

УТВЕРЖДЕНО
Проректор по учебной работе
А.А. Воронов
12 января 2022 года

ПРОГРАММА

по дисциплине: Общая физика: оптика
по направлению подготовки: 03.03.01 «Прикладные математика и физика»
физтех-школа: для всех физтех-школ
кафедра: общей физики
курс: 2
семестр: 4

Трудоёмкость:

теор. курс: базовая часть – 4 зачет. ед.;

физ. практикум: базовая часть – 3 зачет. ед.;

лекции – 30 часов

практические (семинарские)

занятия – 30 часов

лабораторные занятия – 60 часов

Экзамен – 4 семестр

Диф. зачёт – 4 семестр

ВСЕГО АУДИТОРНЫХ ЧАСОВ – 120

Самостоятельная работа:

теор. курс – 90 часов

физ. практикум – 75 часов

Программу и задание составили:

к.ф.-м.н., проф. В.А. Петухов
к.ф.-м.н., доц. К.М. Крымский
к.ф.-м.н., доц. П.В. Попов
к.т.н., доц. В.А. Овчинкин
д.ф.м.н., проф. А.В. Гавриков
к.ф.-м.н., асс. К.Л. Клименок
к.ф.-м.н., доц. Ю.Н. Филатов

Программа принята на заседании кафедры
общей физики 2 декабря 2021 г.

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., профессор

А. В. Максимычев

ОПТИКА

1. Основы геометрической оптики. Принцип Ферма, законы преломления и отражения. Центрированные оптические системы. Тонкая линза. Фокусы и главные плоскости оптической системы. Оптические инструменты: телескоп, микроскоп. Понятие о геометрических aberrациях. Элементы фотометрии: яркость источника, освещённость изображения. Теорема о сохранении яркости в оптической системе.

Современные применения геометрической оптики в пределе коротких длин волн (рентгеновская микроскопия, проекционная рентгеновская литография, рентгеновская астрономия, микроанализ с пространственным разрешением).

2. Волновое уравнение. Монохроматические волны, комплексная амплитуда, уравнение Гельмгольца, плоские и сферические волны. Показатель преломления, фазовая скорость распространения. Поляризация света: линейная, круговая и эллиптическая. Естественный свет, степень поляризации. Формулы Френеля, угол Брюстера, полное внутреннее отражение. Поток энергии волны, импульс волны, давление света. Эффект Доплера.

3. Дисперсия показателя преломления, классическая теория дисперсии, нормальная и аномальная дисперсии. Показатель преломления плазмы. Комплексная диэлектрическая проницаемость и комплексный показатель преломления, связь мнимой части с поглощением света средой. Затухающие волны, закон Бугера. Групповая скорость. Уравнение движения волнового пакета в приближении геометрической оптики в неоднородных средах.

Различные диапазоны длин волн, их особенности. Радиоволны в ионосфере и дальняя радиосвязь. Понятие о метаматериалах.

4. Принцип суперпозиции и интерференция монохроматических волн. Видность полос, ширина полосы. Статистическая природа излучения квазимонохроматической волны. Временная когерентность. Функция временной когерентности, её связь со спектральной интенсивностью (теорема Винера–Хинчина) и с видностью интерференции. Ограничение на допустимую разность хода в двухлучевых интерференционных схемах, соотношение неопределённостей.

5. Интерференция при использовании протяжённых источников. Пространственная когерентность, радиус когерентности. Функция пространственной когерентности, её связь с распределением интенсивности излучения по источнику (теорема Ван Циттерта–Цернике). Ограничения на допустимые размеры источника и апертуру интерференции в двухлучевых схемах.

Лазеры как источники излучения с высокой временной и пространственной когерентностью.

