходах. Лазеры на свободных электронах. Перестраиваемые лазеры. Режимы работы лазеров. Непрерывные и импульсный режимы. Модуляция добротности. Синхронизация мод. Генерация сверхкоротких импульсов. Принципы адаптивной оптики, коррекция волнового фронта лазерных пучков.

Вопросы для подготовки к кандидатскому экзамену:

1. Уравнения Максвелла. Вектор Умова-Пойнтинга. Фазовая и групповая скорости света. Плоские и сферические волны.
2. Спектральные приборы, разрешающая способность, светосила, дисперсия. Техника спектроскопии. Светофильтры, призмные и дифракционные спектральные приборы, интерферометры.
3. Поляризация света, виды поляризации. Параметры Стокса. Типы поляризационных устройств. Вектор Джонса. Сфера Пуанкаре
4. Разрешающая способность и увеличение микроскопа. Пространственное разрешение и числовая апертура. Темнопольная микроскопия. Микроскопия фазового контраста. Флуоресцентная микроскопия. Конфокальная флуоресцентная микроскопия.
5. Явления, происходящие на разделе двух сред: отражение, преломление, формулы Френеля, угол Брюстера, полное внутреннее отражение, уголкоый отражатель.
6. Принципы получения коротких лазерных импульсов. Метод модуляции добротности лазерного резонатора. Примеры применения.
7. Вероятности спонтанных и вынужденных радиационных переходов. Коэффициенты Эйнштейна. Закон Бугера-Ламберта-Бэра. Основные причины уширения спектральных линий.
8. Полупроводниковые лазеры. Лазеры на гетеропереходах. Основные области их применения.
9. Классическая теория взаимодействия излучения с веществом. Показатели преломления и поглощения вещества, комплексный показатель преломления. Методы измерения показателя преломления вещества. Дисперсия показателя преломления. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Нормальная и аномальная дисперсия.
10. Получение фемтосекундных лазерных импульсов. Метод синхронизации мод. Активная и пассивная синхронизация мод. Соотношение между длительностью и шириной спектра. Измерение длительности фемтосекундных импульсов: автокоррелятор.
11. Геометрическая оптика и параксиальное приближение. Формирование оптического изображения. Сферические зеркала и линзы. Построение изображения с помощью линзы. Аберрации оптической системы: астигматизм, дисторсия, кома, хроматические аберрации. Методы борьбы с аберрациями.
12. Волоконная оптика. Типы волоконных световодов. Моды оптических волокон. Направленные ответвители. Волоконные линии связи. Нелинейные эффекты в оптических волокнах.
13. Временная и пространственная когерентность световых полей. Квантовая природа света. Статистика фотонов. Статистические характеристики первого порядка световых волн. Опыт Брауна-Твисса. Распределение Бозе-Эйнштейна.
14. Детекторы оптического излучения для разных диапазонов длин волн и их характеристики: спектральная и интегральная чувствительность, инерционность, шумы. Фотодиоды, фотоэлектронные умножители, приборы с зарядовой связью, микроканальные фотодетекторы, фотопластинки.
15. Распространение волн в неоднородной среде. Рэлеевское рассеяние. Комбинационное (Рамановское) рассеяние. Классическое и квантовомеханическое описание. Правила отбора для комбинационного рассеяния. Применения комбинационного рассеяния.
16. Поляризационные устройства и способы поляризации света: пленочный поляроид, кристаллические призмные поляризаторы, интерференционные поляризаторы и светоделители, фазовые пластинки, ромб Френеля. Эффект Погкельса и ячейка Погкельса. Эффект Фарадея. Закон Малюса.
17. Термы многоэлектронных атомов, четность волновой функции, правила отбора для электрических и магнитных дипольных радиационных переходов.

18. Лазеры с оптической накачкой. Твердотельные лазеры. Лазеры на растворах органических красителей. Лазеры на центрах окраски. Принципы работы и возможность перестройки частоты.

19. Принцип Борна-Оппенгеймера. Классификация электронных состояний двухатомных молекул. Правила отбора в электронных спектрах двухатомных молекул. Колебательно-вращательная структура в электронных спектрах молекул. Принцип Франка-Кондона.

20. Принципы адаптивной оптики; коррекция волнового фронта лазерных пучков. Измерение качества лазерного пучка с использованием интерференционных методов. Пространственно временные модуляторы света на основе жидких кристаллов и матрицы микрзеркал.

21. Колебательные спектры двухатомных молекул. Вращательная структура колебательных полос молекул. Правила отбора во вращательных спектрах молекул.

22. Газовые лазеры: лазеры на нейтральных атомах, ионные лазеры, молекулярные лазеры, лазеры на самоограниченных переходах. Эксимерные лазеры. Принципы работы и области применения.

23. Синглетные и триплетные состояния многоатомных молекул, диаграмма Яблонского. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. Фотовозбуждение флуорофоров. Правило зеркальной симметрии спектров поглощения и люминесценции.

24. Лазерно-индуцированная флуоресценция. Внутривибрационная спектроскопия. Фотоакустическая спектроскопия.

