

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

УТВЕРЖДАЮ



И.о. декана физического
факультета МГУ

/ В.В. Белокуров /

«21» марта 2024 г.

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

1.3.6 Оптика

Шифр и наименование области науки

1. Естественные науки

Наименование отраслей науки, по которым присуждаются ученые степени

Физико-математические науки

Москва 2024

I. Описание программы

Программа-минимум кандидатского экзамена, разработана Физическим факультетом Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова на основе паспорта научной специальности, утвержденного Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по специальности 1.3.6. Оптика, в отрасли физико-математических наук.

II. Основные разделы и вопросы к экзамену

Тема 1. Электромагнитная теория света

Уравнения Максвелла. Вектор Умова-Пойнтинга. Волновое уравнение. Плоские и сферические волны. Фазовая и групповая скорости света.

Поляризация света. Вектор Джонса. Параметры Стокса. Сфера Пуанкаре. Расчетные методы Джонса и Мюллера. Типы поляризационных устройств.

Отражение и преломление света на границе раздела изотропных сред. Формулы Френеля. Полное внутреннее отражение. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Отражение света от поверхности проводника. Глубина проникновения.

Распространение света в анизотропных и гиротропных средах. Волновые поверхности в кристаллах. Лучи и волновые нормали. Эллипсоид Френеля. Оптические свойства одноосных и двуосных кристаллов. Двойное лучепреломление. Коническая рефракция. Электрооптические эффекты Керра и Поккельса. Оптическая активность. Эффект Фарадея.

Оптика движущихся сред. Опыты Физо и Майкельсона. Преобразования Лоренца. Продольный и поперечный эффекты Допплера. Эффект Саньяка и его применение в гироскопии.

Фотонные кристаллы. Дисперсия электромагнитных волн в одно-, двух- и трехмерных фотонных кристаллах. Запрещенные зоны.

Поверхностные состояния. Поверхностные поляритоны. Взаимодействие света с наночастицами. Теория Ми.

Оптика многослойных покрытий. Рентгеновская оптика.

Волоконная и интегральная оптика. Моды волоконных, планарных и канальных волноводов. Фотонно-кристаллические волноводы.

Тема 2. Геометрическая оптика

Асимптотическое решение волнового уравнения. Геометро-оптическое приближение. Уравнение эйконала. Область применения лучевого приближения. Принцип Ферма. Гомоцентрические пучки.

Понятие оптического изображения. Параксиальное приближение. Преломление на сферической поверхности. Сферические зеркала и линзы. Образование каустик и винтовых дислокаций фазы в световых полях. Геометрические aberrации третьего и более высоких порядков. Хроматическая aberrация. Типы оптических приборов.

Тема 3. Интерференция и дифракция световых волн

Интерференция частичнокогерентного излучения. Комплексная степень когерентности. Теорема Ван-Циттерта-Цернике.

Двухлучевая и многолучевая интерференция. Сдвиговая и спекл-интерферометрия. Многослойные покрытия.

Дифракция. Дифракционные интегралы Кирхгофа-Гюйгенса. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Уравнение квазиоптики. Эффект Тальбо. Влияние дифракции на разрешающую силу систем, образующих изображение. Дифракционная решетка. ABCD -метод; комплексный параметр кривизны. Особенности дифракции некогерентного излучения. Основы векторной теории дифракции.

Особенности дифракции света на наноструктурированных объектах. Ближнепольная оптика

Обратные задачи теории дифракции. Синтез оптических элементов. Киноформная оптика.

Тема 4. Теория излучения и взаимодействия световых волн с веществом

Классическая теория взаимодействия излучения с веществом. Материальная дисперсия сплошной среды. Фазовая и групповая скорость. Резонансное приближение. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Двухуровневый атом. Уравнения Блоха. Самосогласованные уравнения для поля, поляризации и разности заселенностей. Когерентные нестационарные процессы: оптическая нутация, затухание свободной поляризации, солитоны самоиндуцированной прозрачности, фотонное эхо, сверхизлучение Дике, оптические нутации. Оптический эффект Штарка.

Законы теплового излучения. Формула Планка.

Фотоэффект. Внешний и внутренний фотоэффект

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

Однофотонные и многофотонные процессы. Вероятности спонтанных и вынужденных переходов. Коэффициенты Эйнштейна. Квадрупольные и магнито-дипольные переходы. Кооперативные эффекты. Сверхизлучение. Когерентное и комбинационное рассеяния.

Отклик вещества на действие электромагнитного поля. Нелинейные восприимчивости. Векторы поляризации и намагниченности среды. Разложение поляризации в ряд по степеням поля. Временная (частотная) и пространственная дисперсия. Тензоры линейной и нелинейной восприимчивостей вещества.

Распространение волн в нелинейной среде. Уравнения нелинейного распространения света в оптических волоконных световодах. Метод медленно меняющихся амплитуд. 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.