6. Дифракция волн. Принцип Гюйгенса–Френеля. Дифракция на тонком экране. Граничные условия Кирхгофа. Волновой параметр. Дифракция Френеля. Задачи с осевой симметрией, зоны Френеля, спираль Френеля. Зонные

пластинки, линза. Использование зонных пластинок для фокусировки рентгеновского излучения. Дифракция на дополнительном экране, пятно Пуассона. Дифракция на системе дополнительных экранов, теорема Бабинэ. Дифракция на краю полубесконечного экрана, спираль Корню.

7. Дифракция Фраунгофера. Световое поле в зоне Фраунгофера как преобразование Фурье граничного поля. Дифракция Фраунгофера на щели, дифракционная расходимость. Дифракционный предел разрешения телескопа и микроскопа. Поле в фокальной плоскости линзы, поперечные и продольные размеры фокального пятна.

8. Спектральные приборы: призма, дифракционная решётка, интерферометр Фабри–Перо. Характеристики спектральных приборов: разрешающая способность, область дисперсии, угловая дисперсия.

Интерференция в тонких плёнках и многослойных структурах. Просветление оптики. Зеркала с высоким коэффициентом отражения. Искусственные многослойные структуры для отражения мягкого рентгеновского излучения. Радиотехнические аналоги дифракционных решеток.

9. Принципы фурье-оптики. Метод Рэлея решения задачи дифракции: волновое поле как суперпозиция плоских волн разных направлений (пространственное фурье-разложение), соотношение неопределённостей. Дифракция Френеля на периодических структурах (эффект саморепродукции). Теория Аббе формирования оптического изображения, принцип двойной дифракции. Апертура, полоса пропускания пространственных частот оптической системы, связь с разрешающей способностью. Разрешающая способность при когерентном и некогерентном освещении.

10. Принципы голографии. Голограмма Габора. Голограмма с наклонным опорным пучком. Разрешающая способность голограммы. Условие Брэгга–Вульфа. Объёмная голограмма, объёмная решётка в регистрирующей среде.

Представление о голографической микроскопии биообъектов и голографической интерферометрии.

11. Элементы кристаллооптики. Дихроизм, поляриды, закон Малюса. Двойное лучепреломление в одноосных кристаллах, разложение волны на обыкновенную и необыкновенную. Взаимная ориентация векторов k , E , D , B , направление вектора Пойнтинга, боковой снос световых пучков в кристаллах. Интерференционные явления в кристаллических пластинках. Понятие об искусственной анизотропии (наведённое двулучепреломление). Эффекты Фарадея, Керра и Поккельса и их применение.

12. Рассеяние света. Эффективное сечение рассеяния, диаграмма направленности, их зависимость от длины волны и от размера рассеивающих частиц. Рэлеевское рассеяние (рассеяние на флуктуациях плотности). Поляризация рассеянного света.

13. Нелинейные оптические явления. Нелинейная поляризация среды. Оценки интенсивности световой волны, при которых наблюдаются нелинейные эффекты. Генерация второй гармоники, фазовый синхронизм. Оптическое выпрямление. Симметрия среды и генерация второй гармоники. Самофокусировка, критическая мощность самофокусировки, мелкомасштабная самофокусировка.

Понятие о комбинационном рассеянии света и вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна.

14. Распространение электромагнитных волн в световодах. Градиентные световоды и световоды с резким изменением показателя преломления. Допустимая угловая апертура. Типы волн. Одномодовые и многомодовые световоды. Рэлеевское рассеяние как причина затухания световой волны в световодах. Применение для высокоскоростной связи. Область нулевой дисперсии. Ультракороткие импульсы.

Литература

Основная

1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Оптика. Т. IV. – М. : Физматлит, 2018.
2. *Кингсен А.С., Локишин Г.Р., Ольхов О.А.* Основы физики. Т. I, ч. III, гл. 6–11. – М. : Физматгиз, 2001.
3. *Кириченко Н.А.* Принципы оптики: учебное пособие. – М. : МФТИ, 2016
4. *Бутиков Е.И.* Оптика. – М. : Высшая школа, 1986.
5. *Ахманов С.А., Никитин С.Ю.* Физическая оптика. – Издательство МГУ, Наука, 2004.

