

Белорусский государственный педагогический университет
имени Максима Танка

Кафедра общей и теоретической физики

Бондарь В. А., Соболев В. Р.

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Оптика

Учебно-методический комплекс

Минск 2019

СОДЕРЖАНИЕ

1. Типовая программа по курсу «Общая физика», раздел «Оптика».....	4
1.1. Пояснительная записка	7
1.2. Содержание учебного материала	10
2. Информационно-методическая часть	11
2.1. Учебно-методическая литература	11
2.2. Перечень лекционных демонстраций	13
3. Учебно-методическая карта	15
4. Учебный модуль № 1 «Фотометрия. Геометрическая оптика»	24
5. Учебный блок «Фотометрия»	24
5.1. Основные понятия и законы	24
5.2. Вопросы для самоконтроля	25
5.3. Методические указания к практическим занятиям	25
5.4. Примеры решения задач	26
5.5. Задачи для самостоятельного решения	30
6. Учебный блок «Геометрическая оптика»	31
6.1. Основные понятия и законы	31
6.2. Вопросы для самоконтроля	33
6.3. Методические указания к практическим занятиям	34
6.4. Примеры решения задач	37
6.5. Задачи для самостоятельного решения	45
7. Контрольный тест по учебному модулю № 1 «Фотометрия. Геометрическая оптика»	50
8. Учебный модуль № 2 «Волновая оптика»	57
9. Учебный блок «Интерференция света»	57
9.1. Основные понятия и законы	57
9.2. Вопросы для самоконтроля	58
9.3. Методические указания к практическим занятиям	58
9.4. Примеры решения задач	59
9.5. Задачи для самостоятельного решения	64
10. Учебный блок «Дифракция света»	67
10.1. Основные понятия и законы	67
10.2. Вопросы для самоконтроля	68
10.3. Методические указания к практическим занятиям	69
10.4. Примеры решения задач	69
10.5. Задачи для самостоятельного решения	73
11. Учебный блок «Поляризация света»	74
11.1. Основные понятия и законы	74
11.2. Вопросы для самоконтроля	76
11.3. Методические указания к практическим занятиям	77
11.4. Примеры решения задач	77
11.5. Задачи для самостоятельного решения	79

12. Учебный блок «Дисперсия света. Поглощение света»	81
12.1. Основные понятия и законы	81
12.2. Вопросы для самоконтроля	82
12.3. Методические указания к практическим занятиям	82
12.4. Примеры решения задач	83
12.5. Задачи для самостоятельного решения	86
13. Учебный блок «Оптика движущихся источников»	88
13.1. Основные понятия и законы	88
13.2. Вопросы для самоконтроля	89
13.3. Методические указания к практическим занятиям	89
13.4. Примеры решения задач	90
13.5. Задачи для самостоятельного решения	92
14. Контрольный тест по учебному блоку № 2 «Волновая оптика»	93
15. Экзаменационные вопросы	100

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ИНСТИТУТ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ»

УТВЕРЖДАЮ

**Первый заместитель Министра
образования Республики Беларусь**

_____ **А.И. Жук**

_____ / тип.
Регистрационный № ТД - ____ / тип.

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Учебная программа для высших учебных заведений

СОГЛАСОВАНО

Председатель научно-методического совета по физико-математическому образованию УМО вузов Республики Беларусь по педагогическому образованию

_____ В.М. Зеленкевич

_____ 2008

Начальник управления высшего и среднего специального образования Министерства образования Республики Беларусь

_____ Ю.И. Миксюк

_____ 2008

Ректор Государственного учреждения образования «Республиканский институт высшей школы»

_____ М.И. Демчук

_____ 2008

Эксперт

_____ 2008

МИНСК

2008

1. ОБЩАЯ ФИЗИКА

РАЗДЕЛ «Оптика»

Учебная программа для специальностей:

1 - 02 05 04 – 01 Физика. Математика;

1 - 02 05 04 – 02 Физика. Информатика;

1 - 02 05 04 – 04 Физика. Техническое творчество

Факультет	<u>Физический</u>
Кафедра	<u>общей и теоретической физики</u>
Курс	<u>3</u>
Семестр	<u>5</u>

Лекции	<u>46 часа (16 часов УСРС)</u>	Экзамен	<u>5-ый семестр</u>
Практические занятия	<u>40 часа (8 часов УСРС)</u>	Зачет	<u>5-ый семестр</u>
Лабораторные занятия	<u>42 часа (2 часа УСРС)</u>	Контрольные работы	2 (5-ый семестр)
Всего аудиторных часов по дисциплине	<u>128 часов</u>	Курсовой проект (работа)	-
Всего часов по дисциплине	<u>274 часа</u>	Форма получения высшего образования	<u>Очная</u>
Составил: В.А. Бондарь, канд. физ.-мат. наук, профессор			

2009 г.

Учебная программа составлена на основе типовой учебной программы «Общая физика», утвержденной 24.09.08, регистрационный № ТД – А.026/тип.

Рассмотрена и рекомендована к утверждению в качестве рабочего варианта на заседании кафедры общей и теоретической физики " " _____ 2009 г.; протокол № .

1.1 ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Курс общей физики в педагогических ВУЗах является профильным в специальной подготовке учителей физики для учреждений, обеспечивающих получение среднего образования. В этом курсе органично сочетаются вопросы классической и современной физики, в него включены основные данные о наиболее важных физических явлениях и понятиях, законах и принципах, указаны границы применимости тех или иных физических законов, моделей, теорий. При изучении курса общей физики, должно быть уделено достаточно внимания изучению физических процессов, протекающих в окружающей среде, в природе. Общие для всего курса физики цели являются основополагающими и для раздела “Оптика”.

Оптика изучает физические явления, связанные с распространением и взаимодействием с веществом коротких электромагнитных волн, длина которых лежит в интервале $10^{-4} - 10^{-9}$ м (оптическом интервале). При изучении курса необходимо показать, что этот раздел представляет собой существенную часть фундамента современной физики: оптические явления сопровождают целый ряд наблюдающихся в природе физических процессов, при этом именно, исходя из оптических свойств можно глубоко и детально объяснить многие физические явления. Именно в соответствии с основными законами взаимодействия частиц и законами их движения, которые в микромире имеют квантовый характер, определяется структура всех веществ, протекают физические и химические процессы. Большое значение оптической области электромагнитных волн для практической деятельности человека обусловлено прежде всего тем, что внутри нее лежит участок видимого света, непосредственно воспринимаемого человеческим глазом. Кроме того, в понятие оптического диапазона включают обычно еще инфракрасное и ультрафиолетовое излучения.

Электромагнитные волны различных диапазонов получили разные названия и обнаруживают себя в совершенно несхожих физических явлениях. Но не следует забывать об общих свойствах электромагнитных волн: все упоминавшиеся виды излучения имеют единую природу и отличаются друг от друга только своими частотами и характерными длинами волн. Распространение всех видов излучения в вакууме подчиняется одним и тем же закономерностям.

Наиболее важные способы регистрации электромагнитных волн оптического диапазона основаны на измерении переносимого волной потока энергии. Для этой цели используются фотоэлектрические и фотохимические явления, фотолюминесценция и термоэлектрические явления.

Волновые и корпускулярные свойства света не могут быть одновременно логически непротиворечиво объяснены классической физикой, ибо в ней понятия волны и частицы являются взаимоисключающими. В современной квантовой теории, построенной на основе относительности к средствам наблюдения, преодолеваются логические трудности, связанные с

корпускулярно-волновым дуализмом. Свет обладает потенциальной возможностью проявить и волновые и корпускулярные свойства, но в чистом виде они могут проявиться лишь в разных опытах, проводимых при взаимоисключающих условиях. Эти свойства дополняют друг друга, ибо только их совокупность дает полное представление о свете.

Изучение раздела «Оптика» включает в себя изучение следующих подразделов: фотометрия, геометрическая оптика, волновая оптика и релятивистские эффекты в оптике. Учитывая экспериментальный характер изучаемого курса, необходимо, чтобы основные понятия и принципы устанавливались путем обобщения опытных данных и фактов и подтверждались путем подготовки соответствующего эксперимента. Поэтому лекционный курс сопровождается хорошо подготовленными лекционными демонстрациями, а лабораторный практикум – целым рядом поставленных лабораторных работ.

Большое внимание при изучении данного раздела должно быть уделено техническому и практическому использованию изучаемых явлений, законов, оптических свойств веществ, современным достижениям науки и техники и их значимости в решении практических задач.

Одной из важнейших особенностей изучаемого курса общей физики и, в частности, рассматриваемого раздела, является его профессиональная направленность, его сочетание с соответствующими разделами школьного курса физики. С учетом этого необходимо, чтобы методика проведения всех видов занятий (лекций, практических занятий и лабораторных работ) учитывала требования, предъявляемые к подготовке будущего учителя физики.

Задачи изучения раздела “Оптика” курса общей физики определяются совокупностью требований к знаниям и умениям специалиста, которые сформулированы в образовательном стандарте 1–02 05 04 “Физика. Дополнительная специальность”, типовой учебной программе по общей физике.

В соответствии со сказанным выше после изучения раздела “Оптика” курса общей физики студент **должен знать**:

- логическую структуру раздела, место каждой темы и связь между ними;
- основные математические методы, применяемые при рассмотрении тем, вопросов данного раздела;
- основные положения каждой темы раздела и их обоснование;
- опытное обоснование изучаемых вопросов;
- достижения и проблемы развития оптической науки и возможности её практического использования;

- устройство и принцип работы наиболее распространенных оптических приборов, вспомогательного оборудования, а также демонстрационные опыты по изучаемому разделу;

- сущность исследуемых в ходе выполнения лабораторных работ физических явлений.

После изучения раздела “Оптика” курса общей физики студент **должен уметь:**

- давать определения физических величин и понятий, которые используются при изучении материала, единиц их измерения;

- формулировать и обосновывать физические законы и закономерности, устанавливать и объяснять зависимости между различными физическими величинами;

- использовать основные положения и законы оптической науки при анализе и объяснении различных частных случаев, решении физических задач;

- пользоваться наиболее распространенными оптическими приборами и вспомогательным оборудованием;

- выполнять простейшие оптические измерения, опытным путем определять основные оптические величины;

- при защите лабораторных работ давать правильное теоретическое обоснование и объяснение содержания работы, результатов измерений, проводить анализ погрешностей измерений;

- использовать при объяснении теоретического материала и при решении задач сведения, которые были получены при изучении других разделов курса общей физики, а также смежных дисциплин, в первую очередь математики.

1.2 СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. Введение. Предмет оптики. Основные этапы развития оптики. Электромагнитная и квантовая теории света. Волновые и корпускулярные свойства света.

2. Фотометрия. Источники и приемники света. Основные фотометрические величины и единицы их измерения. Эталон силы света. Световая энергия. Функция видности. Механический эквивалент света. Фотометры.

3. Геометрическая оптика. Основные понятия геометрической оптики. Принцип Ферма. Отражение и преломление света на плоской границе раздела двух сред. Полное внутреннее отражение. Световоды. Волоконная оптика. Преломление света на сферической поверхности. Теорема Лагранжа – Гельмгольца. Сферические зеркала. Тонкие линзы. Оптическая сила линзы. Центрированные оптические системы. Световой поток, проходящий через оптическую систему. Диафрагмы, светосила. Аберрации оптических систем (сферическая и хроматическая аберрации, аберрация кома, астигматизм, дисторсия, кривизна поля изображения). Глаз как оптическая система. Оптические приборы (лупа, микроскоп, телескоп, проекционный аппарат).

4. Интерференция света. Сложение световых волн. Когерентность. Интерференция. Таутохронизм оптических систем. Методы наблюдения интерференции в оптике: метод Юнга, зеркала Френеля, бипризма Бийе, зеркало Ллойда. Двухлучевая интерференция. Влияние размеров источника и некогерентности светового пучка на интерференционную картину. Двухлучевая интерференция при отражении и преломлении света в тонких пластинках. Полосы равного наклона и равной толщины. Исследование Поля. Многолучевая интерференция. Интерферометры. Применение интерференции.

5. Дифракция света. Принцип Гюйгенса – Френеля. Зоны Френеля. Объяснение прямолинейного распространения света по волновой теории. Зонная пластинка. Дифракция Френеля на круглом отверстии, на круглом экране, на краю полубесконечного экрана. Дифракция Фраунгофера на щели и круглом отверстии. Дифракционные решетки. Дисперсия и разрешающая способность решетки. Дифракция света на пространственных решетках. Понятие о голографии. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах. Формула Вульфа – Брэгга. Дифракционная природа изображения. Приближение коротких волн. Геометрическая оптика как предельный случай волновой оптики. Разрешающая способность оптических приборов.

6. Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Поляризаторы и анализаторы. Закон Малюса. Поляризация света при

отражении и преломлении на границе двух диэлектриков. Закон Брюстера. Формулы Френеля.

Распространение света в кристаллах. Двойное лучепреломление. Одноосные кристаллы. Эллиптическая и круговая поляризации. Интерференция плоско-поляризованных волн. Поляризационные приборы. Искусственная оптическая анизотропия. Поворот плоскости поляризации. Эффект Фарадея. Поляриметры.

7. Дисперсия света. Нормальная и аномальная дисперсии. Методы измерения дисперсии. Основы электронной теории дисперсии. Дисперсия в рентгеновской области спектра. Призмённые спектральные приборы.

8. Поглощение света. Коэффициент поглощения. Закон Бугера – Ламберта. Механизм поглощения света диэлектриками и металлами. Спектры поглощения. Светофильтры. Цвет тел.

9. Рассеяние света. Прохождение света через оптически неоднородную среду. Закон Рэлея. Зависимость интенсивности рассеянного света от угла рассеяния. Поляризация рассеянного света. Молекулярное рассеяние света.

10. Скорость света. Релятивистские эффекты в оптике. Фазовая и групповая скорости света. Эффект Вавилова – Черенкова. Методы измерения скорости света. Эффект Доплера в оптике. Опыты Физо и Майкельсона. Элементы нелинейной оптики.

11. Оптические явления в природе. Рефракция света. Миражи. Радуга. Венцы. Гало. Мерцание.

2. ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Учебно-методическая литература

Основная:

1. Белонучкин В. Е. и др. Основы физики: в 2 т. М., 2001.
2. Бондарь В.А. Курс общей физики: Оптика (на бел. языке). Мн., 1995.
3. Бутиков Е. И. и др. Физика: в 3 кн. М., 2001.
4. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М., 1989.
5. Сборник задач по общему курсу физики (под редакцией М.С. Цедрика) (на бел. языке). Мн., 1993.
6. Королёв Ф.А. Курс физики: Оптика, атомная и ядерная физика, М., 1974.
7. Ландсберг Г.С. Оптика. М., 1976, 2003
8. Бондарь, В.А. Общая физика. Практикум: учебное пособие / В.А. Бондарь и др.; под общ. ред. В.А. Яковенко.– Минск: Вышэйшая школа, 2008.– 572 с.
9. Савельев, И.В. Курс общей физики: В 5 кн. Кн. 4./ И.В. Савельев.– Москва: Астрель, 2001.
10. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. Т. 4, 5. М., 2002 – 2005.

Дополнительная:

1. Боровский Г. А., Бурсиан Э. В. Общая физика: Курс лекций с компьютерной поддержкой. в 2 т. М., 2001.
2. Бутиков Е.И. Оптика. М., 1986, 2001.
3. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. М., 1973.
4. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. М., 1998.
5. Калашников С. Г. Основы физики: упражнения и задачи. М., 2004.
6. Курс агульнай фізікі. Лабараторны практыкум./пад рэд. Цэдрыка М.С., Якавенка У.А., Мазыр, 2000.
7. Леденев А. Н. Физика: в 5 кн. М., 2005.
8. Бондар В. А. Самастойныя працы па курсе агульнай фізікі: раздзелы “Оптыка”, “Квантавая фізіка”. Метадычны дапаможнік. – Мн.: БДПУ, 2006. – 69 с.
9. Бондарь В.А., Марголин Л.Н. Семинарские занятия по общей физике. Раздел «Оптика». Мн., 2001

Перечень наглядных и методических пособий

1. Находятся в лаборатории оптики - корп. 3, комн. 307, лаборатории лекционных демонстраций - корп. 3, комн. 104, кабинете физики - корп. 3, комн. 501.
2. Размещены в базе знаний
<http://phys.bspu.unibel.by/phys/index.htm>

2.2 Перечень лекционных демонстраций

Геометрическая оптика

1. Схема светового эталона (телепроекция).
2. Отражение света от плоских зеркал.
3. Отражение света от сферических зеркальных поверхностей.
4. Преломление света на плоской границе раздела сред.
5. Световоды
6. Преломление света на сферической поверхности.
7. Ход лучей через сферические линзы.
8. Аберрации оптических систем (сферическая, кома, астигматизм, дисторсия, хроматическая).

Волновая оптика

9. Интерференционные приборы: зеркало Ллойда, бипризма Френеля.
10. Двухлучевая интерференция, возникающая при отражении и прохождении света в пленках и пластинках. Кольца Ньютона.
11. Схемы интерферометров (телепроекции).
12. Интерференционные фильтры.
13. Дифракция Френеля: на круглом отверстии, на круглом экране, на краю полубесконечного экрана.
14. Дифракция на щели.
15. Дифракционные решетки.
16. Дифракционные спектры.
17. Голограммы.
18. Поляризация света при отражении от изотропного диэлектрика.
19. Поляризаторы, анализаторы. Закон Малюса.
20. Двойное лучепреломление.
21. Поляризация света при двойном лучепреломлении.
22. Интерференция плоскополяризованных волн.
23. Искусственная анизотропия при деформациях.
24. Вращение плоскости поляризации.
25. Эффект Фарадея.
26. Дисперсия призмы.
27. Нелинейная оптика (кинофильм).
28. Опыт Майкельсона (компьютерная модель).

Перечень материалов на электронных носителях

1. Методические материалы размещены в
http://phys.bspu.unibel.by/phys/index_fm.htm
2. Учебные материалы размещены в
http://phys.bspu.unibel.by/phys/index_fu.htm

НАГЛЯДНЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОСОБИЯ

1. Находятся в лаборатории оптики - корп. 3, каб. 307-308, лаборатории лекционных демонстраций - корп. 3, каб. 104, кабинете физики - корп. 3, каб. 501.
2. Размещены в базе знаний <http://phys.bspu.unibel.by/phys/index.htm>

3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия, перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов				Материальное обеспечение занятия (наглядные, методические пособия и др.)
		Лекции	Практические (семинарские) занятия	Лабораторные занятия	Управляемая самостоятельная работа студента	
1	2	3	4	5	6	7
4.	Общая физика. Оптика (128 ч.)	30	32	40	26	
4.1.	<i>Введение. Краткий исторический обзор развития учения о свете (2ч.).</i>	2				
4.1.1.	Предмет оптики. Основные этапы развития оптики.	1				1.Мульти-медиа-проекция.
4.1.2.	Электромагнитная природа света. Волновые и корпускулярные свойства света.	1				1.Мульти-медиа-проекция.
1	2	3	4	5	6	7
4.2.	Фотометрия (10 ч.).	2	4	4	-	
4.2.1.	Основные фотометрические величины и единицы их измерения. Источники и приемники света. Эталон силы света.	1				1.Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрация Л 3.1.1.
4.2.2.	Основные фотометрические величины.		2			
4.2.3.	Световая энергия. Функция видности. Механический эквивалент света. Фотометры.	1				

4.2.4.	Переход от энергетических единиц к световым. Функция видности.		2				
4.2.5	Лабораторная работа 4.7 «Изучение характеристик источника света»			2			1. Инструкция к лабораторной работе № 4.7. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.7.
1	2	3	4	5	6	7	
4.2.6	Лабораторная работа 4.8 «Проверка основных законов фотометрии с помощью фотоэлемента»			2			1. Инструкция к лабораторной работе № 4.8. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.8.
4.3	Геометрическая оптика (28 ч.)	6	6	6	10(4л+4пр+2лр)		
4.3.1	Основные понятия и законы геометрической оптики. Принцип Ферма. Отражение и преломление света на плоской границе раздела двух сред. Полное внутреннее отражение. Световоды. Волоконная оптика.	2					1. Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрации №№ 3.1.2 -3.1.5
4.3.2	Отражение и преломление света на плоской и сферической поверхностях.		2				
4.3.3	Лабораторная работа № 4.5 «Измерение показателя преломления с помощью рефрактометра»			2			1. Инструкция к лабораторной работе № 4.5. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.5.
1	2	3	4	5	6	7	
4.3.4	Лабораторная работа № 4.6 «Определение дисперсии и разрешающей способности стеклянной призмы»			2			1. Инструкция к лабораторной работе № 4.6. 2. Оборудование к лабораторной работе №4.6.
4.3.5	Преломление света на сферической поверхности. Теорема Лагранжа – Гельмгольца. Сферические зеркала.	2					1.Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрации № 3.16.

