

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

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ,  
профессор, д.ф.-м.н.



/ В.В. Белокуров /

« 21 » марта 2024 г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

**Оптика**

*Optics*

Программа (программы) подготовки  
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
Оптика  
(103-01-00-136-фмн)

---

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

**Название дисциплины:** Оптика.

**Цель изучения дисциплины** – расширение и углубление знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области оптики.

2. Уровень высшего образования - подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность: 1.3.6 Оптика; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

5. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

*Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 54 часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (50 часов занятия лекционного типа, 4 часов мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 54 часа составляет самостоятельная работа учащегося.*

6. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

Необходимы знания высшей математики и общей физики в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов, полученных на предыдущих уровнях высшего образования.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе							
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам
<p><b>Тема 1. Электромагнитная теория света</b>  <i>(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.</i>  <i>Отражение и преломление света на границе раздела изотропных сред. Формулы Френеля. Полное внутреннее отражение. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Отражение света от поверхности проводника. Глубина проникновения.</i>  <i>Распространение света в анизотропных и гиротропных средах. Волновые поверхности в кристаллах. Лучи и волновые нормали. Эллипсоид Френеля. Оптические свойства одноосных и двуосных кристаллов. Двойное</i></p>	14	6				6	8		8

<p>лучепреломление. Коническая рефракция. Электрооптические эффекты Керра и Поггеля. Оптическая активность. Эффект Фарадея. Оптика движущихся сред. опыты Физо и Майкельсона. Преобразования Лоренца. Эффекты Доплера.)</p>										
<p><b>Тема 2. Геометрическая оптика</b> (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 в оптических системах. Геометрические aberrации третьего и более высоких порядков. Хроматическая aberrация. Типы оптических приборов.)</p>	8	4					4	4		4
<p><b>Тема 3. Интерференция и дифракция световых волн</b> (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. Эффект Тальбо. Влияние дифракции на разрешающую силу систем, образующих изображение. Дифракционная решетка. Параболическая теория дифракции, гауссовский пучок. Особенности дифракции некогерентного излучения. Основы векторной теории дифракции.)</p>	8	4					4	4		4

Обратные задачи теории дифракции.)										
<b>Тема 4. Теория излучения и взаимодействия световых волн с веществом</b> <i>(Классическая теория взаимодействия излучения с веществом. Резонансное приближение. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Оптические нутации. Оптический эффект Штарка. Фотонное эхо и самоиндуцированная прозрачность. Солитоны. Релаксационные процессы. Уравнение для матрицы плотности. Самосогласованные уравнения для поля, поляризации и разности заселенностей. Законы теплового излучения. Формула Планка. Фотоэффект. Квантование поля. Операторы рождения и уничтожения фотонов. Гамильтониан квантованного поля. Коммутационные соотношения для операторов поля. Однофотонные и многофотонные процессы. Коэффициенты Эйнштейна. Квадрупольные и магнито-дипольные переходы. Сверхизлучение. Когерентное и комбинационное рассеяния. Нелинейные восприимчивости. Распространение волн в нелинейной среде. Метод медленно меняющихся амплитуд. Условие синхронизма. Генерация оптических гармоник. Параметрическое преобразование частоты. Самофокусировка света. Вынужденное и комбинационное рассеяние. Четырехволновое взаимодействие. Обращение волнового фронта. Вещество в сверхсильном световом поле.)</i>	18	10					<b>10</b>	8		<b>8</b>
<b>Тема 5. Статистическая оптика</b> <i>(Временная и пространственная когерентность световых полей; корреляционные функции первого и высших</i>	14	6					<b>6</b>	8		<b>8</b>