Дополнительная

1. *Горелик Г.С.* Колебания и волны. – М. : Физматлит, 1959, 2007.
2. *Ландсберг Г.С.* Оптика. – М. : Физматлит, 2003.
3. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. – М. : Наука, 1973.
4. *Козел С.М., Листвин В.И., Локишин Г.Р.* Введение в когерентную оптику и голографию. – М. : МФТИ, 2000.
5. *Р. Кольер,* Оптическая голография. – М. : Мир, 1973.
6. *Крымский К.М.* Абберации центрированных оптических систем – теория и расчёт. — М. : МФТИ, 2015.
7. *Петухов В.А.* Оптические волокна: учебно-метод. пособие. – М. : МФТИ, 2019.

ЗАДАНИЕ ПО ФИЗИКЕ
для студентов 2-го курса
на весенний семестр 2021/2022 учебного года

Дата	№ сем	Тема семинарских занятий	Задачи		
			0	I	II
01.02–07.02	1	Принцип Ферма. Геометрическая оптика. Оптические инструменты.	1.4 01 02	1.7 1.15 1.29 1.41	1.22 1.25 1.45 T1 T2
08.02–14.02	2	Элементы фотометрии. Законы отражения, формулы Френеля. Поляризация. Поток энергии и давление света.	01 11.7 2.3	1.52 2.1 2.8 2.33	1.51 1.57 2.13 2.20 2.45
15.02–21.02	3	Дисперсия волн. Фазовая и групповая скорости.	10.5 ^(2,3,5) 01 10.2	10.67 10.75 10.77 10.35	10.21 10.44 T3 10.36
22.02–28.02	4	Интерференция монохроматических волн.	3.3 01 02	T4 3.18 3.14 3.32	3.16 3.11 3.20 3.35
01.03–07.03	5	Немонохроматический свет, временная когерентность. Пространственная когерентность.	01 4.2 5.3 02	4.10 4.11 5.14 5.20	4.9 5.13 5.23 5.30
08.03–14.03	6	Дифракция Френеля. Зонные пластинки.	01 02 6.1	6.15 6.20 6.59 6.43	6.16 6.31 6.50 6.64
15.03–21.03	7	Дифракция Фраунгофера. Разрешающая способность оптических инструментов.	7.5 01 02	7.16 7.48 7.54 7.83	7.10 7.53 7.59 7.33
22.03–28.03	8	Спектральные приборы.	8.2 01 02	8.39 8.19 8.61 8.78	8.37 8.47 T5 8.87

29.03–04.04	9	Контрольная работа (по группам)			
05.04–11.04	10	Сдача 1-го задания			
12.04–18.04	11	Дифракция на синусоидальных решётках. Элементы фурье-оптики.	⁰ 1 ⁰ 2 ⁰ 3	9.1 9.15 9.22 9.45	9.11 9.17 9.28 9.66
19.04–25.04	12	Голография.	⁰ 1 ⁰ 2 ⁰ 3	9.32 9.35 9.46 9.52	9.33 9.36 9.40 9.78
26.04–02.05	13	Поляризация света. Элементы кристаллооптики.	11.17 11.1 11.12	11.9 11.16 11.54 11.28	11.13 11.60 11.80 <i>11.121</i>
03.05–09.05	14	Рассеяние света. Элементы нелинейной оптики.	⁰ 1 ⁰ 2 ⁰ 3	<i>11.125</i> 11.89 <i>11.126</i> Т6	11.88 11.90 <i>11.128</i> Т7
10.05–22.05	15 16	Сдача 2-го задания.			