25. Спектроскопия твердого тела. Переходы под действием света в идеальном кристалле. Запрещенная зона и область прозрачности в диэлектриках. Спектроскопия дефектных состояний в кристаллах.

26. Терагерцовая спектроскопия: источники и приемники излучения, области применения.

27. Интерференция и дифракция. Условие наблюдения интерференции. Принцип Гюйгенса-Френеля. Скалярная теория дифракции: дифракция Фраунгофера и Френеля, спектр пространственных частот волнового фронта и преобразование Фурье. Дифракционная решетка. Многослойные покрытия.

28. Многофотонная ионизационная спектроскопия. Нелинейная лазерная спектроскопия насыщения.

29. Основные принципы работы лазеров, схемы накачки. Теория Лэмба, Лэмбовский провал. Эффекты затягивания частоты и выгорания дыр. Оптические резонаторы. Моды оптических резонаторов.

30. Генерация второй гармоники. Тепловая и Керровская оптическая нелинейность. Условие фазового синхронизма. Параметрическое усиление.

31. Оптика движущихся сред. Опыты Физо и Майкельсона. Преобразования Лоренца.

32. Типы импульсных фемтосекундных лазеров. Фемтосекундная лазерная спектроскопия. Варианты использования и области применения.

33. Однофотонные и многофотонные процессы. Нелинейные восприимчивости. Генерация оптических гармоник. Параметрическое преобразование частоты.

34. Охлаждение атомов и молекул лазерным излучением. Конденсат Бозе-Энштейна.

35. Атомы и молекулы во внешнем магнитном поле: эффект Зеемана. Абсорбционная и флуоресцентная спектроскопия. Спектроскопия квантовых биений.

36. Эллипсоид Френеля. Оптические свойства одноосных и двуосных кристаллов. Двойное лучепреломление. Электрооптические эффекты Керра и Погкельса. Области применения.

37. Оптические резонаторы. Продольные и поперечные моды. Методы получения одномодового лазерного излучения. Пространственная и временная когерентность лазерного излучения.

38. Квантовый магнитометр с оптической накачкой. Принцип действия и области применения.

39. Электродипольные, магнитодипольные и квадрупольные радиационные переходы в атомах и молекулах. Области применения.

40. Запись и обработка оптической информации. Механизм записи и воспроизведения волновых полей с помощью двумерных и трехмерных голограмм. Цифровая голография, голографическая и томографическая микроскопия.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: "Наука", 1970.
2. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. М.: "Высшая школа", 1966.
3. Матвеев А.Н. Оптика. М.: "Высшая школа", 1985
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: "Наука", 1980.
5. Шерклиф У. Поляризованный свет. М.: "Мир", 1965.
6. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: "Наука", 1981.
7. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: "Мир", 1988.
8. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Физматлит, 2000.
9. Солимено С., Крозиньяни Б., Порто П. Дифракция и волноводное распространение оптического излучения. М.: "Мир", 1989.
10. Пантел Р., Путхоф Г. Основы квантовой электроники. М.: "Мир", 1972.
11. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. М.: "Наука", 1986.
12. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: "Наука", 1989.
13. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Физматгиз, 1962.
14. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Физматгиз, 1963.
15. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
16. Васильев А.Н., Михайлин В.В. Введение в спектроскопию твердого тела. М.: Издательство МГУ, 1987.
17. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения. (Молекулярная люминесценция). М.: Издательство МГУ, 1989.
18. Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. М.: "Высшая школа", 1971.
19. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. М.: Издательство МГУ, 1994.
20. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Оптические методы исследования молекулярных систем. Ч.1. Молекулярная спектроскопия. М.: Издательство МГУ, 1994.
21. Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение. Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1986.
22. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: "Мир", 1970.
23. Ярив А. Введение в оптическую электронику. М.: "Высшая школа", 1983.
24. Карлов Н.В.. Лекции по квантовой электронике. М., Наука, 1988
25. Корниенко Л.С., Наний О.Е. Физика лазеров. Ч.1, 2. М.: Издательство МГУ, 1996.
26. Мэйтленд А., Данн М. Введение в физику лазеров. М.: "Наука". 1978.
27. Ханин Я.И.. Основы динамики лазеров. М., 1999.
28. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: "Наука", 1990.
29. Парыгин В.Н., Балакший В.И. Оптическая обработка информации. М.: Издательство МГУ, 1987.

30. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: "Наука", 1985.
31. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1,2. М.: Мир, 1981.
32. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах, М.: Мир.
33. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Теоретическая физика. Т. III
Квантовая механика. Нерелятивистская теория., М. Наука, 1974
34. G. Herzberg, Molecular Spectra and Molecular Structure. I. Spectra of Diatomic Molecules, 2-nd ed., Krieger Publishing Company, 1989
35. G. Herzberg, Molecular Spectra and Molecular Structure. III. Electronic Spectra and Electronic Structure of Polyatomic Molecules, Krieger Publishing Company, 1988
36. W. Demtröder, Laser Spectroscopy, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1996.