<p>порядков. Теорема Винера-Хинчина.  Квантовые свойства световых полей.  Фоковское, когерентное и сжатое состояние поля.  Распределение Бозе-Эйнштейна.  Пуассоновская статистика фотонов. Связь статистик фотонов и фотоотсчетов, формула Мандела для распределения фотоотсчетов. Дробовой шум.  Статистические свойства лазерного излучения.  Закон Кирхгофа и шумы квантовых усилителей света. Флуктуационно-диссипационная теорема.  Корреляционная спектроскопия. Эффекты группировки и антигруппировки фотонов.  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.  Оптические модели атмосферной турбулентности.  Рассеяние света в биоткани.)</p>											
<p><b>Тема 6. Спектроскопия</b>  (Спектры атомов. Типы связей электронов. Термы. Мультиплетная структура. Правила отбора.  Спектры молекул. Адиабатическое приближение. Колебательные спектры. Правила отбора в молекулах. Вращательная структура колебательных полос. Электронные спектры молекул. Классификация электронных состояний</p>	16	8					8	8			8

<p>двухатомных молекул. Принцип Франка-Кондона. Типы связи электронного движения и вращения.</p> <p>Спектроскопия твердого тела. Переходы под действием света в идеальном кристалле. Фононная и электронная подсистема. Поглощение света в металлах. Запрещенная зона и область прозрачности в диэлектриках. Экситоны Ванье-Мотта и Френкеля.</p> <p>Понятие о поляритонах. Спектроскопия дефектных состояний в кристаллах.</p> <p>Люминесценция. 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.</p> <p>Тушение люминесценции.</p> <p>Применение люминесцентных кристаллов в науке, технике и медицине.)</p>											
<p><b>Тема 7. Экспериментальная и прикладная оптика</b></p> <p>(Источники оптического излучения. Тепловые, газоразрядные и лазерные источники. Синхротронное излучение. Оптические материалы.</p> <p>Характеристики приемников излучения. Приборы с зарядовой связью (ПЗС) - линейки, матрицы.</p> <p>Техника спектроскопии. Светофильтры, призмные и дифракционные спектральные приборы, интерферометры. Фурье-спектроскопия. Лазерная спектроскопия. Запись и обработка оптической информации. Механизм записи и воспроизведения волновых полей с помощью</p>	12	6					6	6			6

<p>двумерных и трехмерных голограмм. Использование методов Фурье-оптики для оптической фильтрации и распознавания образов. Волоконная оптика. Типы волоконных световодов. Моды оптических волокон. Затухание и дисперсия мод. Направленные ответвители. Волоконные линии связи. Нелинейные эффекты в оптических волокнах).</p>											
<p><b>Тема 8. Оптика лазеров</b> (Принцип работы лазера. Схемы накачки. Теория Лэмба. Эффекты затягивания частоты и выгорания дыр. Лэмбовский провал. Оптические резонаторы. Моды оптических резонаторов. Свойства лазерных пучков. Твердотельные лазеры. Газовые лазеры: лазеры на нейтральных атомах, ионные лазеры, молекулярные лазеры, лазеры на самоограниченных переходах. Химические лазеры. Полупроводниковые лазеры. Лазеры на центрах окраски. Режимы работы лазеров. Непрерывные и импульсный режимы. Пиковый режим. Модуляция добротности. Синхронизация мод. Генерация сверхкоротких импульсов. Принципы адаптивной оптики; коррекция волнового фронта лазерных пучков.).</p>	14	6					6	8		8	
<p>Промежуточная аттестация: допуск к кандидатскому экзамену</p>	4					4	4				
<p><b>Итого</b></p>	<b>108</b>	50				4	54	54			54

## 8. Образовательные технологии

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа аспирантов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы, презентации к лекционным занятиям.

10. Ресурсное обеспечение:

### **Основная литература:**

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1980.
4. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981.
5. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Физматлит, 2000.
6. Новотный Л., Хехт Б. Основы нанооптики. М.: Физматлит, 2011.
7. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. Монография. Пер. с англ - М.: Мир, 2006.
8. Акципетров О.А., Евтюхов К.Н., Баранова И.М. Нелинейная оптика кремния и кремниевых наноструктур. М.: Физматлит, 2012.