4.3.6	Построение изображений предметов в сферических зеркалах				2(пр)	
4.3.7	Тонкие линзы. Оптическая сила линзы. Центрированные оптические системы. Световой поток, проходящий через оптическую систему. Диафрагмы, светосила.	2				1. Мульти-медиа. 2. Демонстрации №№ 3.1.7 - 3.1.8.
4.3.8	Аберрации оптических систем (сферическая и хроматическая аберрации, аберрация кома, астигматизм, дисторсия, кривизна поля изображения).				2(л)	
1	2	3	4	5	6	7
4.3.9	Глаз как оптическая система. Оптические приборы (лупа, микроскоп, телескоп, проекц. аппарат).				2(л)	
4.3.10	Тонкие линзы. Оптическая сила линзы. Оптические системы.		2			
4.3.11	Построение изображений в линзах и оптических системах.				2(пр)	
4.3.12	Лабораторные работы №№ 4.1, 4.2 <i>«Определение фокусных расстояний линзы и сферического зеркала», «Изучение погрешностей линз»</i>				2(лр)	1. Инструкции к лабораторным работам №№ 4.1, 4.2. 2. Оборудование к лабораторным работам №№ 4.1, 4.2.
4.3.13	Лабораторная работа № 4.3 <i>«Изучение микроскопа»</i>			1		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.3. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.3.
4.3.14	Лабораторная работа № 4.4 <i>«Изучение зрительной трубы»</i>			1		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.4. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.4.
1	2	3	4	5	6	7
4.3.15	Геометрическая оптика. Фотометрия.		2			
4.4	Интерференция света (22ч.)	4	6	8	4(2л+ 2пр)	

4.4.1	Сложение световых волн. Когерентность. Интерференция. Таутохронизм оптических систем. Методы наблюдения интерференции в оптике: метод Юнга, зеркала Френеля, бипризма Бийе, зеркало Ллойда. Двухлучевая интерференция. Влияние размеров источника и некогерентности светового пучка на интерференционную картину.	2				1. Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрация М 3.2.9.
4.4.2	Когерентность волн. Оптическая разность хода.		2			
4.4.3	Способы получения когерентных волн.		2			
4.4.4	Лабораторная работа № 4.9 «Определение длины световой волны при помощи бипризмы Френеля»			4		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.9. 2. Оборудование к лабораторной работе №4.9.
1	2	3	4	5	6	7
4.4.5	Двухлучевая интерференция при отражении и преломлении света в тонких пластинках. Полосы равного наклона и равной толщины. Исследование Поля. Многолучевая интерференция.	2				1. Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрации №№ 3.2.10 – 3.2.12
4.4.6	Двухлучевая интерференция при отражении и преломлении света в тонких пластинках. Полосы равного наклона и равной толщины.		2			
4.4.7	Интерферометры. Применение интерференции.				2(пр)	
4.4.8	Интерферометры. Применение интерференции.				2(л)	
4.4.9	Лабораторная работа № 4.10 «Определение радиуса кривизны линзы и величины			4		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.10. 2. Оборудование к лабораторной ра-

	<i>деформации при помощи колец Ньютона».</i>					боте №4.10.
1	2	3	4	5	6	7
4.5	Дифракция света (22ч.).	6	4	8	4(2(л))+2пр)	
4.5.1	Принцип Гюйгенса – Френеля. Зоны Френеля. Объяснение прямолинейного распространения света по волновой теории. Зонная пластинка. Дифракция Френеля на круглом отверстии, на круглом экране, на краю полубесконечного экрана. Дифракция Фраунгофера на щели и круглом отверстии.	2				1. Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрации №№ 3.2.13 – 3.2.14
4.5.2.	Дифракция света. Зоны Френеля.		2			
4.5.3.	Лабораторная работа № 4.12 <i>«Определение длины волны при помощи зонной пластинки».</i>			2		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.12. 2. Оборудование к лабораторной работе №4.12.
4.5.4.	Лабораторная работа № 4.13 <i>«Изучение дифракции света на узкой щели».</i>			2		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.13. 2. Оборудование к лабораторной работе №4.13.
1	2	3	4	5	6	7
4.5.5.	Дифракционные решетки. Дисперсия и разрешающая способность решетки. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах. Формула Вульфа – Брегга.	2				1. Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрации №№ 3.2.15 – 23.2.
4.5.6.	Дифракционная природа изображения. Приближение коротких волн. Геометрическая оптика как предельный случай волновой оптики. Разрешающая способность оптических приборов.	2				1. Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрации №№ 3.2.15 – 23.2.
4.5.7.	Дифракционные решетки. Дисперсия и разрешающая способность решетки.		2			
4.5.8.	Дифракция рентгеновских лучей на				2(пр)	

	кристаллах.					
4.5.9.	Лабораторная работа № 4.14 <i>«Изучение дифракционной решетки»</i>			2		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.14. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.14.
4.5.10	Дифракция света на пространственных дифракционных решетках. Понятие о голографии.				2(л)	
1	2	3	4	5	6	7
4.5.11	Лабораторная работа № 4.15 <i>«Изучение дифракции света на ультразвуковых волнах».</i>			2		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.15. 2. Оборудование к лабораторной работе №4.15.
4.6.	Поляризация света (14 ч.)	3	4	6	1(л)	
4.6.1	Естественный и поляризованный свет. Поляризаторы и анализаторы. Закон Малюса. Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков. Закон Брюстера. Формулы Френеля.	2				1. Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрации: №№ 3.2.18 – 3.2.19
4.6.2	Поляризация света. Законы Малюса и Брюстера.		2			
4.6.3	Лабораторная работа № 4.16 <i>«Проверка закона Малюса»</i>			2		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.16. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.16.
1	2	3	4	5	6	7
4.6.4	Лабораторная работа № 4.17 <i>«Определение угла Брюстера и диэлектрической проницаемости стекла»</i>			2		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.17. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.17.
4.6.5.	Распространение света в	1				1. Мульти-медиа-

	кристаллах. Двойное лучепреломление. Одноосные кристаллы. Эллиптическая и круговая поляризации. Интерференция плоскополяризованных волн. Искусственная оптическая анизотропия. Поворот плоскости поляризации. Эффект Фарадея.					проекция. 2. Демонстрации №№ 3.2.20 – 3.2.25
4.6.6	Двойное лучепреломление. Поляризация обыкновенного и необыкновенного лучей.		2			
4.6.7	Поляризационные приборы. Поляриметры.				1(л)	
4.6.8	Лабораторная работа № 4.18 <i>«Изучение поляризации обыкновенного и необыкновенного лучей при двойном лучепреломлении»</i>			2		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.18. 2. Оборудование к лабораторной работе №4.18.
1	2	3	4	5	6	7
4.7	Дисперсия света (8 ч.)	1	2	4	1(л)	
4.7.1	Нормальная и аномальная дисперсии. Методы измерения дисперсии. Основы электронной теории дисперсии. Дисперсия в рентгеновской области спектра.	1				1. Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрация № 3.2.26.
4.7.2	Дисперсия света. Основы электронной теории дисперсии.		2			
4.7.3.	Призменные спектральные приборы.				1(л)	
4.7.4	Лабораторная работа № 4.21 «Изучение призменного спектрального прибора»			4		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.21. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.21.
4.8	Поглощение света (7 ч.)	1	1	4	1(л)	
4.8.1	Коэффициент поглощения. Закон Бугера – Ламберта. Механизм поглощения света диэлектриками и металлами.	1				1. Мульти-медиа-проекция.
1	2	3	4	5	6	7

4.8.2	Закон Бугера-Ламберта. Закон Бера.		1			
4.8.3	Лабораторная работа № 4.20 <i>«Изучение поглощения света твердыми и жидкими телами»</i>			2		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.20. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.20.
4.8.4	Лабораторная работа № 4.22 <i>«Изучение основных характеристик светофильтров»</i>			2		1. Инструкция к лабораторной работе № 4.22. 2. Оборудование к лабораторной работе № 4.22.
4.8.5	Спектры поглощения. Светофильтры. Цвет тел.				1(л)	
4.9	Рассеяние света (3 ч.)	1	1		1(л)	
4.9.1	Прохождение света через оптически неоднородную среду. Закон Рэлея. Зависимость интенсивности рассеянного света от угла рассеяния. Поляризация рассеянного света.	1				1. Мульти-медиа-проекция.
1	2	3	4	5	6	7
4.9.2	Виды рассеяния света.		1			
4.9.3	Молекулярное рассеяние света.				1(л)	
4.10	Скорость света (10 ч.)	4	4		2(л)	
4.10.1	Релятивистские эффекты в оптике. Фазовая и групповая скорости света. Эффект Вавилова – Черенкова. Эффект Доплера в оптике.	2				1. Мульти-медиа-проекция.
4.10.2	Фазовая и групповая скорости света.		1			
4.10.3	Явление Доплера в оптике.		1			
4.10.4	Методы определения скорости света.				2(л)	
4.10.5	Опыты Физо и Майкельсона. Элементы нелинейной оптики.	2				1. Мульти-медиа-проекция. 2. Демонстрации №№ 3.2.27 – 3.2.28

4.10.6	Волновая оптика		2			
1	2	3	4	5	6	7
4.11	Оптические явления в природе (2 ч.)				2(л)	
4.11.1	Рефракция света. Миражи. Радуга. Венцы. Гало. Мерцание.				2(л)	
Итого (128ч.):		30	40	42	16(л.)+ +8(пр.)+ +2(лаб.)	

4. Учебный модуль № 1. «Геометрическая оптика. Фотометрия»

5. Учебный блок «Фотометрия»

5.1 Основные понятия и законы

Если W — энергия излучения, переносимая через данную площадку за промежуток времени Δt , то величина $\Phi = W/\Delta t$ называется *световым потоком*.

Сила света точечного источника равна отношению светового потока Φ , излучаемого в данном направлении, к телесному углу ω , в котором он распространяется, т. е. $I = \Phi/\omega$ (телесный угол $\omega = S/r^2$, где S — площадь основания конуса с вершиной в центре сферы радиусом r ; полный телесный угол $\omega_0 = 4\pi$ стерадиан).

Полный световой поток, излучаемый точечным источником света,
$$\Phi_0 = 4\pi I.$$

Освещенностью E называется величина светового потока, приходящаяся на единицу площади поверхности,
$$E = \Phi/S.$$

Освещенность, создаваемая точечным источником света силой I на бесконечно малой площадке, находящейся на расстоянии r от него, определяется по формуле:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha,$$

где α — угол падения лучей на освещаемую площадку.

При нормальном падении лучей $\alpha = 0$ освещенность площадки

$$E_0 = \frac{I}{r^2}.$$

Поэтому $E = E_0 \cos \alpha$.

Если освещенность E поверхности создается несколькими источниками, то

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i.$$

Яркость источника равна световому потоку, который излучается в направлении нормали единицей площади поверхности источника внутри единичного телесного угла

$$B = \frac{\Phi}{\Delta S \cdot \omega}.$$

Светимость R измеряется световым потоком, излучаемым единицей площади светящейся поверхности. Если светимость тела обусловлена его освещенностью, то $R = \rho E$, где ρ — коэффициент отражения.

Для источников, подчиняющихся закону Ламберта (сила света пропорциональна косинусу угла между направлением излучения и нормалью к поверхности), светимость и яркость связаны соотношением

$$R = \pi V.$$

Для длины волны $\lambda = 550$ нм энергетический поток в 1 Вт, попадающий в глаз, воспринимается как световой поток в 620 лм.

5.2 Вопросы для самоконтроля

1. Каков суммарный световой поток лампы, укрепленной на потолке, падающий на стены и пол комнаты?
2. Как меняется величина светового потока при перемещении лампы по потолку?
3. Какая освещенность считается нормальной для чтения?
4. Зависит ли яркость раскаленного шара от расстояния до него?
5. Какой физический смысл солнечной постоянной?
6. Как падают солнечные лучи на поверхность Земли на экваторе в день весеннего и осеннего равноденствия?
7. В чем сущность видности $v(\lambda)$? Изобразите графически указанную зависимость.

5.3 Методические указания к практическим занятиям

Задачи по фотометрии можно разделить на две группы: задачи, в которых требуется определить освещенность, создаваемую одним или несколькими точечными источниками, или другие фотометрические величины; задачи на использование законов фотометрии в сочетании с законами отражения и преломления света.

1. Задачи первого типа решаются путем составления уравнений на основании формул для определения освещенности в общем случае или для освещенности, создаваемой точечным источником света. Перед составлением уравнений необходимо сделать схематический рисунок, указав на нем положения источников света, заданные расстояния, ход лучей и углы их падения на освещаемую поверхность. Используя рисунок, иногда надо составлять вспомогательные уравнения, связывающие расстояния и тригонометрические функции углов падения лучей. Полученную систему уравнений решают относительно искомой величины.

2. В задачах второго типа чаще всего требуется определить освещенность в какой-либо точке, создаваемую лучами, идущими от точечного источника света после их отражения от зеркала или преломления линзой. При решении таких задач следует построить изображения точечного источника в заданной оптической системе и рассматривать полученные изображения как вторичные источники, создающие дополнительную освещенность. После этого определяются положения дополнительных источников и их силы света. Силу света таких источников чаще всего

рассчитывают, используя величину светового потока. При этом должны быть учтены потери световой энергии за счет поглощения и рассеивания световых лучей. Определив положение дополнительных источников и их силу света, составляют основные и вспомогательные уравнения.

5.4 Примеры решения задач

Пример 1. Над горизонтальной площадкой на высоте 2 м на расстоянии 1 м друг от друга находятся два точечных источника света, дающих световые потоки по 300 лм каждый. Определите освещенность в точках площадки, расположенных под источниками света и на середине расстояния между ними.

Решение. Освещенности в точках A и B под источниками (рис. 1) равны, соответственно, $E_A = E_{1A} + E_{2A}$, где $E_{1A} = \frac{I_1}{h^2}$, $E_{2A} = \frac{I_2 \cos \alpha_2}{r_2^2}$;

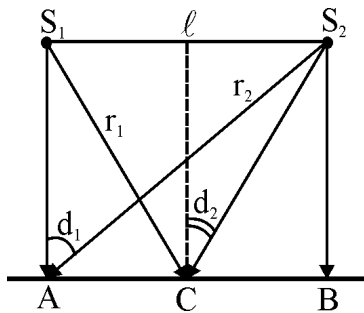


Рис. 1

$E_B = E_{1B} + E_{2B}$, где $E_{1B} = \frac{I_1 \cos \alpha_1}{r_1^2}$, $E_{2B} = \frac{I_2}{h^2}$. В нашем случае $I_1 = I_2 = I$, $r_1 = r_2 = r$, $\cos \alpha_1 = \cos \alpha_2$, т. е. $E_A = E_B$. Как видно из рисунка

$$\cos \alpha_2 = h/r_2; \quad r^2 = h^2 + \ell^2; \quad E_{2A} = \frac{Ih}{(h^2 + \ell^2)^{3/2}}.$$

Следовательно, $E_A = E_B = \frac{I}{h^2} + \frac{Ih}{(h^2 + \ell^2)^{3/2}}$.

Поскольку оба источника являются точечными, то полный световой поток, излучаемый каждым из них: $\Phi = 4\pi I$, откуда $I = \frac{\Phi}{4\pi}$. С учетом этого, получим окончательно:

$$E_A = E_B = \frac{\Phi}{4\pi} \left(\frac{1}{h^2} + \frac{h}{(h^2 + \ell^2)^{3/2}} \right).$$

Освещенность в точке C : $E_C = E_{1C} + E_{2C}$. Принимая во внимание, что $E_{1C} = E_{2C} = \frac{I \cos \alpha_0}{r_0^2}$; $\cos \alpha_0 = h/r_0$; $r_0^2 = h^2 + \ell^2/4$, для освещенности,

создаваемой одним из источников, в точке C получим $E_{1C} = \frac{Ih}{h^2 + \ell^2/4}^{3/2}$.

С учетом этого $E_C = \frac{2Ih}{h^2 + \ell^2/4}^{3/2}$.

Численно: $E_A = E_B \approx 10,2$ лк; $E_C = 10,9$ лк.

Пример 2. Точечный источник света, силой 40 кд, находится на главной оптической оси выпуклого зеркала радиусом 40 см на расстоянии 20 см от него. На расстоянии 40 см от зеркала перпендикулярно к его главной оптической оси расположен экран. Определите максимальную освещенность экрана, если коэффициент отражения зеркала 0,9.

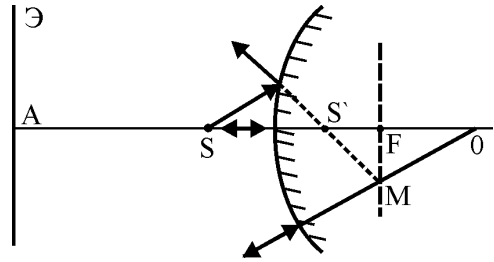


Рис. 2

Решение. Максимальная освещенность будет в точке пересечения экрана с главной оптической осью зеркала (рис. 2). Она будет равна сумме освещенностей, создаваемых самим источником S и его мнимым изображением S' в выпуклом зеркале, т. е. $E = E_1 + E_2$. Освещенность, создаваемая самим источником в точке A : $E_1 = I_0 / r_0^2$. Освещенность, создаваемая мнимым источником S' в точке A , $E_2 = I_1 / r_1^2$, где I_1 — сила света этого источника. Для определения E_2 воспользуемся законом сохранения световой энергии. Выберем на поверхности зеркала маленькую площадку ΔS . Поток световой энергии, распространяющейся от источника внутри телесного угла $\omega_0 = \Delta S / d^2$, после отражения от зеркала находится в телесном угле $\omega_1 = \Delta S / f^2$. Принимая во внимание, что 90% световой энергии отражается от зеркала, на основании закона сохранения световой энергии имеем: $\Phi_1 = \rho \Phi_0$, где ρ —

коэффициент отражения. С учетом этого $I_1 \omega_1 = \rho I_0 \omega_0$, т. е. $I_1 = \rho \frac{f^2}{d^2} I_0$. Для определения f воспользуемся формулой выпуклого сферического зеркала: $\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{F}$, откуда $f = \frac{Fd}{F+d}$. С учетом этого $I_1 = \rho \frac{F^2}{F^2 + d^2} I_0$. Подставив

соответствующие значения I_0, r_0 и I_1, r_1 получим: $E = I_0 \left(\frac{1}{r_0^2} + \frac{\rho F^2}{r_1^2 F^2 + d^2} \right)$.

Принимая во внимание, что $r_1 = 2d + f = 2d + \frac{Fd}{F+d} = \frac{3F + 2d}{F+d} d$, получим

$$\text{окончательно } E = I_0 \left(\frac{1}{r_0^2} + \frac{\rho F^2}{d^2 F^2 + d^2} \frac{F+d}{3F+2d} \right).$$

Численно: $E = 1036$ лк.

Пример 3. Изображение Солнца получено на экране с помощью системы из двух одинаковых тонких собирающих линз с фокусным расстоянием F каждая, сложенных вплотную. Как изменится освещенность изображения Солнца, если одну из линз убрать?