Примечание

Номера задач указаны по «Сборнику задач по общему курсу физики. Ч. 2. Электричество и магнетизм. Оптика / под ред. В.А. Овчинкина (**4-е** изд., испр. и доп.). – М.: Физматкнига, 2017». *Курсивом отмечены задачи, которые необходимо брать из нового издания.*

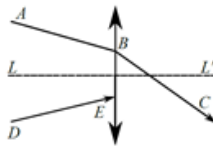
Все задачи обязательны для сдачи задания, их решения должны быть представлены преподавателю на проверку. В каждой теме семинара задачи разбиты на 3 группы:

- 0** — задачи, которые студент должен решать в течение недели для подготовки к семинару;
- I** — задачи, рекомендованные для разбора на семинаре (преподаватель может разбирать на семинарах и другие равноценные задачи по своему выбору);
- II** — задачи для самостоятельного решения.

Задачи группы 0

Семинар 1

01. На рис. показаны положение главной оптической оси тонкой линзы LL' и ход проходящего сквозь нее луча ABC . Найдите построением ход произвольного луча DE за линзой.



02. Положительной линзой с фокусным расстоянием F создается изображение объекта на экране. Какому условию должно удовлетворять расстояние от объекта до экрана, чтобы это было возможно?

Семинар 2

01. Выразить интенсивность плоской электромагнитной волны, распространяющейся в немагнитной среде с показателем преломления n , через амплитуду вектора напряженности электрического поля волны E_0 .

Семинар 3

01. Концентрация электронов в нижних слоях ионосферы равна $N \sim 1,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$. Какие электромагнитные волны будут испытывать отражение при вертикальном радиозондировании ионосферы?

Ответ: $\nu < 10 \text{ МГц}$ ($\lambda > 30 \text{ м}$).

Семинар 4

01. На экран падают две плоские волны с равными амплитудами A под малыми углами $\varphi_{1,2} = \pm 0,01$ рад. Длина волны $\lambda = 500 \text{ нм}$, нормаль к экрану и волновые векторы волн лежат в одной плоскости, см на экр. Определите ширину интерференционных полос (см. рис.).



Ответ: 25 мкм .

02. На тонкую пленку с показателем преломления n падает пучок белого света под углом θ к нормали. При какой минимальной толщине $b_{\text{мин}}$ и в какой цвет будет окрашена пленка в отраженном свете?

Семинар 5

01. В двухлучевом интерференционном опыте используется источник света с длиной волны $\lambda = 500 \text{ нм}$ и шириной спектра $\Delta\lambda = 10 \text{ нм}$. Оцените максимально допустимую разность хода лучей Δ_{max} и максимальное число интерференционных полос m_{max} , которые можно наблюдать в этом опыте.

Ответ: $\Delta_{\text{max}} \sim 25 \text{ мкм}$, $m_{\text{max}} \sim 100$.

02. Найдите апертуру интерференции в опыте с бипризмой с преломляющим углом α и показателем преломления n , если источник и плоскость наблюдения расположены на одинаковых расстояниях от бипризмы.

Семинар 6

01. Щель ширины $b = 1$ мм освещается параллельным пучком света с длиной волны $\lambda = 500$ нм. Оцените, на каком расстоянии L от щели необходимо разместить экран, чтобы наблюдать на нём дифракцию Френеля.

Ответ: $L \sim 1$ м.

02. На ирисовую диафрагму с переменным радиусом отверстия, расположенную на расстоянии L от экрана, падает свет с длиной волны λ . Диафрагму постепенно открывают, начиная с $R \approx 0$. При каком радиусе R интенсивность света в центре экрана впервые обратится в ноль?

Семинар 7

01. Через маленькое круглое отверстие проходит монохроматический параллельный пучок света и создает на удаленном экране дифракционную картину Фраунгофера. Во сколько раз изменится освещённость в центре экрана, если увеличить диаметр отверстия вдвое?

Ответ: увеличится в 16 раз.

02. Плоская световая волна дифрагирует на щели с шириной $b = 10\lambda$, где λ — длина волны. Оценить отношение интенсивностей нулевого и первого дифракционных максимумов.

Ответ: $I_1/I_0 \approx 0,05$.