Самовоздействие световых пучков. Природа кубической нелинейности. Самофокусировка в средах с керровской нелинейностью. Уширение спектра. Генерация высоких оптических гармоник и суперконтинуума. Оптический

пробой газов и прозрачных диэлектриков. Вещество в сверхсильном световом поле. Фемтосекундная оптика.

Давление света. Метод лазерного пинцета.

Тема 4. Статистическая оптика

Временная и пространственная когерентность световых полей и; 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. Пуассоновская, субпуассоновская и суперпуассоновская статистика фотонов. Связь статистик фотонов и фотоотсчетов, формула Манделя для распределения фотоотсчетов. Дробовой шум.

Статистические свойства лазерного излучения.

Закон Кирхгофа и шумы квантовых усилителей света. Отношение сигнал-шум в оптическом сигнале. Шум-фактор оптического усилителя. Флуктуационно-диссипационная теорема.

Корреляционная спектроскопия. Эффекты группировки и антигруппировки фотонов.

Квантовая оптика. Неклассические состояния поля. Когерентные и сжатые состояния поля. Квантовые неразрушающие измерения. Квантовая криптография. Однофотонные излучатели.

Спонтанное параметрическое рассеяние света. Бифотоны. Перепутанные состояния света. Оптическая реализация кубитов и их преобразования. Состояния Белла. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена. Неравенства Белла.

Статистика частично поляризованного излучения. Поляризационная матрица.

Распространение волн в случайно неоднородной среде. Корреляционные и структурные функции амплитуды и фазы. Модели атмосферной турбулентности. Атмосферные линии связи.

Рассеяние света в дисперсной среде; уравнение переноса, диффузионное приближение. Диффузное отражение.

Рассеяние света в биоткани.

Тема 5. Спектроскопия

Спектры атомов. Систематика спектров многоэлектронных атомов. Типы связей электронов. Определение набора термов. Исходные термы. Мультиплетная структура. Правила отбора. Взаимодействие конфигураций.

Спектры молекул. Адиабатическое приближение. Группы симметрии молекул. Колебательные спектры. Классификация нормальных колебаний по типам симметрии. Вырождение. Резонанс Ферми. Правила отбора в колебательных спектрах поглощения и комбинационного рассеяния. Вращательная структура колебательных полос. Электронные спектры молекул. Классификация электронных состояний двухатомных молекул. Принцип Франка-Кондона. Типы связи электронного движения и вращения.

Спектроскопия твердого тела. Переходы под действием света в идеальном кристалле. Поглощение в инфракрасной области спектра и взаимодействие света с фононной подсистемой. Переходы в электронной подсистеме. Поглощение света в металлах. Запрещенная зона и область прозрачности в диэлектриках. Экситоны Ванье-Мотта и Френкеля. Область фундаментального поглощения. Переходы с остовных уровней. Эффекты Оже и Фано. Эффекты на краях остоного поглощения: EXAFS и XANES. Понятие о поляритонах. Спектроскопия дефектных состояний в кристаллах. Автолокализация экситонов и дырок в диэлектриках. Вторичные эффекты в кристаллах: люминесценция, фотоэмиссия, дефектообразование под действием света. Спектроскопия редкоземельных элементов. Перенос энергии электронных возбуждений. Люминофоры для белых светодиодов. Сцинтилляторы и оптические детекторы ионизирующего излучения. Люминесценция сильно возбужденных систем.

Люминесценция. Классификация люминесценции по длительности свечения и способу ее возбуждения. Молекулярная и рекомбинационная люминесценция. Закон Стокса-Ломмеля. Правило зеркальной симметрии спектров поглощения и люминесценции Левшина и универсальное соотношение между ними Степанова. Закон Вавилова. Триpletные состояния молекул и их роль в процессах деградации и миграции энергии электронного возбуждения. Схема Теренина-Льюиса. Тушение (температурное, концентрационное, посторонними веществами) люминесценции. Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. Люминесценция молекулярных кристаллов. Теория Давыдова. Кооперативные процессы в люминесценции.

Квантовые точки и спектры искусственных атомов. Квантовые ямы и светодиоды. Оптика гетероструктур, наноструктурированных объектов и композитных материалов.

Зонная модель люминесценции диэлектриков. Размножение электронных возбуждений в твердом теле. Термовысвечивание и инфракрасная стимуляция. Применение люминесцентных кристаллов в науке, технике и медицине.

Тема 6. Экспериментальная и прикладная оптика

Источники оптического излучения. Тепловые, газоразрядные и лазерные источники. Синхротронное излучение. Лазеры на свободных электронах. Оптические материалы. Основные нелинейные кристаллы.

Характеристики приемников излучения: спектральная и интегральная чувствительность, шумы, инерционность. Приборы с зарядовой связью (ПЗС) - линейки, матрицы. Лавинные фотодиоды и p-i-n - фотодиоды. Кремниевые фотоумножители (SiPM). Когерентные приемники, фазовая и поляризационная диверсификация. Солнечные батареи и их энергоэффективность.