Решение. Если на пути солнечных лучей, падающих нормально на поверхность экрана, поставить собирающую линзу так, чтобы она давала изображение Солнца, то световой поток, распределявшийся ранее по площади экрана, равной площади линзы S_0 , будет концентрироваться на площади изображения Солнца S . Пучок солнечных лучей можно считать параллельным, поэтому изображение Солнца получается практически в фокальной плоскости оптической системы (рис. 3).

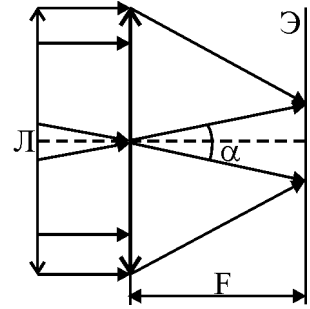


Рис. 3

Если пренебречь поглощением света линзой, то световой поток, падающий на нее, будет равен световому потоку, падающему на площадь изображения Солнца, т. е.

$$\Phi_0 = \Phi \text{ или } E_0 S_0 = ES,$$

где E_0, E — освещенности поверхности линзы и изображения Солнца.

Пусть диаметр линзы D и угол между лучами, идущими от крайних точек Солнца через оптический центр линзы, равен α . Как видно из рисунка, площадь изображения $S = \pi r^2 = \pi F^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}$. Поскольку угол α мал, то

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}. \text{ Следовательно, } S = \pi \left(\frac{\alpha F}{2} \right)^2.$$

Площадь линзы $S_0 = \pi D^2 / 4$. Таким образом, освещенность изображения Солнца на экране

$$E = E_0 \left(\frac{D}{\alpha F} \right)^2.$$

Если изображение Солнца получено с помощью системы из двух линз, то его освещенность

$$E' = E_0 \left(\frac{D}{\alpha F_0} \right)^2,$$

где F_0 — фокусное расстояние системы линз. Так как линзы одинаковые, то

$$\frac{1}{F_0} = \frac{2}{F}; F_0 = \frac{F}{2}, \text{ т. е. } E' = E_0 \left(\frac{2D}{\alpha F} \right)^2.$$

Следовательно, $E' / E = 4$. Таким образом, при удалении одной из линз освещенность изображения Солнца на экране уменьшится в 4 раза.

Пример 4. При микрофотосъемке предмета с двукратным увеличением экспозиция равна 9 с. Какой должна быть экспозиция, если предмет нужно сфотографировать так, чтобы увеличение было равно единице?

Решение. В задаче рассматривается предмет, который нельзя считать точечным источником света. Основная трудность решения задач такого рода состоит в определении светового потока, падающего на тот участок фотопленки, на котором получается изображение предмета. Обычно при

расчетах предполагают, что диаметр линз объектива мал по сравнению с его фокусным расстоянием.

При фотографировании предмета с различных расстояний необходимо, чтобы на единицу площади пленки в тех местах, где получается изображение предмета, приходилась одинаковая световая энергия, т. е.

$$\frac{W_1}{S_1} = \frac{W_2}{S_2},$$

где W_1 — энергия, которая приходится на площадь изображения S_1 за время t_1 при фотографировании с расстояния d_1 ; W_2 — энергия, которая приходится на площадь изображения S_2 за время t_2 при фотографировании с расстояния d_2 .

С учетом того, что $W = \Phi t = ESt$, получим $\frac{E_1 S_1 t_1}{S_1} = \frac{E_2 S_2 t_2}{S_2}$, откуда

$$E_1 t_1 = E_2 t_2. \text{ Следовательно, } t_2 = \frac{E_1 t_1}{E_2}.$$

Поскольку предполагается, что диаметр линзы мал по сравнению с ее фокусным расстоянием F , то при подсчете телесных углов, под которыми линза видна из различных точек предмета, их можно считать равными друг другу, т. е.

$$\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_n = \frac{S_{\text{л}}}{d_1^2},$$

где $S_{\text{л}}$ — площадь линзы.

Световой поток, падающий на линзу от элементарной площадки предмета,

$$\Delta\Phi = w \frac{S_{\text{л}}}{d^2} \Delta S,$$

где w — энергия, которая излучается ежесекундно в единичный телесный угол.

Полный световой поток, падающий на линзу со всей площади предмета S_0 ,

$$\Phi_1 = \Sigma \Delta\Phi = w \frac{S_{\text{л}}}{d_1^2} S_0.$$

Если пренебречь потерями световой энергии потока и считать, что весь поток Φ_1 , падающий от предмета на линзу, попадет на изображение, то

$$E_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = w \frac{S_{\text{л}}}{d_1^2} \frac{S_0}{S_1}.$$

Выразив f_1 из формулы линзы $\frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{F}$, с учетом того, что

линейное увеличение предмета $k_1 = \frac{f_1}{d_1} = \frac{F}{d - F}$, получим $\frac{S_1}{S_0} = k_1^2 = \left(\frac{F}{d - F} \right)^2$.

Подставив отношение S_1/S_0 в формулу для освещенности, в первом случае имеем:

$$E_1 = \frac{wS_{\text{л}} d_1 - F^2}{d_1^2 F^2}.$$

Аналогично во втором случае для расстояния d_2

$$E_2 = \frac{wS_{\text{л}} d_2 - F^2}{d_2^2 F^2}.$$

Подставив значения освещенностей в формулу для определения времени экспозиции во втором случае, получим:

$$t_2 = \frac{d_2 d_1 + F}{d_1 d_2 + F} t_1.$$

Численно: $t_2 = 4$ с.

5.5 Задачи для самостоятельного решения

5.1. Полный световой поток, излучаемый точечным источником света, расположенным на высоте 2 м над центром освещаемой площадки, равен 500 лм. Определите освещенность площадки на расстоянии 2 м от ее центра.

5.2. Над площадкой на одинаковой высоте 2 м висят три лампы по 200 кд, расположенные на расстоянии 2 м друг от друга. Определите освещенность площадки под каждой лампой.

5.3. Лампа в 400 кд находится на расстоянии 1 м от экрана. На каком расстоянии следует поставить позади лампы плоское зеркало параллельно экрану, чтобы освещенность в центре экрана увеличилась на 100 лк?

5.4. Точечный источник света находится на расстоянии ℓ от экрана. Как изменится освещенность центральной точки экрана, если за источником поместить два плоских зеркала, составляющих двугранный угол 90° , так чтобы источник оказался на биссектрисе двугранного угла, образованного зеркалами? Расстояние от источника до вершины двугранного угла ℓ .

5.5. В фокусе вогнутого сферического зеркала радиусом 40 см находится точечный источник, сила света которого 100 кд. Определите максимальную освещенность экрана, расположенного перпендикулярно к главной оптической оси экрана на расстоянии 120 см от него.

5.6. Точечный источник света находится на главной оптической оси выпуклого зеркала радиусом R . Коэффициент отражения зеркала ρ . Максимальная освещенность экрана, расположенного перпендикулярно к оптической оси на расстоянии R от зеркала, равна E . Определите силу света точечного источника, если расстояние между ним и зеркалом равно $R/2$.

5.7. Освещенность изображения лунного диска, полученного с помощью линзы диаметром 1 см и фокусным расстоянием 10 см, равна 10 лк. Угловой диаметр Луны 0,01 рад. Какую освещенность создает Луна на поверхности Земли?

5.8. На расстоянии 50 см от небольшого экрана находится точечный источник света. Если посередине между ними поместить собирающую линзу, то освещенность экрана не изменится. Определите оптическую силу линзы?

5.9. С помощью линзы можно получить изображение небольшого предмета на экране при двух ее положениях, отстоящих друг от друга на расстоянии 40 см. Освещенности изображений предмета при этом отличаются в 4 раза. Определите расстояние от экрана до предмета.

5.10. При фотографировании предмета, находящегося на расстоянии 2 м, экспозиция была равна t_1 . При увеличении расстояния втрое экспозиция оказалась в 4 раза меньше, чем t_1 . Чему равно фокусное расстояние объектива фотоаппарата?

6. Учебный блок «Геометрическая оптика»

6.1 Основные понятия и законы

В геометрической оптике рассматриваются законы распространения света в прозрачных средах на основании представлений о *световых пучках* как о *совокупности световых лучей*. Световой луч принято изображать тонкой линией со стрелкой, указывающей направление переноса световой энергии.

К основным законам геометрической оптики относятся.

1. *Закон прямолинейного распространения света, согласно которому в однородной прозрачной среде свет распространяется прямолинейно.*

2. *Закон независимости световых пучков, согласно которому световые пучки от разных источников света, которые распространяются в некоторой области пространства, не взаимодействуют друг с другом.*

При падении света на границу раздела двух прозрачных сред имеет место отражение и преломление света (рис. 4). При этом выполняются законы отражения и законы преломления.

Закон отражения света:

Падающий и отраженный лучи с нормалью к границе раздела двух сред, восстановленной в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол отражения γ равен углу падения α .

Закон преломления света:

Падающий луч, нормаль, восстановленная в точке падения луча к границе раздела двух сред, и преломленный луч лежат в одной плоскости. Угол падения α и угол преломления β связаны равенством:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2},$$

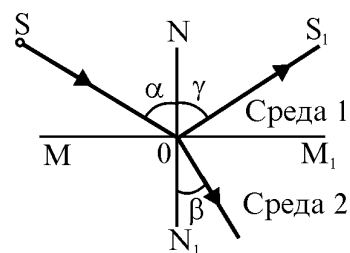


Рис. 4

где α — угол падения луча, β — угол преломления, $n_{2,1}$ — *показатель преломления второй по ходу луча среды относительно первой*, n_1 и n_2 — *абсолютные показатели преломления первой и второй сред соответственно*, v_1 и v_2 — *скорости света в этих средах*.

Угол падения α_0 , соответствующий углу преломления $\beta = 90^\circ$, называется *предельным углом полного отражения*. В этом случае $\sin \alpha_0 = n_{2,1} = n_2 / n_1$.

Если $\alpha > \alpha_0$, то лучи отражаются от границы раздела обратно в первую среду.

Формула, связывающая *фокусное расстояние F сферического зеркала или тонкой линзы с расстояниями от предмета d и его изображения f в этом зеркале или в линзе*, имеет вид:

$$\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F}.$$

Причем все расстояния от зеркала или линзы до действительных точек берутся со знаком плюс, до мнимых — со знаком минус.

Если R — радиус сферической поверхности, из которой вырезано зеркало, то его фокусное расстояние $F = R/2$. Эта формула является приближенной, в общем случае $F = R \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}{2}$, где α — угол, под которым падает на зеркало луч, параллельный его главной оптической оси. Причем фокус у вогнутого зеркала *действительный*, а у выпуклого — *мнимый* (фокус плоского зеркала $F = \infty$).

Если R_1 и R_2 — радиусы кривизны сферических поверхностей, ограничивающих линзу, то

$$\frac{1}{F} = \left(\frac{n_l}{n_{cp}} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где n_l и n_{cp} — *абсолютные показатели преломления линзы и окружающей среды*, соответственно. Радиусы выпуклых поверхностей считаются положительными, вогнутых — отрицательными, радиус плоской поверхности считается равным бесконечности.

Если плоский предмет высотой h_0 расположен перпендикулярно к главной оптической оси сферического зеркала или линзы и высота его изображения равна h , то *линейное увеличение*

$$k = h / h_0 = f / d.$$

Величину D , обратную фокусному расстоянию сферического зеркала или линзы, выраженную в метрах, называют оптической силой:

$$D = 1 / F.$$

Оптическая сила собирающей линзы считается *положительной*, а рассеивающей — *отрицательной*.

Для получения изображения предметов часто используют различные оптические системы. Оптическая сила системы, состоящей из двух тонких линз с оптическими силами D_1 и D_2 , сложенных вплотную

$$D = D_1 + D_2.$$

Если две линзы находятся на расстоянии ℓ друг от друга, причем их главные оптические оси совпадают, то оптическая сила такой системы

$$D = D_1 + D_2 - \ell D_1 D_2.$$

Примерами оптических систем могут быть лупа, микроскоп, зрительная труба и др.

Линейное увеличение лупы: $k = d_0 / F$, где d_0 — расстояние наилучшего зрения (для нормального глаза $d_0 = 25$ см), F — фокусное расстояние лупы.

Для микроскопа $k = \frac{L d_0}{F_1 F_2}$, где L — расстояние между передним фокусом окуляра и задним фокусом объектива; F_1 и F_2 — фокусные расстояния объектива и окуляра, соответственно.

Для наблюдения изображений удаленных предметов применяют зрительные трубы. Увеличение зрительной трубы определяется по формуле:

$$k = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{F_1}{F_2},$$

где α — угол, под которым видны крайние точки предмета (угол зрения); β — угол, под которым видны крайние точки его изображения; F_1 и F_2 — фокусные расстояния объектива и окуляра зрительной трубы.

6.2 Вопросы для самоконтроля

1. Как связаны между собой абсолютный и относительный показатели преломления?
2. Почему при рассмотрении предмета через плоскую стеклянную пластинку он кажется расположенным ближе?
3. В чем заключается явление полного отражения?
4. В какой среде лучи света могут быть криволинейными?
5. Получите при помощи принципа Ферма закон отражения света от границы раздела двух сред.
6. В каком случае вогнутое сферическое зеркало даёт действительное и равное предмету изображение?
7. Дайте определение оптического центра, оптической оси, фокальной плоскости и главных фокусов.
8. Что такое оптическая сила линзы? В каких единицах измеряется оптическая сила?
9. Для каких лучей применима формула линзы?
10. Всегда ли линзы, у которых поверхности выпуклые, являются собирающими?

11. При каких условиях система из собирающей и рассеивающей линзы будет давать действительное изображение?
12. В чем заключается явление сферической и хроматической аберраций?
13. Постройте ход лучей в микроскопе?
14. Чему равно увеличение лупы? микроскопа?
15. Как определяется оптическая сила центрированной оптической системы?

6.3 Методические указания к практическим занятиям

Задачи на законы отражения можно разделить на две основные группы: задачи на отдельное зеркало и задачи на системы зеркал. В свою очередь, первая группа может быть разбита на три подгруппы: задачи о плоском, вогнутом и выпуклом зеркалах. Во всех указанных группах задач различают расчетные задачи и задачи, где требуется провести только графическое построение. Решение каждого типа задач имеет свои методические особенности.

1. Решение расчетных задач на отдельное зеркало следует начинать с построения изображения, пользуясь существующими правилами построения изображений. При этом всегда надо обращать особое внимание на расположение предмета относительно характерных точек сферического зеркала, так как от этого зависят положение и размеры изображения.

Построив изображение предмета и обозначив расстояния от предмета и изображения до зеркала, переходят к составлению расчетных уравнений. Основные расчетные уравнения составляют на основании формулы сферического зеркала и выражения для линейного увеличения. При составлении уравнений следует учитывать знаки отрезков, входящих в формулу зеркала.

Иногда в условии задачи приводятся дополнительные данные, позволяющие составить вспомогательные уравнения, которые очень часто составляются на основе геометрических построений. При решении задач, в которых рассматривают не одно, а два и более положений одного и того же предмета, необходимо строить изображения и составлять уравнения для каждого случая отдельно.

2. Задачи на построение изображений чаще всего предусматривают определение положения изображения предмета в зеркале или направления распространения некоторого произвольного луча после его отражения от зеркала путем графического построения. В условиях таких задач указываются, как правило, вид зеркала, его характерные точки, положение и размеры предмета или направления луча, падающего на зеркало.

Для построения изображения предмета достаточно построить изображение его крайних точек и точек излома, если такие имеются. Это возможно, так как мы рассматриваем идеальные оптические системы, в которых всякая прямая линия преобразуется в прямую.

К числу основных лучей, используемых для построения изображений в зеркалах, используются следующие лучи.

1. Луч, падающий на зеркало параллельно его главной оптической оси, после отражения в случае вогнутого зеркала проходит через его фокус; в случае выпуклого зеркала через фокус проходит продолжение отраженного луча.

2. Луч, проходящий через фокус вогнутого зеркала или в направлении на фокус выпуклого зеркала, после отражения идет параллельно главной оптической оси зеркала.

3. Луч, проходящий через оптический центр вогнутого зеркала или в направлении на оптический центр выпуклого зеркала, отражается в обратном направлении.

4. Луч, падающий в полюс зеркала под углом α , отражается симметрично относительно главной оптической оси.

При построении изображения точки, лежащей на главной оптической оси зеркала в качестве первого используют луч, проходящий через оптический центр зеркала. Вторым луч направляют на зеркало параллельно произвольной побочной оптической оси. Отраженный луч или его продолжение проходят через точку пересечения этой оси с фокальной плоскостью зеркала.

3. Определенный класс задач на построение предусматривает определение вида сферического зеркала и его характерных точек по заданному взаимному расположению предмета и его изображения относительно оптической оси. При решении таких задач пользуются свойствами характерных лучей, применяемых при построении изображений.

4. В задачах, связанных с расчетами и построениями в системах зеркал, необходимо найти изображение предмета после двукратного отражения падающих лучей сначала от одного, а затем от другого зеркала. При этом расчеты и построения основываются на том, что в силу обратимости хода лучей изображение, даваемое первым зеркалом, можно рассматривать как предмет для второго. Если изображение, даваемое первым зеркалом, располагается перед вторым, то промежуточный предмет следует считать действительным, и в формуле, записанной для второго зеркала, $d > 0$. Если изображение окажется за вторым зеркалом, то $d < 0$.

Системы зеркал могут представлять различные сочетания: выпуклое—плоское, вогнутое—выпуклое, вогнутое—вогнутое и т. д. Решение задач данного типа осуществляется в следующем порядке:

– изобразив общую главную оптическую ось системы, располагают зеркала и указывают их характерные точки в строгом соответствии с числовыми значениями величин приведенными в задаче;

– строят изображение предмета в первом зеркале;

– зная положение промежуточного изображения относительно второго зеркала и считая его предметом для последнего, строят изображение предмета, даваемое системой зеркал;

– учитывая знаки отрезков d , f , F , записывают основные уравнения для первого и второго зеркал;

– используя дополнительные условия задачи, составляют вспомогательные уравнения. При составлении вспомогательных уравнений следует иметь в виду, что увеличение, даваемое системой зеркал при двукратном отражении лучей,

$$k = \frac{h_2}{h_0} = \frac{h_1}{h_0} \frac{h_2}{h_1} = \frac{f_1}{d_1} \frac{f_2}{d_2} = k_1 k_2,$$

где h_0 — высота предмета; h_1 — высота изображения, даваемого первым зеркалом; h_2 — высота изображения, даваемого системой зеркал; k_1 и k_2 — увеличение, даваемое каждым зеркалом системы.

Задачи на преломление света можно разделить на пять групп.

1. Задачи на преломление света на плоской границе двух сред решаются на основании общей формулы второго закона преломления с использованием законов и формул математики. Прежде всего необходимо сделать схематический рисунок, учитывая, какая из сред по ходу луча является оптически менее плотной. После этого записывают второй закон преломления для каждого перехода луча из одной среды в другую и составляют вспомогательные уравнения на основании данных задачи и решают полученную систему уравнений относительно неизвестной величины.

2. Задачи на построение изображений предметов в отдельных линзах решаются аналогично задачам на сферические зеркала с учетом особенностей построения изображений в линзах. Для построения изображения светящейся точки достаточно проследить ход двух лучей, вышедших из этой точки, до и после преломления в линзе. Изображение предмета представляет собой совокупность изображений отдельных его точек. Если предмет плоский, то для построения изображения достаточно построить изображения крайних точек и точек излома предмета (за исключением случая, когда предмет пересекает фокальную плоскость линзы).

Основными лучами, используемыми для построения изображения в линзах, являются следующие:

– Луч, который падает на линзу параллельно ее главной оптической оси, после преломления в собирающей линзе проходит через задний фокус линзы; после преломления в рассеивающей линзе луч идет так, что его продолжение проходит через передний фокус линзы.