Семинар 8

01. На дифракционную решетку, имеющую период $d = 10$ мкм, нормально падает свет от желтого дублета натрия ($\lambda_1 = 5890 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 5896 \text{ \AA}$). Оцените угловое расстояние между максимумами $\delta\varphi$ во втором порядке ($m = 2$).

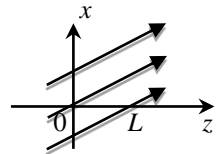
Ответ: $\delta\varphi \approx 1,2 \cdot 10^{-4}$ рад.

02. Дифракционная решётка с периодом d имеет размер $D = 10^3 d$ в направлении, перпендикулярном штрихам. Ширина прозрачных штрихов решётки равна половине периода. Определите максимальную разрешающую способность решётки в спектрах 1-го и 2-го порядков.

Ответ: $R_1 = 10^3$, $R_2 = 0$.

Семинар 11

01. Плоская волна с длиной волны λ распространяется в плоскости xz под углом α к оси z . Запишите распределение комплексной амплитуды волны и интенсивности в плоскости $z = 0$. Найти разность фаз между колебаниями в точках $z = 0$ и $z = L$, лежащих на оси z (см. рис.).



02. Решётка освещается нормально падающей плоской монохроматической волной с амплитудой A . Укажите пространственные частоты и амплитуды

плоских волн за дифракционной решёткой, прозрачность которой $\tau(x) = \cos^2(\Omega x)$.

03. Оцените ширину пространственного спектра плоских волн Δk_x при дифракции плоской монохроматической волны на щели шириной b .

Семинар 12

01. Точечный источник с длиной волны λ расположен в начале координат. Пользуясь параболическим приближением, найти распределение комплексной амплитуды и интенсивности в плоскости $x = L$.

02. Голограмму точечного источника, находящегося на расстоянии L от фотопластины, записали по схеме Габора на длине волны λ . Где будут находиться мнимое и действительное изображения, если восстановление голограммы производить светом с длиной волны 2λ ?

03. Почему при получении голографических изображений объёмных объектов практический интерес представляют только мнимые изображения? Поясните ответ с помощью схематического рисунка.

Семинар 14

01. Убывание интенсивности пучка света при рассеянии аналогично убыванию плотности потока направленного пучка частиц, движущегося в газе. Оцените «длину свободного пробега» света в воздухе для $\lambda = 400$ нм (фиолетовый свет). Показатель преломления воздуха $n \approx 1 + 3 \cdot 10^{-4}$.

Ответ: $l \sim 16$ км.

02. Лазерный пучок проходит сквозь слабопоглощающую жидкость (интенсивность пучка максимальна на его оси). Каков знак возникающей в жидкости линзы?

03. Молекулы некоторой жидкости имеют разную поляризуемость по разным осям. Как будут ориентироваться молекулы в поле световой волны: максимальной поляризуемостью по направлению \vec{E} или перпендикулярно \vec{E} ? Ответ обосновать.

Текстовые задачи

Т1. а) У некоторого близорукого человека дальняя граница области, в которой он видит предметы резко, находится на расстоянии L_d от глаза. Очки какой оптической силы D ему следует носить, чтобы эта граница переместилась в бесконечность? Провести расчет для $L_d = 0,5$ м.

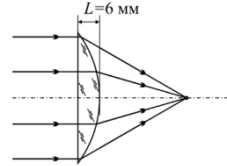
б) У некоторого дальнозоркого человека ближняя граница области, в которой он видит предметы резко, находится на расстоянии L_b от глаза. Очки какой

оптической силы ему следует надеть, чтобы эта граница переместилась в «положение наилучшего зрения» $L_0 = 25$ см. Провести расчет для $L_b = 1$ м.

Ответ: а) $D = -2$ дптр, б) $D = +3$ дптр.