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

Запись и обработка оптической информации. Механизм записи и воспроизведения волновых полей с помощью двумерных и трехмерных голограмм. Цифровые голограммы. Переходные и передаточные функции оптических систем обработки информации. Изопланарность. Применение

методов Фурье-оптики для оптической фильтрации и распознавания образов. Использование фрактальных представлений для обработки световых полей и совершенствования оптических устройств. Методы компьютерной оптики.

Волоконная оптика. Типы волоконных световодов. Моды оптических волокон. Затухание и дисперсия мод. Направленные ответвители. Волоконные линии связи. Нелинейные эффекты в оптических волокнах.

Интегральная оптика и фотоника. Интегрально-оптические компоненты волоконно-оптических систем связи.

Оптика метаматериалов. «Левые» среды. Фотонные кристаллы. Медленный свет, квазисинхронизм.

Тема 7. Оптика лазеров

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. Резонаторы волоконных лазеров. Микрорезонаторы: дисковые и сферические резонаторы с модами шепчущей галереи, интегрально-оптические микрорезонаторы.

Методы модуляции добротности резонатора лазера. Гауссовы пучки, их преобразование оптическими системами.

Режимы работы лазеров. Непрерывные и импульсный режимы. Пиковый режим. Модуляция добротности. Методы активной и пассивной синхронизации мод излучения в лазере. Генерация сверхкоротких импульсов. Условия развития динамического хаоса в лазерных системах.

Типы лазеров. Твердотельные лазеры. Газовые лазеры: лазеры на нейтральных атомах, ионные лазеры, молекулярные лазеры, лазеры на самоограниченных переходах. Химические лазеры. Полупроводниковые лазеры. Квантово-каскадные лазеры. Дисковые лазеры. Лазеры на центрах окраски и квантовых точках.

Основы адаптивной оптики: управление фазой световых колебаний в пространстве и во времени; коррекция волнового фронта лазерных пучков. Применение адаптивной оптики в лазерных системах.

III. Критерии оценивания

Критерии и показатели оценивания ответа на экзамене			
Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Фрагментарные знания в области оптики	Неполные знания в области оптики	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания в области оптики	Сформированные и систематические знания в области оптики

IV. Рекомендуемая основная литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. Ахманов С.А., Никитин С.Ю., Физическая оптика. Издательство Московского Университета, 2004.
3. М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. П. Сухоруков. Теория волн. М.: Наука, 1990.
4. R. Boyd, Nonlinear Optics. Academic Press:2002
5. О.Звелто. Принципы лазеров. С-П.:Лань.2008.
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. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. М.: Наука, 1986.
10. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: Наука, 1989.
11. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Физматгиз, 1962.
12. Васильев А. Н., Михайлин В. В. Введение в спектроскопию диэлектриков. Часть 1. — Издательство КДУ Москва, 2008. — 218 с.
13. Васильев А. Н., Михайлин В. В. Введение в спектроскопию диэлектриков, Часть II, Вторичные процессы. — Издательство КДУ Москва, 2010. — 240 с.
14. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения. (молекулярная люминесценция). М.: Изд-во МГУ, 1989.
15. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. М.: Изд-во МГУ, 1994.
16. Дифракционная нанофотоника. Под ред. Сойфера В.А. М.: Физматлит, 2011.
17. Новотный Л., Хехт Б. Основы нанофотоники. М.: Физматлит, 2008.
18. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Оптические методы исследования молекулярных систем. Ч.1: Молекулярная спектроскопия. М.: Изд-во МГУ, 1994.
19. Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение. Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1986.
20. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М., Наука, 1988.
21. Корниенко Л.С., Наний О.Е. Физика лазеров. Ч.1, 2. М.: Изд-во МГУ, 1996.
22. Ханин Я.И. Основы динамики лазеров. М., 1999.
23. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1990.
24. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985.
25. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1,2. М.: Мир, 1981.
26. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир.
27. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
28. Воронин В.Г., Наний О.Е.. Основы нелинейной волоконной оптики. М.: Изд-во МГУ, 2011.
29. Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM системы. М., Техносфера, 2017

30. Наний О.Е., Туркин А.Н. Оптические методы в информатике, М., Университетская книга, 2010.
31. Короленко П.В. Когерентная оптика. М.: Изд-во Юрайт, 2019.
32. Новотный Л., Хехт Б. Основы нанооптики. М.: Физматлит, 2009.
33. Скалли М. О., Зубайри М. С. Квантовая оптика. М.: Физматлит, 2003

V. Рекомендуемая дополнительная литература

1. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. М.: Высшая школа, 1966.
2. Шерклиф У. Поляризованный свет. М.: Мир, 1965.
3. Пантел Р., Путхоф Г. Основы квантовой электроники. М.: Мир, 1972.
4. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Физматгиз, 1963.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
6. Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. М.: Высшая школа, 1971.
7. Парыгин В.Н., Балакший В.И. Оптическая обработка информации. М.: Издательство МГУ, 1987.
8. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. М. "Постмаркет", 2000.