– Луч, который проходит через передний фокус собирающей линзы, или в направлении на задний фокус рассеивающей линзы, после преломления в линзе идет параллельно главной оптической оси линзы.

– Луч, который проходит через оптический центр линзы, не испытывает отклонения, поскольку участки двух преломляющих поверхностей для этого луча могут считаться параллельными, кроме того они находятся на малом расстоянии друг от друга.

– Луч, проходящий через двойной фокус собирающей линзы, после преломления также проходит через двойной фокус. В случае рассеивающей линзы луч, идущий в направлении на двойной фокус, преломляется так, что его продолжение также проходит через двойной фокус.

Кроме того, для построения изображений в тонких линзах используются лучи, параллельные какой-нибудь побочной оптической оси. Луч, параллельный побочной оптической оси OO' собирающей линзы, пересекает заднюю фокальную плоскость линзы в той же точке, что и побочная ось OO' . Луч, падающий на рассеивающую линзу параллельно ее побочной оптической оси OO' , после преломления в линзе идет таким образом, что его продолжение пересекает переднюю фокальную плоскость линзы в точке ее пересечения с побочной оптической осью OO' .

3. Задачи, в которых требуется путем графического построения определить положение линзы, ее тип и положение характерных точек, также решаются на основании свойств характерных лучей для линзы:

4. Решение расчетных задач на преломление света в одиночных линзах сводится, как и в случае зеркал, к составлению основных и вспомогательных уравнений. Полученную систему уравнений решают относительно искомой величины.

Формула увеличения $k = \frac{h}{h_0}$ верна, если размеры предмета во много раз

меньше диаметра линзы, а также он расположен перпендикулярно к главной оптической оси этой линзы.

5. Решение задач на оптические системы, состоящие из нескольких линз, аналогично решению задач на системы зеркал. Расчет размера и положения изображения здесь также основан на принципе обратимости хода световых лучей, из которого следует, что изображение, даваемое первой линзой, можно рассматривать как предмет для второй и т. д. В оптических системах, состоящих из линзы и зеркала, преобразование светового потока происходит трижды. Лучи от светящегося предмета падают на линзу, преломляются в ней и идут на зеркало. Отражаясь от зеркала, они вновь преломляются в линзе и дают окончательное изображение. При составлении уравнений и числовых расчетах всякий раз следует учитывать, является ли промежуточное изображение мнимым или действительным предметом для последующей линзы.

6.4 Примеры решения задач

Пример 1. Определите при каких положениях глаза наблюдатель сможет одновременно видеть в плоском зеркале изображения точки A и отрезка прямой BC , расположенных относительно зеркала так, как показано на рис. 5.

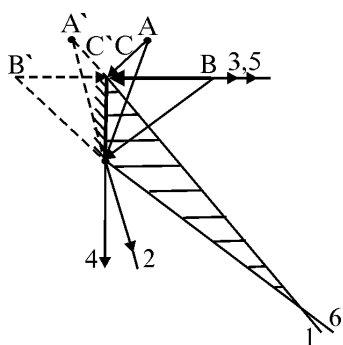


Рис. 5

Решение. Наблюдатель сможет видеть изображение точки A и отрезка прямой BC в том

случае, если в глаз будут попадать отраженные лучи, выходящие до падения на зеркало из точек A , B и C . Лучи 1, 2, выходящие из точки A , после отражения от зеркала образуют расходящийся пучок. Их продолжения пересекаются в точке A' , которая является мнимым изображением точки A . Лучи 3, 4 и 5, 6, выходящие из крайних точек B и C отрезка прямой, после отражения также расходятся, их продолжения пересекаются в точках B' и C' , которые являются мнимыми изображениями точек B и C , соответственно. Изображения остальных точек отрезка BC будут находиться в области, ограниченной третьим и четвертым лучами.

Как видно из рисунка, область пространства, в каждой точке которой встречаются лучи, на продолжении которых находятся мнимые изображения точки A и отрезка BC , заключена внутри заштрихованного треугольника. Глаз наблюдателя должен находиться в любой из точек этого треугольника.

Пример 2. Два плоских зеркала образуют двугранный угол $\varphi = 2\pi/n$, где n — целое число. Точечный источник света S находится между зеркалами на равном расстоянии от каждого из них. Сколько изображений источника получается в зеркалах?

Решение. Чтобы определить полное число возможных изображений, следует иметь в виду, что в данном случае мнимое изображение, даваемое одним зеркалом, будет являться предметом для второго (рис. 6). Из равенства треугольников SOA , SOB , BOS_1 , AOS_2 , ... следует, что источник S и его изображения в зеркалах лежат на окружности с центром в точке O . Получающиеся изображения S_1 , S_2 , S_3 , ... точечного источника света S , разбивают всю окружность на n равных частей. Каждому центральному углу величиной φ соответствует изображение источника в зеркалах, за исключением одного из них, в котором находится сам источник. Поэтому число изображений

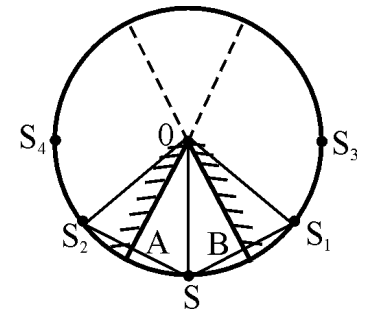


Рис. 6

$$k = \frac{360^\circ}{\varphi} - 1.$$

Пример 3. Светящаяся точка расположена на расстоянии $h_0 = 0,2$ м от главной оптической оси сферического зеркала. Ее изображение находится на расстоянии $h = 0,4$ м от той же оси и на расстоянии $\ell = 0,5$ м от главного фокуса. Определите фокусное расстояние зеркала.

Решение. В задаче ничего не говорится о том, каким является изображение точки — действительным или мнимым, кроме того, не указано какое зеркало используется для получения изображения (вогнутое или выпуклое). Если используется вогнутое зеркало, то изображение может быть либо действительным, либо мнимым. В случае выпуклого зеркала — изображение всегда

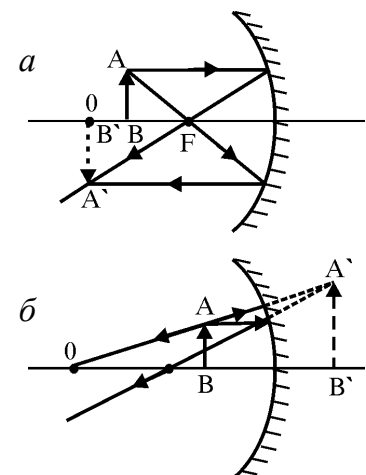


Рис. 7

является мнимым, причем расстояние от изображения до главной оптической оси зеркала меньше чем расстояние от светящейся точки до этой оси (убедитесь в этом самостоятельно). Поэтому для решения задачи следует рассмотреть только два случая изображения в вогнутом зеркале.

В случае действительного изображения (рис. 7, а), светящаяся точка A находится за фокусом зеркала. Ее можно считать принадлежащей некоторому предмету AB , расположенному перпендикулярно к главной оптической оси зеркала. Поскольку изображение действительное, то

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}.$$

Увеличение зеркала равно отношению размеров изображения к размерам предмета, т. е. $k = h/h_0$. С другой стороны, $k = f/d$. По условию задачи расстояние между фокусом и изображением равно ℓ , следовательно,

$$f = F + \ell.$$

С учетом этого $\frac{h}{h_0} = \frac{F + \ell}{d}$, откуда $d = \frac{F + \ell}{h} h_0$. Если подставить значения f и d в формулу зеркала, то ее можно записать в виде:

$$\frac{h}{F + \ell h_0} + \frac{1}{F + \ell} = \frac{1}{F}.$$

Решив последнее уравнение относительно F , получим $F = \frac{h_0 \ell}{h}$.

Численно: $F = 0,15$ м.

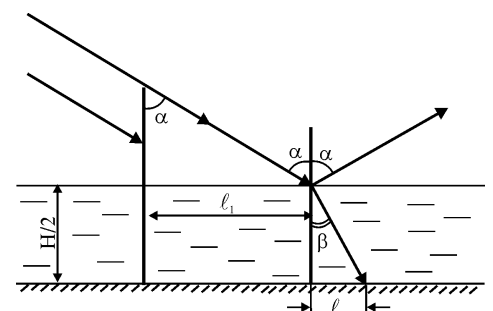
Если изображение мнимое (рис. 4.4, в), то $f = \ell - F$, $d = \frac{f h_0}{h} = \frac{(\ell - F) h_0}{h}$. Подставив значения f и d в формулу зеркала $\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$, для этого случая получим $\frac{h_1}{\ell - F h_0} - \frac{1}{\ell - F} = \frac{1}{F}$. Откуда $F = \frac{h_0 \ell}{h}$.

Численно: $F = 0,15$ м.

Аналитические выражения для определения фокусного расстояния зеркала и его числовое значение в обоих случаях получилось одинаковым, что свидетельствует о правильности решения задачи.

Пример 4. Свая высотой H , установленная перпендикулярно к плоскости горизонтального дна водоема, наполовину выступает над водой. Определите длину тени от сваи на дне водоема при ее освещении солнечным светом, если известно, что в конечной точке тени на поверхности воды отраженный луч перпендикулярен к преломленному.

Решение. В соответствии с законом преломления $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$, где n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления воздуха и воды, соответственно, α — угол падения луча на границу раздела воздух—вода, β —



соответствующий ему угол преломления (рис. 8).

Из рисунка видно, что длина тени на дне водоема $l = l_1 + l_2$. Причем $l_1 = \frac{1}{2} H \operatorname{tg} \alpha$, $l_2 = \frac{1}{2} H \operatorname{tg} \beta$, т. е. .

Принимая во внимание, что $n_1 = 1$ и, кроме того $\alpha + \beta = 90^\circ$, т. е. $\beta = 90 - \alpha$, закон преломления можно записать в виде

$$\frac{\sin \alpha}{\sin 90 - \alpha} = n_2 \quad \text{или} \quad \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = n_2. \quad \text{Откуда} \quad \operatorname{tg} \alpha = n_2. \quad \text{С другой стороны,}$$

$$\alpha = 90 - \beta, \quad \text{т. е.} \quad \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} 90 - \beta = \operatorname{ctg} \beta = 1 / \operatorname{tg} \beta, \quad \text{т. е.} \quad \operatorname{tg} \beta = 1 / n_2.$$

Следовательно, искомая длина тени на дне водоема

$$l = \frac{H}{2} \frac{n_2^2 + 1}{n_2}.$$

Пример 5. Абсолютный показатель преломления атмосферы некоторой планеты уменьшается с высотой h над ее поверхностью по закону $n = n_0 - \alpha h$. На какой высоте над поверхностью планеты находится оптический канал, по которому световые лучи будут обходить планету, оставаясь на постоянной высоте, если радиус планеты R_0 ?

Решение. Так как абсолютный показатель преломления атмосферы планеты изменяется, то она является оптически неоднородной средой. Следовательно, траектория светового луча в атмосфере в общем случае представляет собой некоторую кривую. По условию задачи внутри

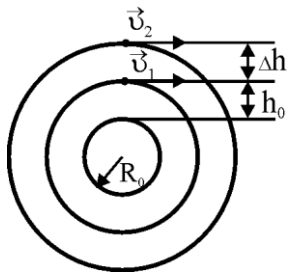


Рис. 9

оптического канала траекторией каждого луча является окружность соответствующего радиуса, центр которой совпадает с центром планеты. Для луча, соответствующего нижней точке волнового фронта, радиус этой окружности $r_1 = R_0 + h_0$ (h_0 — искомая высота). Для луча, соответствующего верхней точке волнового фронта — $r_2 = R_0 + h_0 + \Delta h$ (Δh — ширина оптического канала) (рис. 9).

Так как все точки участка волнового фронта, находящегося внутри оптического канала, должны сделать полный оборот вокруг планеты за одно и тоже время (только в этом случае траекторией каждого луча будет окружность постоянного радиуса), то время обхода планеты обоими лучами должно быть одинаковым, т. е. $t_1 = t_2$.

С другой стороны

$$t_1 = \frac{2\pi r_1}{v_1} = \frac{2\pi(R_0 + h_0)}{v_1}; \quad t_2 = \frac{2\pi r_2}{v_2} = \frac{2\pi R_0 + h_0 + \Delta h}{v_2},$$

где $v_1 = \frac{c_1}{n_1} = \frac{c}{n_0 + \alpha h_0}$ — скорость света на высоте h_0 ,

$v_2 = \frac{c}{n_2} = \frac{c}{n_0 + \alpha h_0 + \Delta h}$ — скорость света на высоте $h_0 + \Delta h$. Следовательно,

$$\frac{2\pi R_0 + h_0}{c} n_0 + \alpha h_0 = \frac{2\pi R_0 + h_0 + \Delta h}{c} R_0 + \alpha(h_0 + \Delta h) .$$

Откуда после несложных преобразований получим $2h_0\alpha = n_0 - R_0\alpha - \alpha\Delta h$, т. е.

$$h_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{n_0}{\alpha} - R_0 - \Delta h \right) .$$

Проанализируем полученный результат.

1. Так как h_0 не может быть отрицательным числом, то полученное выражение является ответом задачи при условии, что $\frac{n_0}{\alpha} \geq R_0 + \Delta h$.

2. Если ширина оптического канала мала по сравнению с радиусом планеты, т. е. $\Delta h \ll R_0$, то $h_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{n_0}{\alpha} - R_0 \right)$. В этом случае отношение $\frac{n_0}{\alpha}$ должно быть больше чем R_0 .

3. Если $\frac{n_0}{\alpha} < R_0 + \Delta h$ (соответственно в случае узкого канала $\frac{n_0}{\alpha} < R_0$), то $h_0 < 0$. Физически это означает, что в данном случае оптический канал, удовлетворяющий требованиям задачи, в атмосфере планеты отсутствует.

4. Если же $\frac{n_0}{\alpha} = R_0 + \Delta h$ (для узкого канала $\frac{n_0}{\alpha} = R_0$), то $h_0 = 0$, т. е. оптический канал находится у поверхности планеты. Заметим, что физическое явление, рассмотренное в данном примере, называют круговой рефракцией света. Оно реально возможно, например, в атмосфере Венеры.

Пример 6. Точечный источник света находится на главной оптической оси тонкой собирающей линзы. С другой стороны линзы на расстоянии L_0 от источника расположен экран, плоскость которого перпендикулярна к главной оптической оси линзы. При каком положении линзы диаметр светового пятна на экране будет минимальным?

Решение. Будем считать пучок лучей узким. В этом случае изображение точечного источника света также будет точечным. Предположим, что источник света находится на расстоянии x от оптического центра линзы, причем $x > F$, тогда его действительное изображение должно находиться на расстоянии f от нее. Причем эти расстояния связаны формулой

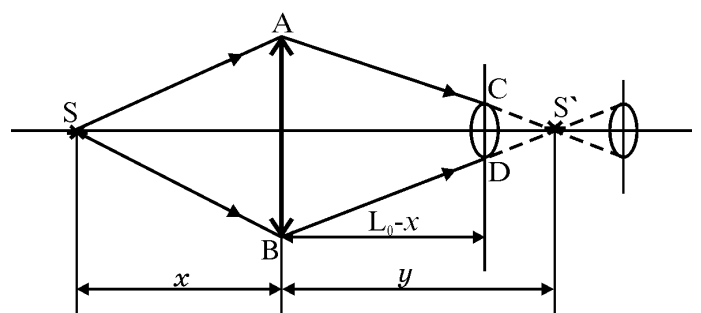


Рис. 10

тонкой линзы, т. е. $1/x + 1/f = 1/F$. Расстояние f можно выразить через диаметры линзы D и пятна d (рис. 10).

Из подобия треугольников ABS' и CDS' следует, что $\frac{d}{D} = \frac{f - L_0 - x}{f}$.

Откуда $f = \frac{D(L_0 - x)}{D - d}$. Подставив значение f в формулу линзы получим

$\frac{1}{x} + \frac{D - d}{D L_0 - x} = \frac{1}{F}$. Следовательно, диаметр пятна на экране

$d = \frac{x D}{F} - \frac{D L_0}{F} + \frac{D L_0}{x}$. Таким образом, диаметр пятна является функцией

координаты расстояния от источника до линзы, т. е. $d = d(x)$.

Для определения минимального значения d воспользуемся тем, что в точке минимума производная от диаметра пятна по координате обращается в нуль. Принимая во внимание, что $d'(x) = \frac{D}{F} - \frac{D L_0}{x^2}$, причем при $x = x_0$

$d'(x_0) = 0$, получим $\frac{D}{F} - \frac{D L_0}{x_0^2} = 0$. Откуда $x_0 = \sqrt{L_0 F}$.

Следовательно $d_{\min} = D \left(2\sqrt{\frac{L_0}{F}} - \frac{L_0}{F} \right)$.

Числовое значение диаметра пятна на экране не может быть отрицательным или равным нулю, поэтому полученное значение d_{\min}

является решением задачи при условии, что $2\sqrt{\frac{L_0}{F}} - \frac{L_0}{F} \geq 0$, т. е. если $4F \geq L_0$.

Если $L_0 = 4F$, то $d_{\min} = 0$, т. е. пятно превращается в точку. В этом случае экран пересекает главную оптическую ось линзы в той точке, где находится действительное изображение источника света.

Если $L_0 > 4F$, т. е., если экран находится по другую сторону

изображения источника в линзе, то $\frac{d}{D} = \frac{-f + L_0 - x}{f}$. В этом случае

$f = \frac{D L_0 - x}{D + d}$, следовательно, $\frac{1}{x} + \frac{D + d}{D L_0 - x} = \frac{1}{F}$. Откуда

$d = \frac{D L_0}{F} - \frac{D x}{F} - \frac{D L_0}{x}$. Покажите самостоятельно, что в этом случае

$d_{\min} = D \left(\frac{L_0}{F} - 2\sqrt{\frac{L_0}{F}} \right)$.

Подчеркнем, что полученное выражение для d_{\min} является решением задачи при условии, что $\frac{L_0}{F} - 2\sqrt{\frac{L_0}{F}} \geq 0$, т. е. если $L_0 > 4F$. Причем как и в первом случае при $L_0 = 4F$ $d_{\min} = 0$.

И наконец, если $x < F$, то изображение источника в линзе будет мнимым, а пучок лучей, выходящий из нее, расходящимся. Поэтому диаметр пятна будет тем больше, чем дальше находится линза от экрана. Если $F \geq L_0$, то $x < F$ для всех возможных значений x . В этом случае диаметр пятна d минимален при $x_0 = L_0$, т. е. когда линза расположена вплотную к экрану.

Таким образом, если источник находится между фокусом и линзой, то размер пятна минимален при $x_0 = L_0$; если источник находится за фокусом линзы, то размер пятна минимален при $x_0 = \sqrt{L_0 F}$.

Пример 7. На главной оптической оси тонкой собирающей линзы с фокусным расстоянием F на расстоянии d от нее находится точечный источник света. С другой стороны линзы на расстоянии ℓ от нее находится плоское зеркало, расположенное перпендикулярно к главной оптической оси линзы. Определите положение изображения в рассматриваемой оптической системе.