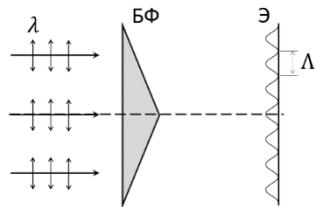
T2. Найти тип идеальной формы поверхности плоско-выпуклой линзы для фокусировки параллельного пучка в точку (сфера, гипербола, парабола или др). Линза расположена плоской поверхностью к плоскому волновому фронту.

T3. (2019) Параллельный пучок излучения длиной 100 фс и средней длиной волны $\lambda = 500$ нм фокусируется положительной линзой толщиной $L = 6$ мм в центре и близкой к нулю на краях. Пучок заполняет всю линзу. Показатель преломления материала линзы $n = 1,7$, групповая скорость в стекле $v_{гр} = 0,55c$. Оцените длительность импульса в фокусе линзы. Указание: воспользуйтесь таутохронизмом линзы.



Ответ: $\tau \approx 2,4$ пс.

T4. (2019) Падающая на бипризму Френеля БФ плоская монохроматическая линейно поляризованная волна создает на плоском экране Э интерференционную картину с шириной полосы Λ . Плоскость падения перпендикулярна плоскости экрана. Поле E волны колеблется параллельно плоскости падения. Длина волны λ . Определите видность V интерференционной картины.

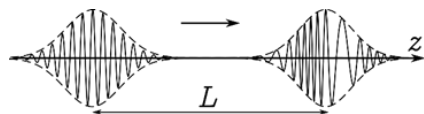


Ответ: $V = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$.

T5. Спектральная линия H_α атомарного водорода ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$) имеет тонкую структуру в виде двух «сублиний» в интервале длин волн $\delta\lambda \approx 0,16 \text{ \AA}$. Какой должна быть минимальная база интерферометра Фабри-Перо L с коэффициентом отражения зеркала по интенсивности $\rho = 0,9$, чтобы с его помощью можно было обнаружить тонкую структуру линии? Определите также для такого интерферометра: дисперсионную область $\Delta\lambda$, направление на ближайший к центру максимум θ_1 и угловую дисперсию $d\theta/d\lambda$ вблизи него. В центре картины – светлое пятно.

Ответ: $L = 0,4$ мм, $\Delta\lambda = 5 \text{ \AA}$, $\theta_1 = 2,3^\circ$, $D = 4 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$.

T6. (2021) Нелинейный эффект «фазовая самомодуляция» обусловлен уменьшением фазовой скорости в окрестности пика интенсивности светового импульса, из-за чего частота сигнала уменьшается на переднем



фронте импульса и увеличивается за ним (см. рис.). Оцените спектральную ширину $\Delta\nu$ импульса длительностью $\tau_0 = 10$ пс после прохождения $L = 50$ м кварцевого оптоволокна, если пиковая интенсивность составляет $J_0 = 2$ ГВт/см². Длина волны света $\lambda = 1$ мкм (в вакууме). Показатель преломления кварца имеет вид $n = n_0 + n_2 J$, где $n_2 = 1,6 \cdot 10^{-16}$ см²/Вт. Считать, что огибающая импульса имеет форму симметричного «колокола», а начальная спектральная ширина минимальна (*спектрально ограниченный импульс*). Дисперсией и изменением формы огибающей пренебречь.

Ответ: $\Delta\nu \sim \frac{4Ln_2J}{\lambda\tau} \approx 6 \cdot 10^{12}$ Гц

Т7. Найти коэффициент пропускания атмосферой солнечного излучения во время восхода. Сделать расчет для красного ($\lambda = 700$ нм) и фиолетового ($\lambda = 400$ нм) цветов. Атмосферу считать изотермической, потери, не связанные с рэлеевским рассеянием (пыль, облака), не учитывать. Показатель преломления атмосферы вблизи поверхности Земли равен $n = 1 + 3 \cdot 10^{-4}$.

Ответ: для $\lambda = 400$ нм $I_{\text{пр}}/I_0 = 5,3 \cdot 10^{-6}$, для $\lambda = 700$ нм $I_{\text{пр}}/I_0 = 0,27$.