### **Дополнительная литература:**

1. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. М.: Наука, 1986.
2. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: Наука, 1989.
3. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Физматгиз, 1962.
4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
5. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения. (молекулярная люминесценция). М.: Изд-во МГУ, 1989.
6. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. М.: Изд-во МГУ, 1994.
7. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Оптические методы исследования молекулярных систем. Ч.1: Молекулярная спектроскопия. М.: Изд-во МГУ, 1994.
8. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
9. Ярив А. Введение в оптическую электронику. М.: Высшая школа, 1983.
10. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М., Наука, 1988.
11. Корниенко Л.С., Наний О.Е. Физика лазеров. Ч.1, 2. М.: Изд-во МГУ, 1996.
12. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1990.
13. Парыгин В.Н., Балакший В.И. Оптическая обработка информации. М.: Издательство МГУ, 1987.

14. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985.

11. Язык преподавания – русский

12. Преподаватели:

1. Д.ф.-м.н., профессор Салецкий Александр Михайлович, e-mail: sam@physics.msu.ru, 8-495-939-14-89;
2. Д.ф.-м.н., доцент Колмычек Ирина Алексеевна, e-mail: irisha@shg.ru, 8-495-939-36-69.

### **Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения**

#### **Образцы домашних заданий:**

1. В вакууме вдоль оси  $z$  установилась стоячая электромагнитная волна, магнитная составляющая которой  $H_x(z,t) = H_0 \cos(kz) \sin(\omega t)$ . Найти проекцию вектора Умова-Пойнтинга на ось  $z$ .
2. Дифракционная решетка имеет  $n = 2000$  штрихов на 1 см. Найти угловую дисперсию решетки  $D_\phi$  в спектре второго порядка для длины волны  $\lambda = 500$  нм.
3. При нормальном падении света на дифракционную решетку обнаружено, что две близкие линии в спектре (450 и 450,6 нм) оказываются разрешенными, начиная с третьего порядка спектра. В каком порядке будут разрешены линии 600 и 600,4 нм?
4. Кристаллическая пластинка с  $\Delta n = n_o - n_e = 0,005$ , вырезанная параллельно оптической оси, помещена между поляризатором и анализатором так, что ее оптическая ось составляет угол  $45^\circ$  с плоскостью пропускания поляризатора. Какой должна быть минимальная толщина пластинки  $d$  для того, чтобы при произвольном положении анализатора интенсивность прошедшего через систему света с длиной волны  $\lambda = 600$  нм оставалась неизменной?
5. Кристаллическая пластинка, вырезанная параллельно оптической оси, имеет толщину  $d = 0,75$  мм и служит пластинкой в четверть волны для длины волны  $\lambda = 600$  нм. Для каких еще длин волн в области видимого спектра она будет также пластинкой в четверть волны, если для всех длин волн видимого спектра разность показателей преломления необыкновенного и обыкновенного лучей  $\Delta n = n_e - n_o = 0,001$ ?
6. р-поляризованный свет с интенсивностью  $I_0$  падает из воздуха на поверхность воды ( $n=1,33$ ). Найти интенсивность отраженной волны, если угол падения  $60^\circ$ .
7. Нарисовать график зависимости коэффициента отражения (по интенсивности) для s-поляризованного света от угла падения, если луч падает из воды ( $n=1,33$ ) в воздух.
8. На кристалл с главными значениями диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_x=2$ ,  $\epsilon_y=4$ ,  $\epsilon_z=4$  падает плоская неполяризованная волна (угол падения  $30^\circ$ , плоскость падения  $xOy$ , оптическая ось кристалла лежит на границе раздела воздух\кристалл). С помощью построения Гюйгенса найдите направление вектора Умова-Пойнтинга обыкновенной волны.
9. Атом кислорода находится на терме  $^5P$ , принадлежащем электронной конфигурации  $2p^3 4p^1$ . В какие ниже лежащие термы каких конфигураций электромагнитные переходы разрешены? Сколько компонент имеет тонкая структура каждой из спектральных линий?
10. Эффективный потенциал взаимодействия ядер в двухатомной молекуле может быть аппроксимирован выражением

$$U(R) = D \left[ 1 - e^{-\alpha(R-R_0)} \right]^2$$
, где  $R_0$  - равновесное расстояние

между ядрами. Найти энергию нулевых колебаний молекулы, если массы атомов одинаковы и равны  $M$ .