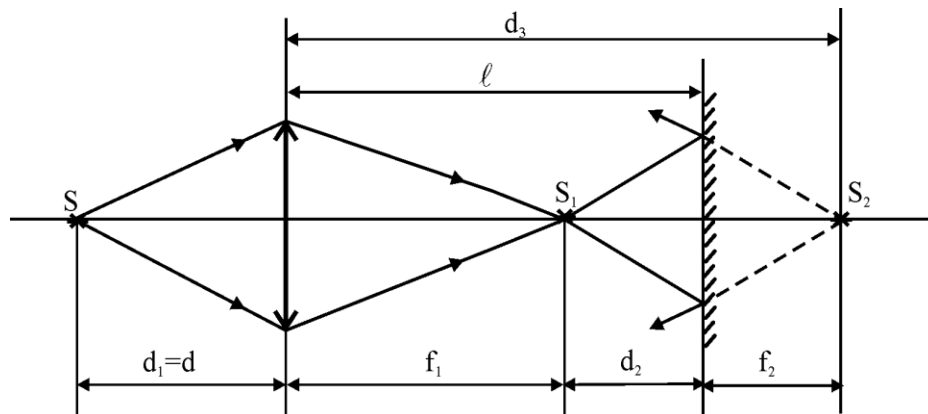


Рис. 11

Решение. Анализ ситуации, рассматриваемой в задаче, показывает, что лучи от источника света, попав на линзу, преломляются в ней, затем отражаются от плоского зеркала и после повторного преломления в линзе, распространяются в обратном направлении (рис. 11). После первого преломления лучи сойдутся в точке S_1 , расположенной на расстоянии f_1 от линзы, причем $\frac{1}{d} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{F}$. Изображением точки S_1 в плоском зеркале будет точка S_2 , расположенная на расстоянии $d_2 = \ell - f_1$ за зеркалом. Отразившись от зеркала, лучи снова падают на линзу, как бы исходя из точки S_2 , которая является мнимым точечным источником света, находящимся на расстоянии

$d_3 = 2\ell - f_1$ от нее. После преломления линзой лучи, или их продолжения, сойдутся на расстоянии f_3 от нее, причем $\frac{1}{f_3} = \frac{1}{F} - \frac{1}{d_3} = \frac{1}{F} - \frac{1}{2\ell - f_1}$, откуда

$$f_3 = \frac{F[2\ell \cdot 1/F - 1/d - 1]}{2\ell \cdot 1/F - 1/d + F/d - 2}.$$

Проанализируем полученный результат. Очевидно, что если точка S_2 окажется между линзой и ее первым фокусом, т. е. если $d_3 < F$, то изображение в системе будет мнимым. В этом случае точка S_1 должна находиться за зеркалом на расстоянии $d_2 > \ell - F$ от него и на расстоянии $f_1 > 2\ell - F$ от линзы. Из формулы линзы следует, что в этом случае $d = \frac{Ff_1}{f_1 - F}$, т. е. источник находится от линзы на расстоянии $d < \frac{F(2\ell - F)}{2(\ell - F)}$, причем его изображение в системе будет мнимым. В частном случае, если зеркало расположено вплотную к линзе ($\ell = 0$) изображение окажется мнимым, причем $d < F/2$.

Если $d > \frac{F(2\ell - F)}{2(\ell - F)}$, то изображение источника света в системе будет

действительным.

Пример 8. Оптическая система состоит из двух собирающих линз с фокусными расстояниями $F_1 = 10$ см и $F_2 = 8$ см, главные оптические оси которых совпадают, расположенных на расстоянии $\ell = 50$ см друг от друга. На расстоянии $d_1 = 15$ см перед первой линзой находится предмет. Определите положение изображения и его увеличение в данной оптической системе.

Решение. Лучи, выходящие из любой точки предмета после преломления сначала в первой, а затем во второй линзе, могут образовывать либо сходящийся, либо расходящийся пучок. В первом случае изображение этой точки в рассматриваемой оптической системе будет действительным, во втором — мнимым. Для построения изображения рассматриваемой точки

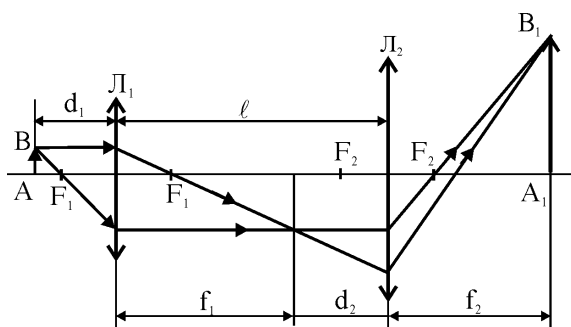


Рис. 12

можно воспользоваться любыми двумя характерными лучами, выходящими из нее. В качестве такой координаты выберем точку B , которая является одной из крайних точек предмета, считая его плоским и расположенным перпендикулярно к главной оптической оси (рис. 12). Будем считать, что размеры обеих линз больше линейных размеров предмета. Для построения изображения точки B в

рассматриваемой оптической системе воспользуемся лучом, падающим на

первую линзу параллельно главной оптической оси системы, и лучом, проходящим через передний фокус первой линзы. Второй луч после преломления в первой линзе идет параллельно главной оптической оси системы и, преломившись во второй линзе, проходит через ее задний фокус. Первый луч после преломления в первой линзе проходит через ее задний фокус и падает на вторую линзу под произвольным углом, поэтому его направление после преломления во второй линзе определяем с помощью побочной оптической оси. После преломления в оптической системе лучи, вышедшие из точки B , пересекаются в точке B_1 . Поэтому изображение этой точки предмета в системе является действительным. Аналогично можно показать, что изображения всех остальных точек предмета также будут действительными.

Для определения положения изображения воспользуемся формулой тонкой линзы. Сначала определим положение изображения в первой линзе

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{F_1}, \text{ откуда } f_1 = \frac{d_1 F_1}{d_1 - F_1}.$$

Как видно из рисунка, расстояние от изображения, полученного в первой линзе, до второй линзы $d_2 = \ell - f_1$. Следовательно, $f_2 = \frac{d_2 F_2}{d_2 - F_2}$.

Подставив значение d_2 в последнюю формулу, получим окончательно

$$f_2 = \frac{F_2 \ell d_1 - F_1 d_1 F_1}{d_1 - F_1 \ell - F_2 d_1 F_1}.$$

Увеличение системы равно произведению увеличений первой и второй линз (докажите это самостоятельно), т. е. $k = k_1 \cdot k_2 = \frac{f_1}{d_1} \cdot \frac{f_2}{d_2}$.

$$\text{Следовательно } k = \frac{F_1 F_2}{d_1 - F_1 \ell - F_2 d_1 F_1}.$$

Численно: $f_2 = 13,3$ см, $k = 1,33$.

6.5 Задачи для самостоятельного решения

6.1. Солнечные лучи, падающие под некоторым углом на плоское горизонтальное зеркало, на котором лежит непрозрачный шар, после отражения попадают на вертикальный экран. Путем построения определите размеры тени на экране.

6.2. Плоское зеркало движется со скоростью 2 м/с в направлении, перпендикулярном плоскости зеркала, а точечный источник света, скорость которого 3 см/с, движется в направлении, параллельном плоскости зеркала. С какой скоростью и в каком направлении движется изображение источника?

6.3. Шкала зеркального гальванометра находится на расстоянии 2 м от зеркальца гальванометра. На какой угол повернулось зеркальце, если зайчик сместился на расстояние 50 см от центра шкалы?

6.4. Плоское зеркало, помещенное в центр сферического зеркала радиусом 10 м, вращается с постоянной скоростью, делая 0,5 оборота в секунду. Определите скорость перемещения «зайчика» по экрану.

6.5. Точечный источник света и два его изображения, полученные с помощью двух плоских зеркал, находятся в вершинах равностороннего треугольника. Как расположены зеркала?

6.6. Два плоских зеркала образуют двугранный угол равный 60° . Определите число изображений точечного источника S , расположенного на биссектрисе этого угла.

6.7. Точечный источник света находится на оси выпуклого сферического зеркала, на расстоянии ℓ от его оптического центра. Определите радиус зеркала, если расстояние между источником и его изображением равно L .

6.8. Определите радиус вогнутого зеркала, если действительное изображение предмета, расположенного на расстоянии 20 см от вогнутого зеркала, в 1,5 раза больше, чем изображение этого же предмета в плоском зеркале?

6.9. Если предмет находится на расстоянии 2 м от вогнутого сферического зеркала, то его действительное изображение получается на расстоянии 50 см от зеркала. Где получится изображение этого предмета, если его приблизить к зеркалу на 1,9 м?

6.10. В центре вогнутого сферического зеркала радиусом 80 см находится полюс выпуклого зеркала с фокусным расстоянием 40 см. Между фокусом и центром вогнутого зеркала на расстоянии 50 см от его полюса перпендикулярно к оптической оси расположен предмет высотой 2 см. Определите положение и высоту изображения в этой оптической системе.

6.11. Два одинаковых вогнутых зеркала радиусами по 80 см, расположены вдоль общей оптической оси так, что их фокусы совпадают. На расстоянии 60 см от полюса одного из них находится точечный источник света. Определите положение изображения в этой оптической системе.

6.12. Внутренняя поверхность стенок шара радиусом 36 см зеркальная. На расстоянии $R/2$ от центра шара помещен точечный источник, посылающий свет к наиболее удаленной части шара. Где будет находиться изображение источника? Как изменится положение изображения, если источник будет посылать свет к ближней стенке?

6.13. Докажите, что глубина водоема, определяемая по глазомерной оценке, если смотреть по вертикальному направлению, составляет $3/4$ его истинной глубины.

6.14. С подводной лодки, которая находится в погруженном состоянии, на малой глубине определили скорость самолета, пролетающего над лодкой. Во сколько раз кажущаяся скорость самолета отличается от его истинной скорости?

6.15. Луч света падает на горизонтально расположенную стеклянную пластинку и преломляется в ней под углом β . Как изменится угол преломления, если на пластину налить слой жидкости толщиной h ?

6.16. На плоскопараллельную пластинку с показателем преломления n падает монохроматический пучок света под углом α . Определите толщину пластинки, если расстояние между лучами, отраженными от ее верхней и нижней граней, равно d .

6.17. Точечный источник света расположен на расстоянии 1,5 см от передней грани плоскопараллельной пластинки, задняя грань которой посеребрена. Абсолютный показатель преломления стекла равен 1,6, а толщина 1,2 см. Определите расстояние между источником и его изображением.

6.18. На дне сосуда, заполненного водой, лежит плоское зеркало. Человек, наклонившись над сосудом, видит изображение своего глаза в зеркале на расстоянии 25 см. Определите высоту столба воды в сосуде, если расстояние от глаза до поверхности воды равно 5 см.

6.19. Призма сделана из стекла с абсолютным показателем преломления 1,75. Преломляющий угол призмы равен 60° . При каком угле падения на одну из граней призмы, выход луча из второй грани становится невозможным?

6.20. Луч света, внутри трехгранной стеклянной призмы с преломляющим углом 60° и абсолютным показателем преломления 1,7, идет параллельно основанию. Определите угол отклонения луча от первоначального направления после выхода из призмы.

6.21. У призмы с преломляющим углом 35° одна грань посеребрена. Луч, падающий на другую грань под углом 60° , после преломления и отражения от посеребренной грани возвращается назад по прежнему направлению. Определите абсолютный показатель преломления призмы.

6.22. Каким должен быть наименьший показатель преломления стекла, чтобы свет не мог выйти через боковую поверхность цилиндрического световода независимо от угла падения луча на торец световода?

6.23. Стеклянный куб лежит на монете. При каких значениях абсолютного показателя преломления стекла монета не видна через его боковые грани?

6.24. На дно цилиндрического сосуда, высота стенок которого равна диаметру дна, положен диск вдвое меньшего диаметра, так что центры дна и диска совпадают. Наблюдатель видит лишь крайнюю точку дна. Какую часть объема сосуда надо заполнить водой, чтобы наблюдатель увидел хотя бы краешек диска?

6.25. Расстояние между предметом и его изображением в собирающей линзе 15 см. Определите оптическую силу линзы, если изображение предмета в 2 раза больше самого предмета.

6.26. Тонкая линза дает мнимое изображение предмета, размеры которого в 2 раза меньше самого предмета. Если предмет сместить на 10 см вдоль оптической оси, то его изображение уменьшится еще в два раза. Определите первоначальное положение предмета и оптическую силу линзы.

6.27. С помощью тонкой собирающей линзы с абсолютным показателем преломления 1,5 получено действительное изображение

предмета на расстоянии 10 см от нее. После того как предмет и линзу, не меняя расстояния между ними, поместили в воду, изображение получилось на расстоянии 60 см от линзы. Определите фокусное расстояние линзы в воздухе.

6.28. Воздушная линза, образованная двумя часовыми стеклами с различными радиусами кривизны, помещена в воду. Определите фокусное расстояние этой линзы, если стеклянная линза такой же формы имеет в воздухе фокусное расстояние 40 см. Абсолютный показатель преломления стекла равен $3/2$.

6.29. Если на пути сходящегося пучка лучей поместить тонкую собирающую линзу с фокусным расстоянием 7 см, то лучи пересекутся в точке, отстоящей на расстоянии 5 см от линзы. На каком расстоянии от местоположения линзы пересекутся лучи, если линзу убрать?

6.30. На пути сходящегося пучка лучей поставили собирающую линзу с фокусным расстоянием 7 см. После преломления в линзе лучи собираются в точке на расстоянии 5 см от нее. На каком расстоянии от точки соберутся лучи, если линзу убрать?

6.31. Собирающая линза с фокусным расстоянием 6 см вставлена в отверстие радиусом 3 см, которое находится в непрозрачной преграде. На экране, расположенном на расстоянии 0,16 м от преграды, получено четкое изображение точечного источника света. Определите радиус светлого круга на экране после того, как линзу вынули из отверстия?

6.32. Расстояние между двумя точечными источниками равно 24 см. Где между ними надо поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием 9 см, чтобы изображения обоих источников совпали?

6.33. Вдоль главной оптической оси линзы расположен тонкий стержень длиной 15 см. При этом действительные изображения концов стержня в линзе оказались на расстояниях 36 см и 60 см от ее оптического центра. Определите фокусное расстояние линзы и продольное увеличение.

6.34. С помощью тонкой линзы получено изображение трезубца, зубья которого находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, а основание лежит на главной оптической оси линзы (рис. 13) Отрезок AB изображается с шестикратным увеличением, а отрезок BC — с трехкратным. Определите увеличение отрезка BD .

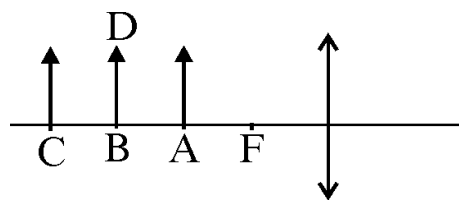


Рис. 13

6.35. На главной оптической оси собирающей линзы находится точечный источник света. По другую сторону линзы один раз на расстоянии 27 см, а другой — 48 см от нее ставится экран. Определите фокусное расстояние линзы, если размеры светового пятна на экране в обоих случаях одинаковы.

6.36. Расстояние между предметом и его изображением в рассеивающей линзе равно 32 см. Определите расстояние от предмета до линзы, если ее фокусное расстояние равно 10 см.

6.37. Собирающая линза с фокусным расстоянием 2 м помещена между двумя точечными источниками в четыре раза ближе к одному из них, чем к другому. Определите расстояние между источниками, если расстояние между их изображениями в линзе равно 2 м (изображения по одну сторону линзы).

6.38. Сходящийся пучок лучей после преломления в рассеивающей линзе пересекается в точке, расположенной на главной оптической оси на расстоянии 15 см от линзы. Если линзу убрать, лучи пересекаются в точке, расположенной на 5 см ближе. Определите фокусное расстояние линзы.

6.39. Цилиндрический пучок лучей диаметром 1 см, падающих на рассеивающую линзу параллельно главной оптической оси, пройдя через линзу, дает на экране пятно диаметром 3,5 см. Каким будет диаметр пятна, если рассеивающую линзу заменить собирающей с таким же фокусным расстоянием?

6.40. Экран расположен на расстоянии 21 см от отверстия, в которое вставлена линза диаметром 5 см. На линзу падает сходящийся пучок лучей от точечного источника, в результате чего на экране образуется четкое изображение его. Определите фокусное расстояние линзы, если после ее удаления диаметр пятна на экране 3 см.

6.41. Точечный источник света расположен на расстоянии 30 см от тонкой линзы, оптическая сила которой 5 дптр. На какое расстояние сместится изображение источника, если между ним и линзой поместить стеклянную пластинку толщиной 15 см с абсолютным показателем преломления $n = 1,5$.

6.42. Точечный источник света помещен на главной оптической оси линзы с фокусным расстоянием 8 см на расстоянии 12 см от нее. Линза начинает смещаться в направлении перпендикулярном к своей главной оптической оси со скоростью 1 см/с. Определите скорость перемещения изображения источника света?

6.43. Человек с близорукими глазами может читать мелкий шрифт на расстоянии не более 20 см от глаз. Определите оптическую силу очков, восполняющих этот недостаток зрения.

6.44. Дальнозоркий человек видит буквы в книге с расстояния 80 см. Определите оптическую силу очков, необходимых ему для чтения с расстояния 25 см.

6.45. Определите фокусное расстояние объектива проекционного фонаря, дающего 20-кратное увеличение, если расстояние от предмета до экрана 8 м.

6.46. Лупа дает изображение предмета, увеличенное в 4 раза. Если предмет приблизить к ней на 0,4 см, то увеличение становится пятикратным. Определите оптическую силу лупы.

6.47. Один и тот же предмет фотографируют дважды с расстояний 90 см и 165 см. Высоты изображений предмета на пленке оказались равными 4 см и 2 см, соответственно. Определите фокусное расстояние объектива.

6.48. С помощью фотоаппарата, оптическая сила объектива которого 8 дптр, фотографируют предмет, находящийся на дне водоема глубиной 1,2 м. Определите расстояние между объективом и пленкой, если он расположен у поверхности воды.

6.49. Две собирающие линзы с фокусными расстояниями по 10 см каждая расположены на общей оптической оси на расстоянии 20 см друг от друга. На расстоянии 25 см перед первой линзой находится предмет. Определите расстояние между предметом и его изображением в системе.

6.50. Собирающая линза с фокусным расстоянием 4 см и рассеивающая с фокусным расстоянием 5 см расположены на расстоянии 16 см вдоль общей главной оптической оси. На расстоянии 10 см от собирающей линзы находится предмет. Определите положение изображения.

6.51. Собирающая и рассеивающая линзы с фокусными расстояниями по 10 см каждая расположены на расстоянии 5 см вдоль общей главной оптической оси. Где получится изображение бесконечно удаленного предмета в этой системе?

7. Контрольный тест по учебному модулю № 1 «Фотометрия. Геометрическая оптика»

Вариант 1

1.1 Если лучи света падают на поверхность воды под углом $\alpha = 50^\circ$, то угол преломления их

- 1) $\beta = 50^\circ$; 2) $\beta < 50^\circ$; 3) $\beta > 50^\circ$; 4) $\beta = 90^\circ$; 5) $\beta > 90^\circ$.

2.2 Если скорость человека, движущегося в направлении к вертикальному плоскому зеркалу $g_1 = 1,5 \frac{m}{c}$, то скорость приближения его к своему изображению g_2 равна

- 1) $1,5 \frac{m}{c}$; 2) $2,0 \frac{m}{c}$; 3) $2,5 \frac{m}{c}$; 4) $3,0 \frac{m}{c}$; 5) $3,5 \frac{m}{c}$.

3.2 Если на собирающую линзу падает пучок лучей из точки S, как показано на рис. 14, то эти лучи после линзы пойдут

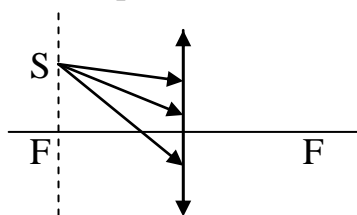


Рис. 14

- 1) параллельно главной оптической оси;
2) через второй фокус линзы;
3) расходящимся пучком;
4) сходящимся пучком;
5) параллельным пучком под некоторым углом к главной оптической оси.

4.2 Если световой луч, частота которого $\nu = 7,0 \cdot 10^{14}$ Гц, переходит из вакуума в воду ($n_1 = 1,33$), то изменение длины волны $\Delta\lambda$ при этом равно
1) $0,50 \cdot 10^{-7}$ м; 2) $1,1 \cdot 10^{-7}$ м; 3) $1,2 \cdot 10^{-7}$ м; 4) $1,5 \cdot 10^{-7}$ м; 5) $2,5 \cdot 10^{-7}$ м.

5.3 Если скорость распространения света в веществе $g = 1,5 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$, то предельный угол полного внутреннего отражения для этого вещества γ равен
1) 30° ; 2) 45° ; 3) 60° ; 4) 75° ; 5) 90° .

6.3 Луч света, последовательно отразившись от трех взаимно перпендикулярных плоских зеркал, распространяется
1) в первоначальном направлении; 2) в обратном направлении;
3) параллельно второму зеркалу; 4) параллельно третьему зеркалу;
5) перпендикулярно второму зеркалу.

7.3 Если фокусное расстояние собирающей линзы $F = 25$ см, а расстояние от предмета высотой $h = 1$ см до фокуса $r = 5$ см, то высота изображения h_1 равна ... см.

8.3 Луч света, падая на некоторую поверхность, частично отражается, а частично преломляется. Если угол падения превышает в 2 раза угол преломления и равен $\alpha = 60^\circ$, то угол между отраженным и преломленным лучами γ равен ... $^\circ$.

9.4 Если мнимое изображение получается в фокальной плоскости собирающей линзы, то сам предмет находится от линзы на расстоянии d , равном ... F .

10.5 Если собирающая и рассеивающая линзы, имеющие общую оптическую ось и одинаковые фокусные расстояния $F = 20$ см, расположены на расстоянии $r = 25$ см друг от друга, то, чтобы получить параллельный пучок света, необходимо расположить точечный источник света перед собирающей линзой на расстоянии d , равном ... см.

Вариант 2

1.1 Показатель преломления воды ($n_1 = 1,33$) относительно алмаза ($n_2 = 2,42$) равен
1) 0,30; 2) 0,35; 3) 0,40; 4) 0,45; 5) 0,55.

2.2 Горизонтальный луч света падает на вертикально расположенное зеркало. Если зеркало поворачивается за некоторый промежуток времени Δt на угол α около вертикальной оси, то угол поворота отраженного луча α_1 равен

- 1) $0,5 \alpha$; 2) α ; 3) $1,2 \alpha$; 4) $1,5 \alpha$; 5) 2α .

3.2 Если световой луч в перископе распространяется так, как показано на рис. 15, то поворот луча на 90° осуществляется благодаря

- 1) отражению луча в т. А;
- 2) отражению луча в т. В;
- 3) преломлению луча в т. В;
- 4) полному внутреннему отражению в т. А и В;
- 5) отражению и преломлению в т. А и В.

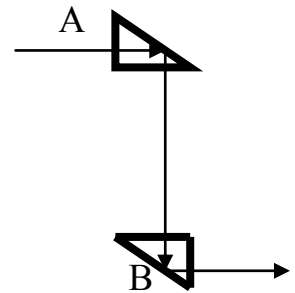


Рис. 15

4.2 Если луч света входит в стеклянную призму под углом α , а выходит из призмы в воздух под углом β , причем, пройдя призму, он отклоняется от первоначального направления на угол γ , то угол при вершине призмы φ равен

- 1) $\alpha + \beta$; 2) $\alpha + \beta - \gamma$; 3) $\alpha + \beta + \gamma$; 4) $\alpha + \gamma$; 5) $\alpha - \gamma$.

5.3 Если смотреть в глубь водоёма вертикально вниз, то отношение истинной его глубины H к кажущейся глубине h (рис. 16) равно

- 1) $0,25 n$; 2) $0,30 n$; 3) $0,50 n$;
4) $0,60 n$; 5) $1,0 n$.

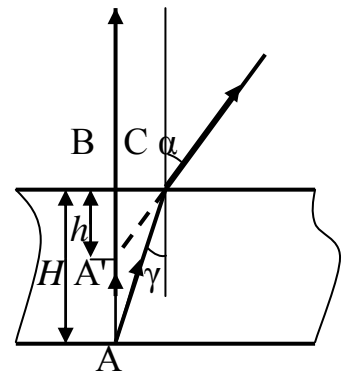


Рис. 16

6.3 Если изображение предмета, расположенного на расстоянии $d = 3,8$ см от линзы, в 4,5 раза больше самого предмета, то оптическая сила линзы D равна

- 1) 10 дптр; 2) 12 дптр; 3) 15 дптр; 4) 16 дптр; 5) 20 дптр.

7.3 Биолог, рассматривая спору гриба в микроскоп, определил диаметр её изображения $d_1 = 12$ мм. Если объектив микроскопа дает увеличение 100^* , а окуляр - 6^* , то истинный размер объекта d_0 равен ... мкм.

8.3 Если для луча света, который выходит из вещества в воздух, предельный угол полного внутреннего отражения для данного вещества $\gamma = 45^\circ$, то скорость распространения света в веществе ϑ равна ... $\frac{M}{c}$.

9.4 Если фокусное расстояние линзы равно радиусу кривизны ее поверхностей, то показатель преломления n стекла, из которого сделана симметричная собирающая линза, равен

10.5 Если точечный источник света расположен на оптической оси системы, состоящей из вогнутого зеркала с радиусом кривизны $R = 20$ см и собирающей линзы с оптической силой $D = 5$ дптр, на расстоянии $d_1 = 40$ см от линзы, а зеркало находится на расстоянии $d_2 = 30$ см по другую сторону линзы, то изображение источника в системе получается от линзы на расстоянии f_1 , равном ... см.

Вариант 3

1.1 Полное внутреннее отражение света наблюдается

- 1) при переходе света из менее оптически плотной среды в более оптически плотную;
- 2) при переходе света из воздуха в воду;
- 3) при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную;
- 4) при преломлении света в линзе;
- 5) при переходе света из воздуха в стекло.

2.2 Если угол падения луча на плоское зеркало увеличить на $\Delta\alpha = 15^\circ$, то угол между падающим и отраженным лучами γ изменится на

- 1) 20° ;
- 2) 25° ;
- 3) 30° ;
- 4) 35° ;
- 5) 40° .

3.2 Если предмет AB и его изображение $A'B'$ расположены так, как показано на рис. 17, то оптический центр линзы при этом расположен

- 1) на линии BA' ;
- 2) в точке пересечения линий AA' и BB' ;
- 3) в точке пересечения продолжений линий $A'B$ и $B'A$;
- 4) на линии AB' ;
- 5) в точке пересечения продолжений линий AB и $B'A'$.

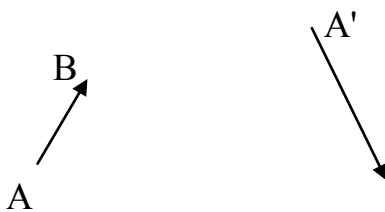


Рис. 17

4.2 В воде на расстоянии $r = 20$ м один водолаз передает другому сигнал с помощью белого света. Если показатель преломления для красных лучей в воде $n_{кр} = 1,329$, для фиолетовых – $n_{ф} = 1,344$, то красные лучи по сравнению с фиолетовыми попадут в глаз наблюдателя раньше на интервал времени Δt , равный

- 1) 0,19 нс;
- 2) 0,45 нс;
- 3) 0,48 нс;
- 4) 0,56 нс;
- 5) 1,0 нс.

5.3 Луч света падает на горизонтально расположенную плоскопараллельную стеклянную пластинку и преломляется в ней под углом β . Если на пластинку налили слой жидкости, то угол преломления β_1 в стекле равен

- 1) $0,25 \beta$; 2) $0,30 \beta$; 3) $0,50 \beta$; 4) $1,0 \beta$; 5) $2,0 \beta$.

6.3 С помощью собирающей линзы получается мнимое изображение предмета, втрое большее самого предмета. Если фокусное расстояние линзы равно $F = 15$ см, то предмет при этом следует расположить от линзы на расстоянии d , равном

- 1) $0,05$ м; 2) $0,10$ м; 3) $0,12$ м; 4) $0,15$ м; 5) $0,20$ м.

7.3 При падении на плоскую границу раздела двух сред луч света частично отражается, частично преломляется. При этом отраженный луч перпендикулярен преломленному лучу. Если угол преломления $\beta = 30^\circ$, то угол падения α равен \dots° .

8.3 Если точечный источник света S расположить на биссектрисе прямого угла, образованного двумя плоскими зеркалами (рис. 18), то количество изображений его в зеркалах n будет равно \dots .

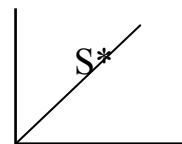


Рис. 18

9.4 На экране получены два четких изображения предмета высотой $h = 4$ см при двух разных положениях линзы между предметом и экраном. Если высота одного изображения $h_1 = 2$ см, то другого – $h_2 = \dots$ см.

10.5 Если на главной оптической оси линзы с фокусным расстоянием $F = 10$ см расположить точечный источник света, то наименьшее расстояние между источником и его действительным изображением r будет равно \dots см.

Вариант 4

1.1 Оптическая система состоит из собирающей линзы и вогнутого зеркала. Если линейное увеличение линзы k_1 , а зеркала k_2 , то линейное увеличение системы равно

- 1) $k = k_1 + k_2$; 2) $k = k_1 \cdot k_2$; 3) $k = k_1 - k_2$; 4) $k = k_2 - k_1$; 5) $k = k_2$.

2.2 Высота Солнца над горизонтом $\varphi = 50^\circ$. Если расположить плоское зеркало под углом $\alpha = 70^\circ$ к горизонту, то солнечные лучи после отражения от зеркала пойдут

- 1) горизонтально; 2) под углом 20° к горизонту;
3) вертикально вниз; 4) вертикально вверх;
5) под углом 45° к горизонту.

3.2 Изображение точки В предмета АВ, расположенного относительно линзы, как показано на рис. 19, получится

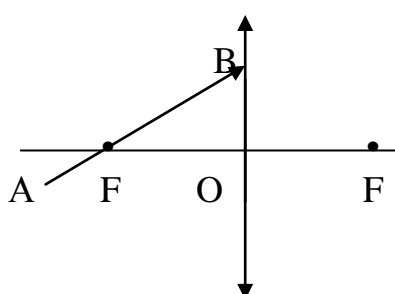


Рис. 19

- 1) в точке В;
- 2) на оптической оси;
- 3) во втором фокусе;
- 4) на передней фокальной плоскости;
- 5) на задней фокальной плоскости.

4.2 Если человек ростом $H = 1,8$ м смотрит в зеркало, висящее вертикально на стене, при этом верхний край зеркала находится на уровне глаз, то наименьшая высота зеркала h , позволяющая человеку увидеть себя во весь рост, равна

- 1) 0,60 м;
- 2) 0,90 м;
- 3) 1,2 м;
- 4) 1,6 м;
- 5) 1,8 м.

5.3 Если угол преломления луча β в 2 раза меньше угла падения α , а показатель преломления $n = \sqrt{3}$, то угол падения α равен

- 1) 20° ;
- 2) 30° ;
- 3) 45° ;
- 4) 60° ;
- 5) 90° .

6.3 Если источник света помещен в двойной фокус собирающей линзы, оптическая сила которой $D = 1,0$ дптр, то изображение его получается на расстоянии f от линзы, равном

- 1) 0,50 м;
- 2) 1,0 м;
- 3) 2,0 м;
- 4) 3,0 м;
- 5) 4,0 м.

7.3 Если плоские зеркала, расположенные параллельно одно другому, сближать со скоростью $\vartheta = 2,0 \frac{M}{c}$, то первые изображения источника света, находящегося посередине между зеркалами, будут сближаться со скоростью ϑ_1 , равной $\dots \frac{M}{c}$.

8.3 Если луч света проходит через пластинки из алмаза ($n_1 = 2,4$) и стекла ($n_2 = 1,5$) за одно и то же время, то отношение толщин пластинок равно \dots .

9.4 Если луч света, проходя через призму, сечением которой является равносторонний треугольник, преломляется в точках, расположенных от вершины на одинаковых расстояниях (рис. 20), то наибольшее допустимое значение показателя преломления вещества призмы n при этом равно \dots .

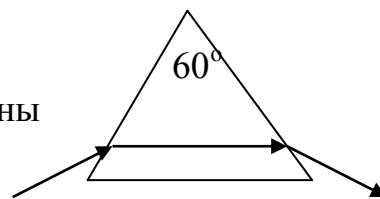


Рис. 20

10.5 Если сходящийся пучок лучей падает на тонкую собирающую линзу с фокусным расстоянием $F = 24$ см так, что их продолжения пересекаются в заднем фокусе линзы, то преломленные лучи пересекаются на расстоянии от линзы r , равном ... см.

Ответы к тестовым заданиям ГО и ФТ

Вариант 1

1.1	2.2	3.2	4.2	5.3	6.3	7.3	8.3	9.4	10.5
2	4	5	2	1	2	5 см	90°	0,5 F	36 см

Вариант 2

1.1	2.2	3.2	4.2	5.3	6.3	7.3	8.3	9.4	10.5
5	5	4	2	5	5	20 мкм	$2,02 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$	1,5	25 см

Вариант 3

1.1	2.2	3.2	4.2	5.3	6.3	7.3	8.3	9.4	10.5
3	3	2	5	4	2	60°	3	8 см	40 см

Вариант 4

1.1	2.2	3.2	4.2	5.3	6.3	7.3	8.3	9.4	10.5
2	3	1	2	4	3	$4,0 \frac{м}{с}$	1,6	2,0	12 см

8. Учебный модуль № 2 «Волновая оптика»

9. Учебный блок «Интерференция света»

9.1. Основные понятия и законы

Абсолютный показатель преломления однородной прозрачной среды $n = c/v$, где c — скорость света в вакууме, а v — скорость света в среде, значение которой зависит от длины волны (дисперсия света).

При наложении когерентных световых волн имеет место интерференция, результат которой зависит от оптической разности хода этих волн в точке наблюдения. Оптическая разность хода определяется по формуле $\delta = L_2 - L_1 = n_2 \ell_2 - n_1 \ell_1$, где L_1 и L_2 — оптические, а ℓ_1 и ℓ_2 — геометрические длины путей, n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления сред, в которых распространяются первая и вторая волна.

Разность фаз колебаний в точке наблюдения $\Delta\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$, где λ — длина световой волны в вакууме.

Интерференционный максимум интенсивности света соответствует оптической разности хода лучей, численно равной четному числу полуволн:

$$\delta_{\max} = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Интерференционный минимум интенсивности света соответствует оптической разности хода лучей, численно равной нечетному числу полуволн:

$$\delta_{\min} = 2k + 1 \frac{\lambda}{2}.$$

Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете определяются по формуле

$$r_T = \sqrt{kR\lambda}, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

радиусы светлых колец

$$r_c = \sqrt{2k + 1} R \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

где R — радиус кривизны поверхности линзы, k — порядковый номер кольца.

Коэффициент отражения энергии при нормальном падении света на границу раздела двух сред:

$$R = \left(\frac{n_{21} - 1}{n_{21} + 1} \right)^2,$$

где n_{21} — относительный показатель преломления сред.

Для просветления оптики стекло с показателем преломления n_0 покрывается диэлектриком с показателем преломления $n = \sqrt{n_0}$.

9.2. Вопросы для самоконтроля

1. Как будут двигаться интерференционные полосы, если расстояние между щелями в схеме Юнга будет возрастать?
2. Какой вид будет иметь интерференционная картина, если в интерференционной схеме убрать светофильтр?
3. Что будет наблюдаться в центре колец Ньютона, если наблюдение проводить в проходящем свете? в отраженном свете?
4. Почему смещение интерференционной картины можно использовать для определения разности показателей преломления ($n_0 - n_1$)?
5. Показать, что при наложении некогерентных колебаний интерференции не наблюдается.
6. Две световые волны, налагаясь друг на друга на определенном участке пространства, взаимно погашаются. Означает ли это, что световая энергия превращается в другие формы?
7. Где локализованы полосы равного наклона? полосы равной толщины?
8. Почему при наблюдении колец Ньютона следует использовать линзу с большим радиусом кривизны?
9. В чем состоит явление «просветления» оптики?
10. Как, пользуясь интерферометром Жамена, определить показатель преломления газа?

9.3. Методические указания к практическим занятиям

Ко второй группе относятся задачи, в которых необходимо определить физические величины, характеризующие интерференционную картину в случае сложения двух монохроматических волн, излучаемых точечными когерентными источниками света (интерференция, полученная по схеме Юнга, с помощью бипризмы Френеля, зеркала Ллойда, билинзы Бийе и др.).

В третьей группе задач рассматривается интерференция света в тонких плоских и клинообразных пленках (кольца Ньютона являются частным случаем интерференции в клинообразной пленке).

В процессе решения задач, относящихся ко второй и третьей группам, необходимо: выяснить причины появления оптической разности хода между интерферирующими световыми волнами; определить ее значение, в соответствии с данными задачи; записать условие максимума или минимума интерференции; определить искомую величину.

При определении оптической разности хода, следует иметь в виду следующее:

1. При отражении световой волны от оптически более плотной среды происходит изменение фазы волны на π , что соответствует изменению оптической разности хода на половину длины волны $\frac{\lambda}{2}$. Говорят, что в этом случае происходит потеря полуволны.

2. При отражении от оптически менее плотной среды изменения фазы волны, а следовательно и потери полуволны не происходит.

3. Если оптическая схема для наблюдения интерференции или дифракции содержит линзы, то нужно помнить, что линза не является источником дополнительной разности хода для тех лучей, которые после преломления в этой линзе пересекаются в одной точке.

9.4. Примеры решения задач

Пример 1. Плоская световая волна частотой ν падает на отражающий экран, расположенный перпендикулярно к направлению ее распространения. Определите расстояние между двумя соседними максимумами напряженности электрического поля результирующей волны, если в точках максимума она равна A_1 , а в точках минимума — A_2 . Чему равны амплитуды напряженности электрического поля падающей и отраженной волны?

Решение. Ось OX системы отсчета направим вдоль перпендикуляра, соединяющего излучатель с экраном. Начало координат выберем в месте расположения излучателя. При отражении волны от экрана ее фаза изменяется на π (происходит потеря полуволны), т. к. экран является оптически более плотной средой по сравнению с воздухом, в котором волна распространяется. Однако изменения частоты волны не происходит. Поэтому падающая и отраженная волны являются когерентными и в пространстве между излучателем и приемником происходит их интерференция.

Пусть расстояние между излучателем и экраном равно ℓ , а координата произвольной точки, в которой наблюдается интерференция, равна x . Тогда колебания вектора напряженности электрического поля падающей волны \vec{E}_1 в рассматриваемой точке описываются уравнением $\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$, где ω — циклическая частота колебаний, c — скорость света, E_{01} — амплитуда напряженности электрического поля падающей волны. С учетом того, что $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{\lambda}$ уравнение колебаний можно записать в виде:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right) = \vec{E}_{01} \cos \varphi_1,$$

где φ_1 — фаза колебаний вектора \vec{E}_1 в рассматриваемой точке.

Отраженная волна, достигшая рассматриваемой точки, проходит расстояние $2\ell - x$. Поэтому $\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi(2\ell - x)}{\lambda}\right) = \vec{E}_{02} \cos \varphi_2$, где E_{02} — амплитуда напряженности электрического поля отраженной волны.

С учетом изменения фазы волны при ее отражении от экрана, разность фаз колебаний векторов напряженностей электрического поля падающей и отраженной волн, в рассматриваемой точке $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} x - \ell + \pi$.

Если два соседних максимума наблюдаются в точках с координатами x_1 и x_2 , то соответствующие им разности фаз

$$\Delta\varphi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda} x_1 - \ell ; \Delta\varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} x_2 - \ell .$$

$$\text{Откуда } \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} x_2 - x_1 .$$

Принимая во внимание, что фазы колебаний в этих точках отличаются на 2π , получим: $\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} x_2 - x_1 = 2\pi$. Следовательно, искомое расстояние между двумя соседними максимумами $x_2 - x_1 = \Delta x = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2\nu}$.

Таким же будет и расстояние между двумя соседними минимумами.