**Вопросы для промежуточной аттестации – зачета:**

1. Рэлеевское рассеяние. Индикатриса рассеяния, зависимость интенсивности рассеянного света от длины волны.
2. Комбинационное (рамановское рассеяние). Физический механизм.
3. Магнитооптические эффекты Фарадея и Керра
4. Нелинейная поляризация. Генерация второй гармоники. Опыт Франкена.
5. Нелинейная поляризация. Генерация третьей гармоники.
6. Самовоздействие лазерного излучения, распространяющегося в среде с кубической нелинейностью.
7. Распространение света в анизотропных и гиротропных средах. Волновые поверхности в кристаллах. Лучи и волновые нормали. Эллипсоид Френеля. Оптические свойства одноосных и двуосных кристаллов.
8. Основы физики молекул. Ковалентный и ионный тип связи. Молекулярный ион водорода. Молекула водорода.
9. Классическая теория взаимодействия излучения с веществом. Резонансное приближение. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига. Оптические нутации. Оптический эффект Штарка. Фотонное эхо и самоиндуцированная прозрачность.
10. Квантовые свойства световых полей. Фоковское, когерентное и сжатое состояние поля.
11. Спонтанное параметрическое рассеяние света. Бифотоны. Перепутанные состояния света. Оптическая реализация кубитов и их преобразования.
12. Люминесценция. Классификация люминесценции по длительности свечения и способу ее возбуждения. Молекулярная и рекомбинационная люминесценция. Закон Стокса-Ломмеля.
13. Механизмы уширения спектральных линий лазерного излучения. Однородное и неоднородное уширение.
14. Режимы работы лазеров. Непрерывные и импульсный режимы. Генерация сверхкоротких импульсов.
15. Механизм записи и воспроизведения волновых полей с помощью двумерных и трехмерных голограмм. Цифровые голограммы.
16. Квантование поля. Операторы рождения и уничтожения фотонов. Гамильтониан квантованного поля. Коммутационные соотношения для операторов поля.
17. Оптический эффект Штарка. Фотонное эхо и самоиндуцированная прозрачность. Солитоны. Релаксационные процессы.
18. Понятие оптического изображения. Параксиальное приближение. Преломление на сферической поверхности.
19. Вектор Джонса. Параметры Стокса. Сфера Пуанкаре. Расчетные методы Джонса и Мюллера. Типы поляризационных устройств.
20. Оптика движущихся сред. Опыты Физо и Майкельсона. Преобразования Лоренца. Продольный и поперечный эффекты Допплера.

**Методические материалы  
для проведения процедур оценивания результатов обучения**

Зачет проходит по билетам, включающем 3 вопроса. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае если на

все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

### Шкала оценивания знаний, умений и навыков

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний основных законов оптики	В целом успешные, но не систематические знания основных законов оптики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных законов оптики	Успешные и систематические знания основных законов оптики
Умения	Отсутствие умения применять знания основных законов оптики для решения научных задач	В целом успешное, но не систематическое умение применять знания основных законов оптики для решения научных задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания основных законов оптики для решения научных задач	Успешное и систематическое умение применять знания основных законов оптики для решения научных задач
Навыки	Отсутствие/фрагментарное владение навыками решения научных задач в области оптики	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных задач в области оптики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач в области оптики	Успешное и систематическое владение навыками решения научных задач в области оптики