Так как в точках максимумов фазы колебаний векторов напряженностей электрических полей падающей и отраженной волн совпадают, а в точках минимумов они противоположны, то для точек максимумов векторы \vec{E}_1 и \vec{E}_2 , \vec{E}_{01} и \vec{E}_{02} , сонаправлены, а для точек минимумов их направления противоположны. Поэтому

$$\begin{cases} E_{01} + E_{02} = A_1 \\ E_{01} - E_{02} = A_2 \end{cases} . \text{ Откуда } E_{01} = \frac{A_1 + A_2}{2}, E_{02} = \frac{A_1 - A_2}{2} .$$

Аналогичные соотношения выполняются и для векторов индукций магнитных полей падающей и отраженной волн.

Пример 2. В опыте Юнга свет от ярко освещенной Солнцем диафрагмы A попадает на два малых отверстия S_1 и S_2 , расположенные на расстоянии d друг от друга (рис 21). На расстоянии L от отверстий находится экран. Определите расстояние между соседними интерференционными максимумами вблизи середины экрана.

Решение. Согласно принципу Гюйгенса диафрагму A можно считать точечным источником полусферических волн, падающих на отверстия S_1 и S_2 , которые, в свою очередь, являются новыми точечными источниками когерентных волн. В области за отверстиями эти волны накладываются друг

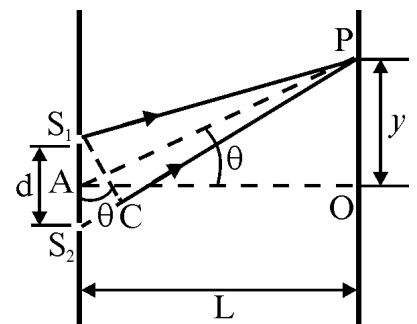


Рис. 21

на друга и могут интерферировать. Интерференционная картина наблюдается на экране, расположенном на большом расстоянии от источников S_1 и S_2 .

В точку экрана O , находящуюся на одинаковом расстоянии от отверстий S_1 и S_2 , волны приходят в одинаковых фазах и поэтому усиливают друг друга. Результат сложения колебаний в произвольной точке экрана P определяется разностью хода δ волн, которые приходят в эту точку из отверстий S_1 и S_2 .

Для расчета интерференционной картины на экране проведем в точку наблюдения P прямую AP из середины отрезка $S_1 S_2$ и обозначим угол θ между этой прямой и прямой AO . Если учесть, что угол θ мал, то разность хода $\Delta l = l_1 - l_2$ можно найти, если опустить перпендикуляр из точки S_1 на прямую AP до пересечения с прямой $S_2 P$. Из рисунка видно, что $\Delta l = S_2 S_1 \sin \theta = d \sin \theta = d\theta$. Поскольку световые волны распространяются в воздухе, то $n=1$, поэтому оптическая разность хода равна геометрической, т. е. $\delta = \Delta l$. Учитывая, что $\Delta l = 2m \frac{\lambda}{2}$, определим углы, соответствующие

направлениям на максимумы интерференции. Эти углы равны $\theta_{\max} = m \frac{\lambda}{d}$, где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Полагая, что $\Delta l = 2m + 1 \frac{\lambda}{2}$, получим значения углов, определяющих направления на минимумы: $\theta_{\min} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d}$.

Угловое расстояние между соседними максимумами составляет $\Delta \theta = \frac{\lambda}{d}$. Поэтому расстояние между этими максимумами на экране равно

$$h = L \Delta \theta = \frac{\lambda L}{d}.$$

Пример 3. Между точечным источником света, находящимся в главном фокусе собирающей линзы и бипризмой Френеля с преломляющим углом $0,001$ рад, основанием 6 см и абсолютным показателем преломления $1,5$, помещен голубой светофильтр. Определите максимальное число интерференционных полос, ширину одной полосы и максимальное расстояние от бипризмы до экрана, при котором можно наблюдать интерференционную картину?

Решение. Так как источник света находится в главном фокусе тонкой собирающей линзы, то расходящийся пучок лучей, падающих на линзу, после преломления в ней преобразуется в параллельный, что соответствует преобразованию сферического участка волнового фронта падающей волны в плоский.

Предположим, что светофильтр является идеальным и пропускает излучение только одной длины волны. Поэтому на бипризму падает параллельный пучок монохроматических лучей, идущий вдоль главной оптической оси системы. В результате преломления в каждой из половинок

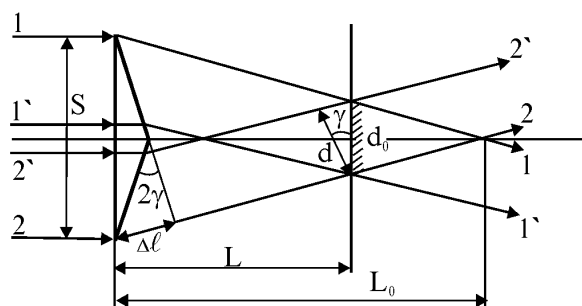


Рис. 22.а

бипризмы этот пучок разделяется на два когерентных световых пучка, наклоненных под углом γ к оси (исходный участок волнового фронта разделяется на два) (рис. 22,а). Поэтому на экране, который находится в области перекрытия световых пучков, будет наблюдаться интерференционная картина, представляющая собой чередование темных и светлых полос.

Ширина интерференционной картины будет наибольшей в той части экрана, где площадь перекрытия этих пучков максимальна. В тех местах, где пучки от обеих половинок бипризмы не перекрываются — интерференционная картина отсутствует.

Взаимодействие исходного пучка с бипризмой можно описать законами преломления, а интерференционную картину на экране — условиями усиления и ослабления света.

Для определения угла γ воспользуемся законом преломления одного из лучей на наклонной грани бипризмы (рис. 22, б), в соответствии с которым $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{n}$, поскольку бипризма находится в воздухе.

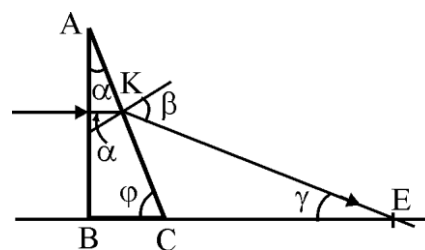


Рис. 22.б

Так как угол α мал, то угол β также будет малым, поэтому $\sin \alpha = \alpha$, $\sin \beta = \beta$ (при условии, что углы измерены в радианах). Откуда $\beta = n\alpha$.

Угол φ является внешним углом треугольника KCE ; по теореме о внешнем угле треугольника $\varphi = \gamma + 90 - \beta$. Из треугольника ABC видно, что $\varphi = 90 - \alpha$. Откуда $\gamma = \beta - \alpha = n - 1 \alpha$ (этот угол также мал).

Угол φ является внешним углом треугольника KCE ; по теореме о внешнем угле треугольника $\varphi = \gamma + 90 - \beta$. Из треугольника ABC видно, что $\varphi = 90 - \alpha$. Откуда $\gamma = \beta - \alpha = n - 1 \alpha$ (этот угол также мал).

Максимальное расстояние L_0 , соответствующее области перекрытия пучков,

$$L_0 = \frac{S}{2 \operatorname{tg} \gamma} = \frac{S}{2 \gamma} = \frac{S}{2 n - 1 \alpha}.$$

Как видно из рисунка 4.18, а, максимальная ширина области перекрытия d_0 соответствует расстоянию $L = L_0/2$ от бипризмы.

Следовательно, $d_0 = \frac{S}{4 n - 1 \alpha}$.

Волновые поверхности интерферирующих пучков образуют между собой угол 2γ , поэтому разность хода

$$\Delta l = d \operatorname{tg} 2\gamma = 2d\gamma = 2\gamma \cdot d_0 \cos \gamma \approx 2\gamma d_0 = S\gamma = S(n-1)\alpha.$$

С учетом того, что разность хода, соответствующая двум соседним максимумам или минимумам, равна длине волны λ , число интерференционных полос на экране, расположенном в области максимального перекрытия пучков $N = \frac{\Delta l}{\lambda} = \frac{S(n-1)\alpha}{\lambda}$. Ширина одной

$$\text{полосы } \Delta x_0 = \frac{d_0}{N} = \frac{\lambda}{2(n-1)\alpha}.$$

Численно: $N = 60$, $\Delta x_0 = 0,5$ мм, $L_0 = 60$ м.

Пример 4. Плоская монохроматическая световая волна падает из воздуха на плоскопараллельную пластинку. При каких условиях будут наблюдаться максимумы интерференции в отраженном и проходящем через пластинку свете? Почему интерференция в отраженном свете наблюдается более отчетливо?

Решение. Световой луч, падая в точку A (рис. 23), на поверхности пластинки разделяется на два луча: луч 1 отражается от верхней грани пластинки, луч 2 после преломления на верхней грани и отражения от нижней грани пластинки в точке B , еще раз преломляется на верхней грани в точке D и выходит в воздух, параллельно лучу 1 (докажите это самостоятельно, используя законы отражения и преломления света). В точке B (как и в других точках D , E и т. д.), кроме отражения также происходит преломление, в результате которого луч 3 выходит из пластинки параллельно лучу, падающему на нее в точке A . В точке D происходит частичное отражение и луч 4 , преломляясь, выходит из пластинки в точке E параллельно лучу 3 . Лучи 1 и 2 образовались вследствие деления одного луча, поэтому они когерентны. Если их собрать в одну точку, например, при помощи собирающей линзы, то они будут интерферировать в отраженном свете. Аналогичную картину в свете, проходящем через пластинку, можно получить, собрав лучи 3 и 4 . Другие световые лучи из пучка, падающего на пластинку, ведут себя аналогично и вносят свой вклад в интерференцию.

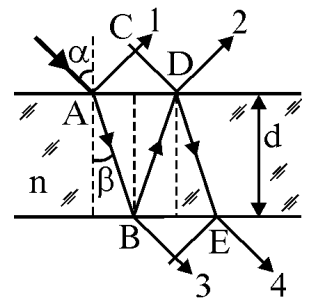


Рис. 23

Оптическая разность хода лучей 1 и 2 (и всех остальных, аналогичных им) равна $\delta = (AB + BD)n - \left(AC + \frac{\lambda}{2}\right)$. Из рисунка видно, что

$$AB + BD = \frac{2dn}{\cos \beta}, \quad AC = AD \sin \alpha = 2d \operatorname{tg} \beta \sin \alpha. \quad \text{Принимая во внимание, что}$$

$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$, получим $AC = \frac{2dn \sin^2 \beta}{\cos \beta}$. Таким образом, оптическая разность хода первого и второго световых лучей равна $\delta = 2dn \cos \beta - \frac{\lambda}{2}$.

Появление дополнительной разности хода, равной $\lambda/2$, обусловлено тем, что при отражении световой волны от оптически более плотной среды фаза колебаний в отраженной волне изменяется на 180° .

Поскольку $\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - (\sin^2 \alpha)/n^2}$, то δ можно выразить через угол падения α : $\delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \lambda/2$.

Для максимумов интерференции $\delta = \pm 2\kappa \frac{\lambda}{2}$ ($\kappa = 0, 1, 2, \dots$), поэтому условие интерференционных максимумов в отраженном свете имеет вид:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = 2\kappa + 1 \frac{\lambda}{2}.$$

Для минимумов $\delta = \pm 2\kappa + 1 \frac{\lambda}{2}$ ($\kappa = 0, 1, 2, \dots$), т. е. условие минимумов в отраженном свете имеет вид: $2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = \kappa \lambda$.

В проходящем через пластинку свете (лучи 3—4 и аналогичные им), потери полуволны не происходит. Поэтому условие интерференционных максимумов в проходящем свете имеет вид: $2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = k\lambda$, а условие минимумов — $2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = 2k + 1 \frac{\lambda}{2}$.

Интенсивность отраженного света (луч I) составляет примерно 5% от интенсивности падающего света, т. е. $I_1 = 0,05I_0$. Поэтому интенсивность луча 2 с учетом преломления и отражения $I_2 = 0,95 \times 0,05 \times 0,95 I_0 = 0,045I_0$. Следовательно, $I_1 : I_2 = 1,1$.

Аналогичный расчет для лучей 3 и 4 показывает, что $I_3 : I_4 \approx 400$. Поскольку в отраженном свете интерферируют волны, амплитуды которых практически не отличаются друг от друга, то интерференционные максимумы и минимумы в отраженном свете очень хорошо различимы.

В проходящем свете интерферируют волны, амплитуды которых очень сильно отличаются, поэтому максимумы и минимумы интерференции различить значительно труднее.

9.5. Задачи для самостоятельного решения

9.1. Два точечных когерентных источника S_1 и S_2 , излучающие свет с длиной волны λ , находятся на расстоянии d друг от друга. На расстоянии L от источников расположен экран. Считая, что $L \gg d$, определите расстояние между интерференционными максимумами нулевого и первого порядков на экране.

9.2. В опыте Юнга отверстия, расположенные на расстоянии 1 мм друг от друга, освещались монохроматическим светом с длиной волны 600 нм. Определите положение первых трех светлых полос на экране, находящемся на расстоянии 3 м от отверстий.

9.3. Во сколько раз увеличится расстояние между соседними интерференционными полосами на экране в опыте Юнга, если зеленый светофильтр ($\lambda = 500$ нм) заменить красным ($\lambda = 650$ нм)?

9.4. На пути светового пучка в интерференционной установке Юнга, которая освещается светом с длиной волны 589 нм, помещена трубка длиной 2 см заполненная воздухом. При заполнении этой трубки хлором интерференционная картина смещается на 20 полос. Определите абсолютный показатель преломления хлора, если для воздуха он равен 1,000276.

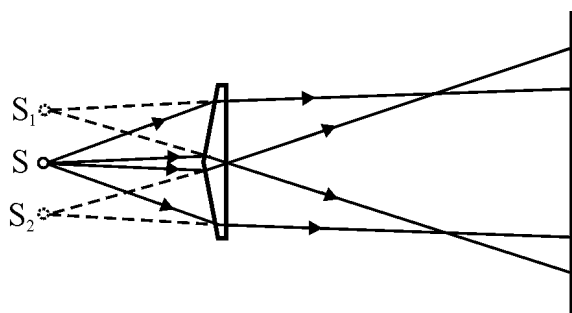


Рис. 24

4.70. Определите длину волны монохроматического света, которым освещается интерференционная установка в опыте Юнга, если расстояние между максимумами нулевого и первого порядков на экране,

расположенном на расстоянии 5 м равно 0,5 мм, а расстояние между отверстиями составляет 5 мм. (рис. 24).

9.5. Бипризма Френеля с преломляющим углом $1^\circ 30'$ освещается монохроматическим светом от узкой щели, находящейся на расстоянии 50 см от нее. Ширина интерференционных полос в центре экрана, расположенном на расстоянии 3,5 м от бипризмы, равна 0,2 мм. Определите длину волны света, падающего на бипризму, если абсолютный показатель преломления бипризмы для этой длины волны равен 1,52.

9.6. При каком положении экрана в установке с бипризмой, преломляющий угол которой равен $3' 26''$, освещаемой параллельным пучком света с длиной волны 500 нм, будет наблюдаться максимальное число интерференционных полос, если расстояние между вершинами преломляющих углов бипризмы равно 4 см, а абсолютный показатель преломления стекла бипризмы 1,5.

9.7. Тонкая собирающая линза с оптической силой 5 дптр, разрезана вдоль главной оптической оси на две половинки, которые затем раздвинуты на 1 мм друг от друга. Монохроматический источник, излучающий свет с длиной волны 500 нм, находится на расстоянии 25 см от линзы. Как изменится полное число интерференционных полос на экране, отстоящем на расстоянии 5,4 м от линзы, если расстояние от источника до нее увеличить в два раза?

9.8. В схеме, предложенной Ллойдом, монохроматическая световая волна длиной 500 нм, излучаемая узкой светящейся щелью и непосредственно падающая на экран, отстоящий на расстоянии 4 м от щели, интерферирует с волной, отраженной от плоского зеркала, расположенного

параллельно щели на расстоянии 1 мм от нее. На каком расстоянии от середины центральной полосы находится третья светлая полоса? Что произойдет с интерференционной картиной, если в световой пучок, идущий непосредственно из щели, ввести плоскопараллельную стеклянную пластинку $n = 1,5$ толщиной 0,01 см?

9.9. В схеме с зеркалами Френеля, два плоских зеркала, угол между которыми равен $10'$, освещаются монохроматическим светом с длиной волны 600 нм от светящейся щели, находящейся на расстоянии 10 см от линии пересечения зеркал. Определите расстояние между интерференционными полосами в центральной части экрана, расположенного на расстоянии 2,7 м от зеркал.

9.10. При наблюдении колец Ньютона в отраженном синем свете ($\lambda = 450$ нм) с помощью плосковыпуклой линзы, положенной на плоскую пластинку, радиус третьего светлого кольца оказался равным 1,06 мм. После замены синего светофильтра красным радиус пятого светлого кольца оказался равным 1,77 мм. Определите фокусное расстояние линзы и длину волны красного света, считая абсолютный показатель преломления стекла равным 1,5.

9.11. Пространство между соприкасающимися плосковыпуклой линзой и плоскопараллельной пластинкой заполнено водой. Радиус кривизны сферической поверхности линзы 1 м. Определите радиус пятого темного кольца Ньютона в отраженном свете при освещении линзы светом длиной волны 500 нм.

9.12. Плосковыпуклая стеклянная линза с радиусом кривизны 40 см соприкасается выпуклой поверхностью со стеклянной пластинкой. При этом в отраженном свете радиус некоторого темного кольца 2,5 мм. Наблюдая за данным кольцом, линзу осторожно отодвинули от пластинки на 2 мкм. Определите радиус этого кольца после изменения положения линзы?

9.13. Плоскопараллельная пластинка, абсолютный показатель преломления которой равен 1,5, освещается параллельным пучком монохроматического света с длиной волны 590 нм. Определите толщину пластинки, если максимальные значения интенсивности отраженного света соответствуют углам падения равным 30° и 34° .

9.14. На поверхность стеклянного объектива нанесена тонкая пленка абсолютный показатель преломления которой 1,2. При какой наименьшей толщине этой пленки произойдет максимальное ослабление отраженного света в средней части видимого спектра, если абсолютный показатель стекла 1,5.

9.15. Пучок белого света падает нормально на стеклянную пластинку толщиной 0,4 мкм. Какие из длин волн, лежащие в пределах видимого спектра, усиливаются в отраженном свете, если абсолютный показатель преломления стекла равен 1,5.

9.16. Белый свет, падающий нормально на мыльную пленку, после отражения от нее дает интерференционный максимум на волне длиной

630 нм, а ближайший к нему минимум — на волне длиной 450 нм. Определите толщину пленки, считая ее постоянной, если абсолютный показатель преломления мыльного раствора равен 1,33 .

9.17. На тонкую пленку с абсолютным показателем преломления n падает пучок белого света под углом θ к нормали. При какой минимальной толщине пленки и в какой цвет она будет окрашена в отраженном свете?

9.18. На тонкий стеклянный клин, с углом $4 \cdot 10^{-5}$ рад и абсолютным показателем преломления 1,5, в направлении нормали падает монохроматический свет с длиной волны 600 нм. На расстоянии 1 м от клина расположен экран, на который с помощью линзы с фокусным расстоянием 16 см проецируют возникающую интерференционную картину в отраженных лучах. Определите ширину интерференционных полос на экране.

9.19. На тонкую клиновидную пластинку, абсолютный показатель преломления которой равен 1,5, перпендикулярно к ней падает плоская световая волна длиной 580 нм. Определите угол между гранями пластинки, если расстояние между соседними интерференционными полосами в отраженном свете 5 мм.

10. Учебный блок «Дифракция света»

10.1. Основные понятия и законы

Площадь любой зоны Френеля, построенной на ограниченном сферическом фронте волны (дифракции на круглом отверстии):

$$S = \frac{\pi ab \lambda}{a + b},$$

где a — расстояние от источника света до фронта волны; b — расстояние от вершины волнового фронта до точки наблюдения дифракционной картины (до экрана); λ — длина волны излучаемой источником света.

Радиус зоны Френеля r в случае плоского волнового фронта $r = \sqrt{kb\lambda}$, где k — номер зоны, b — расстояние от круглого отверстия (щели) в непрозрачной преграде до точки наблюдения, расположенной на оси симметрии, λ — длина волны.

При нормальном падении пучка параллельных лучей на узкую щель (дифракция Фраунгофера) положение *дифракционных минимумов* освещенности определяется условием

$$b \sin \varphi = k \lambda, \quad k = \pm 1, 2, 3, \dots,$$

где b — *ширина щели*, k — *порядок минимума*, а положение *дифракционных максимумов* —

$$b \sin \varphi_k = \pm \frac{2k + 1}{2} \lambda.$$

Интенсивность света в точке, положение которой определяется углом дифрагирования φ :

$$I_{\varphi} = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} b \sin \varphi\right)^2},$$

где I_0 – интенсивность света в центре дифракционной картины.

При нормальном падении света на дифракционную решетку положение главных максимумов определяется условием

$$d \sin \varphi = k \lambda, \quad k = 0, \pm 1, 2, 3, \dots,$$

где d — постоянная (период) решетки, равная расстоянию между серединами двух соседних щелей, k — порядок спектра.

Интенсивность света k -го главного максимума:

$$I_k = N^2 I_{\varphi},$$

где N – число щелей решетки; I_{φ} – интенсивность, создаваемая в направлении угла φ одной щелью.

Угловая дисперсия дифракционной решетки:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}.$$

Разрешающая сила дифракционной решетки $R = \lambda / \Delta\lambda = kN$, где $\Delta\lambda$ — наименьшая разность длин волн двух соседних спектральных линий (λ и $\lambda + \Delta\lambda$), при которой эти линии могут быть видны отдельно, N — общее число штрихов дифракционной решетки.

Угловое расстояние между двумя точками, разрешаемыми телескопом:

$$\Delta\varphi = 1,22 \frac{\lambda}{D},$$

где D – диаметр объектива телескопа.

Дифракцию рентгеновских лучей получают на кристаллических решетках. Дифракционные максимумы определяются условием (*формула Вульфа-Брегга*):

$$2d \sin \theta = \pm k \lambda,$$

где θ – угол скольжения (угол, дополнительный к углу падения).

10.2. Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
2. Каков порядок следования цветов в дифракционных спектрах?
3. Какова окраска нулевого максимума?
4. Можно ли наблюдать дифракцию на звуковых волнах в жидкости?
5. В чем отличие дифракции Фраунгофера от дифракции Френеля?
6. Как определяется радиус любой зоны Френеля?
7. В каком соотношении находятся площади зон Френеля?
8. Какими параметрами характеризуется дифракционная решетка в качестве спектрального прибора?

9. Как изменится дифракционная картина, полученная с помощью решетки, если увеличить постоянную решетки, не изменяя общего числа штрихов?
10. Что будет наблюдаться на экране при дифракции на одной щели в параллельных лучах, если ширина щели равна длине волны света?

10.3. Методические указания к практическим занятиям

В данном разделе рассматриваются задачи, в которых определяются физические величины, характеризующие дифракционную картину, получаемую при нормальном падении пучка параллельных лучей на узкую щель или на плоскую прозрачную дифракционную решетку. Основные уравнения при решении таких задач составляются на основании условий максимума или минимума дифракции на соответствующих объектах. Если дифракционная картина проецируется на экран, расположенный на сравнительно большом расстоянии от щели или дифракционной решетки, то следует иметь в виду, что синусы углов с достаточной степенью точности можно заменить их тангенсами. Поскольку на линзу падает параллельный пучок лучей, то изображение дифракционной картины проецируется на экран, находящийся в фокальной плоскости линзы.

10.4. Примеры решения задач

Пример 1. Радиус четвертой зоны Френеля для плоского волнового фронта $r_4 = 3$ мм. Определить радиус двенадцатой зоны из той же точки наблюдения.

Решение. 1 способ. Сделаем чертеж в соответствии с условием задачи (рис. 25): АВ – фронт плоской волны; С – точка наблюдения; $CO = b$; $CD = b + k\lambda/2$; $DO = r_k$.

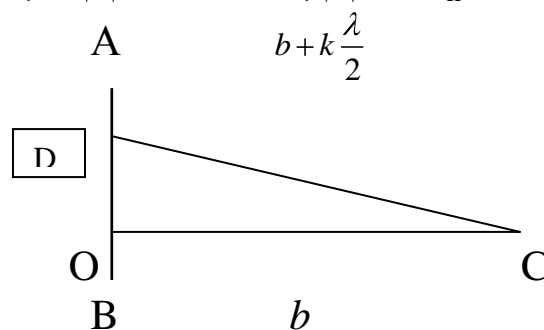


Рис. 25

Из рисунка видно, что

$$r_k^2 = \left(b + k \frac{\lambda}{2} \right)^2 - b^2 = k\lambda b + k^2 \frac{\lambda^2}{4};$$

так λ мала по сравнению с расстояниями r_k и b , то членом $k^2 \frac{\lambda^2}{4}$ пренебрегаем, следовательно,

$$r_k^2 = kb\lambda.$$

В соответствии с условием задачи:

$$r_4^2 = 4b\lambda, \quad r_{12}^2 = 12b\lambda.$$

После преобразования получаем:

$$\frac{r_4^2}{r_{12}^2} = \frac{1}{3}, \quad \text{или} \quad \frac{r_{12}^2}{r_4^2} = 3.$$

Откуда

$$r_{12}^2 = 3r_4^2.$$

Подставим значение r_4 , получаем $r_{12} = 3\sqrt{3}$ мм.

2 способ. Выражение для радиуса k -ой зоны Френеля можно преобразовать следующим образом:

$$r_k = \sqrt{\frac{ab}{a+b} k\lambda} = \sqrt{\frac{kb\lambda}{1 + \frac{b}{a}}};$$

при $a \rightarrow \infty$ $r_k^2 = kb\lambda$.

Пример 2. На дифракционную решетку с периодом 2,2 мкм падает плоская монохроматическая световая волна, фронт которой параллелен плоскости решетки. Определите длину этой волны, если угол между максимумами первого и второго порядков равен 15° . Чему равен наибольший порядок спектра и соответствующий ему угол дифракции?

Решение. В соответствии с принципом Гюйгенса каждая точка любой из щелей решетки является источником вторичных волн. Причем фронт вторичных волн также является плоским, но он повернут на некоторый угол φ по отношению к фронту волны, падающей на решетку (этот угол называют углом дифракции). Однако, если во всех точках фронта падающей волны колебания происходят в одинаковой фазе, то вдоль фронта дифракционной волны фаза колебаний изменяется от точки к точке. В рассматриваемом случае имеет место дифракция в параллельных лучах, поэтому для ее наблюдения нужно либо поместить экран на бесконечно большом расстоянии от решетки, либо между решеткой и экраном поместить собирающую линзу так, чтобы экран оказался в ее фокальной плоскости. Те углы, для которых вторичные волны, излучаемые всеми щелями решетки, усиливают друг друга, соответствуют направлениям на главные дифракционные максимумы. Оптическая разность хода, соответствующая максимумам, равна целому числу длин волн, т. е. $\delta = k\lambda$. С учетом того, что дифрагирующие пучки распространяются в воздухе ($n=1$), получим $\delta = n\Delta l = \Delta l$.

С другой стороны, $\Delta\ell = d \sin \varphi$ (рис. 26).
Поэтому $d \sin \varphi = k\lambda$.

Если φ — угол дифракции, соответствующий направлению на максимум первого порядка $k = 1$, а φ_2 — угол дифракции, соответствующий максимуму второго порядка, то $d \sin \varphi_1 = \lambda$, $d \sin \varphi_2 = 2\lambda$. По условию задачи $\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\varphi = 15^\circ$, т. е. $\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$. Следовательно,

$$\begin{cases} d \sin \varphi_1 = \lambda, \\ d \sin (\varphi_1 + \Delta\varphi) = 2\lambda. \end{cases}$$

Откуда $2 \sin \varphi_1 = \sin (\varphi_1 + \Delta\varphi)$.

Воспользовавшись формулой синуса суммы двух углов и разделив правую и левую части последнего равенства на $\cos \varphi_1$, получим

$\operatorname{tg} \varphi_1 (2 - \cos \Delta\varphi) = \sin \Delta\varphi$. Откуда $\operatorname{tg} \varphi_1 = \left(\frac{\sin \Delta\varphi}{2 - \cos \Delta\varphi} \right)$. Принимая во

внимание, что $\operatorname{tg} \varphi_1 = \left(\frac{\sin \varphi_1}{\sqrt{1 - \sin^2 \varphi_1}} \right)$, после несложных преобразований

получим: $\sin \varphi_1 = \frac{\sin \Delta\varphi}{\sqrt{5 - 4 \cos \Delta\varphi}}$. Следовательно, $\lambda = \frac{d \sin \Delta\varphi}{\sqrt{5 - 4 \cos \Delta\varphi}}$.

Численно: $\lambda = 540$ нм.

Из уравнения дифракционной решетки следует, что порядок дифракционного спектра $k = \frac{d \sin \varphi}{\lambda}$. Так как $\sin \varphi \leq 1$, то $k \leq d / \lambda$. Подставив числовые значения, получим $k \leq 4,1$. Если учесть, что k должно быть целым числом, то $k_{\max} = 4$.

Следовательно, с помощью данной дифракционной решетки можно наблюдать спектры от нулевого до четвертого порядка включительно, т. е.

$k_{\max} = 4$. Поэтому $\sin \varphi_{\max} = \frac{4\lambda}{d}$, т. е. $\varphi_{\max} = \arcsin \frac{4\lambda}{d}$. Численно $\varphi_{\max} = 79^\circ$.

Пример 3. Будут ли перекрываться дифракционные спектры различных порядков при нормальном падении на дифракционную решетку с периодом 2 мкм параллельного светового пучка, длины волн которого заключены в пределах от 400 нм до 500 нм?

Решение. Для того чтобы произошло перекрытие спектров, необходимо, чтобы были равны углы дифракции накладывающихся лучей, соответствующих длинам волн $\lambda_1 = 400$ нм и $\lambda_2 = 500$ нм. Согласно уравнению дифракционной решетки, в этом случае

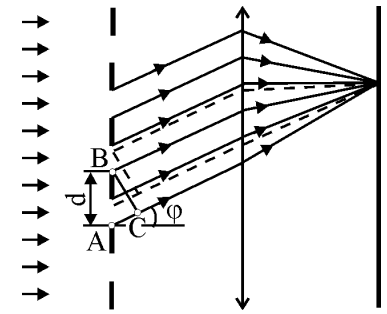


Рис. 26

$$\begin{cases} d \sin \varphi = k_1 \lambda_1, \\ d \sin \varphi = k_2 \lambda_2, \end{cases}$$

причем $k_1 = k_2 + n$, где n — целое число $n = 1, 2, 3, \dots$.

Следовательно, $k_2 \lambda_2 = k_2 + n \lambda_1$, откуда $k_2 = \frac{n \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$. Если $n = 1$, то

перекрываются спектры, порядок которых отличается на единицу. В этом случае

$$k_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = 4.$$

Следовательно, частично могут перекрываться спектры 5-го и более высоких порядков. Поэтому для ответа на вопрос задачи необходимо выяснить, чему равен максимальный порядок спектра, который можно получить с помощью дифракционной решетки. Если окажется, что $k_{\max} \geq 5$, то перекрытие возможно, в противном случае дифракционные спектры для данных длин волн перекрываться не будут.

Максимальному порядку k спектра соответствует угол дифракции $\varphi = 90^\circ$ ($\sin \varphi = 1$). Следовательно, $k_{\max} = d / \lambda$.

Подставив числовые значения, получим, что в нашем случае $k_{\max} = 4$. Следовательно, спектры перекрываться не будут.

Пример 4. Диаметр зрачка человеческого глаза при средней яркости рассматриваемого предмет $D = 3$ мм. Определить: а) минимальное угловое расстояние между отдельными точками рассматриваемого предмета; б) минимальное расстояние между этими точками, рассматриваемыми с расстояния наилучшего зрения нормального глаза ($L = 25$ см).

Решение. Глаз человека наиболее чувствителен к свету, длина волны которого $\lambda = 550$ нм. Угловое расстояние между двумя точками, находящимися на расстоянии l друг от друга, $\Delta\varphi = \frac{l}{L}$.

Разрешающая способность человеческого глаза определяется выражением

$$A = \frac{1}{\Delta\varphi} = \frac{R}{0,61\lambda}.$$

Следовательно,

$$1) \quad \Delta\varphi = \frac{0,61\lambda}{2D}, \quad \Delta\varphi = 560 \cdot 10^{-7} \text{ рад} \approx 34'';$$

$$2) \quad \text{из равенства} \quad \Delta\varphi = \frac{l}{L} \text{ находим:}$$

$$l = L \cdot \Delta\varphi, \quad l = 0,042 \text{ мм.}$$

10.5. Задачи для самостоятельного решения

10.1. Свет, длина волны которого 500 нм, падает нормально на щель шириной 2 мкм. Определите угловое положение первых минимумов, расположенных по обе стороны от центрального максимума. Как изменится угловое положение этих минимумов, если свет будет падать под углом 30° к нормали?

10.2. Определите число штрихов на 1 мм длины дифракционной решетки, если при нормальном падении зеленая линия ртути ($\lambda = 546,1$ нм) в спектре первого порядка наблюдается под углом $19^\circ 8'$.

10.3. Определите длину волны света, падающего нормально на дифракционную решетку, содержащую 200 штрихов на 1 мм, если угол между направлениями на максимумы первого порядка равен 8° .

10.4. Определите наибольший порядок спектра для желтой линии натрия с длиной волны 589 нм, если постоянная дифракционной решетки 2 мкм.

10.5. На каком расстоянии от дифракционной решетки, постоянная которой 0,02 мм, нужно поставить экран, чтобы расстояние между максимумами нулевого и четвертого порядков было равно 50 мм для света с длиной волны 500 нм?

10.6. Дифракционная решетка, имеющая 100 штрихов на 1 мм, освещается белым светом. Определите ширину дифракционного спектра первого порядка на экране, находящемся на расстоянии 2 м от решетки.

10.7. На дифракционную решетку нормально падает свет от газоразрядной трубки, заполненной парами ртути. Определите расстояние между линиями с длинами волн 577 нм и 579,1 нм в спектре первого порядка, если период решетки 2 мкм, а фокусное расстояние линзы, проецирующей спектр на экран, равно 0,6 м.

10.8. Для измерения длины световой волны используется дифракционная решетка, имеющая 100 штрихов на 1 мм. Определите длину световой волны, если расстояние между центральным максимумом и максимумом первого порядка на экране, находящемся на расстоянии 2 м от решетки, равно 12 см.

10.9. При наблюдении через дифракционную решетку красный край спектра виден на расстоянии 3,5 см от середины изображения щели на экране. Определите длину волны красного света, если постоянная решетки 0,01 мм, расстояние до экрана 50 см.

10.10. На дифракционную решетку, содержащую 400 штрихов на 1 мм, падает нормально свет с длиной волны 600 нм. Определите общее число дифракционных максимумов, которое дает эта решетка, и угловое положение крайних максимумов.

10.11. Свет, длина волны которого 600 нм, падает нормально на дифракционную решетку, нанесенную на плоскую поверхность

плосковыпуклой стеклянной $n = 1,5$ линзы, радиус кривизны которой 20 см. Период решетки 6 мкм. Определите расстояние между главными максимумами первого порядка на экране, который находится в фокальной плоскости этой линзы.

11. Учебный блок «Поляризация света»

11.1. Основные понятия и законы

Поляризация света, как интерференция и дифракция, относится к явлениям, которые подтверждают волновую природу света.

Световую волну (как электромагнитную) можно характеризовать тремя векторами \mathbf{E} , \mathbf{H} и \mathbf{v} . В *естественном* свете присутствуют световые волны с различными направлениями вектора \mathbf{E} (рис. 27). Но при некоторых условиях может оказаться так, что свете будут присутствовать только волны с определенным направлением вектора \mathbf{E} . Такой свет называется *поляризованным*.

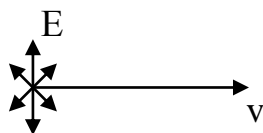


Рис. 27

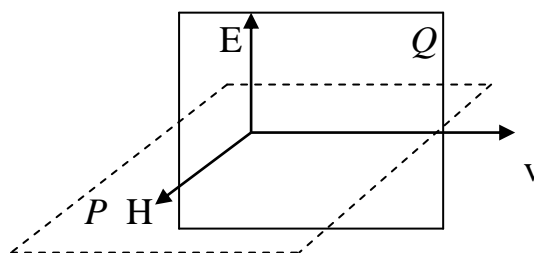


Рис. 28

Плоскость, которая совпадает с направлением распространения светового луча и содержит вектор \mathbf{E} (рис. 28), называется *плоскостью колебаний* Q . Перпендикулярная ей плоскость, в которой магнитный вектор \mathbf{H} , называется *плоскостью поляризации* P .

Поляризация света имеет место в так называемых анизотропных средах, когда структура и свойства их в разных направлениях, перпендикулярных лучу, различны. Такими средами для света являются преимущественно кристаллы.

В зависимости от направления колебаний вектора \mathbf{E} отличают различные виды поляризованных лучей: а) *линейно – или плоско-поляризованный свет*;

б) *эллиптически поляризованный*; в) *циркулярно поляризованный*.

Приборы, которые дают возможность получать поляризованный свет, называют *поляризаторами*. С поляризатора выходит плоско поляризованный свет, интенсивность которого I_0 составляет половину интенсивности естественного света I_e :

$$I_0 = 0,5I_e.$$

Если поляризованный свет I_0 падает на второй поляризатор (рис. 29), то

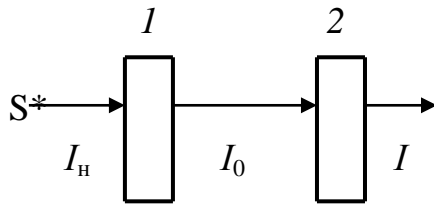


Рис. 29

интенсивность света, который выходит из этого поляризатора I , будет равна:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где φ – угол, который образован плоскостями поляризаторов.

последнее равенство – закон Малюса.

Явление поляризации имеет место также при отражении и преломлении света на границе двух изотропных диэлектриков. Степень поляризации зависит от угла падения лучей на поверхность диэлектрика. При определенном угле падения α_B (угол Брюстера) отраженный свет полностью поляризован. Величина этого угла зависит от свойств диэлектрика:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21},$$

где n_{21} – относительный показатель преломления. Это равенство выражает сущность закона Брюстера. В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения (рис. 30), условно это обозначают

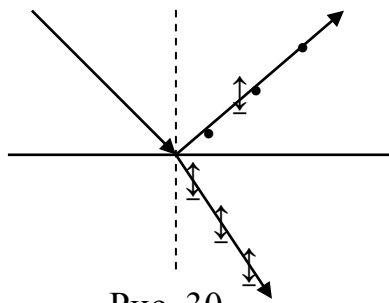


Рис. 30

(•). В преломленном луче преобладают колебания, параллельные плоскости падения (\updownarrow).

Интенсивность различных компонентов в отраженном и преломленном свете зависит от угла падения.

Эта зависимость выражается так называемыми формулами Френеля:

$$I_{\perp} = 0,5 I_e \left[\frac{\sin \alpha - \beta}{\sin \alpha + \beta} \right]^2; \quad I_{\parallel} = 0,5 I_e \left[\frac{\operatorname{tg} \alpha - \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \beta} \right]^2,$$

где I_{\perp}, I_{\parallel} – интенсивности волн соответственно с перпендикулярным и параллельным плоскости падения направлением колебаний электрического вектора E ;

I_e – интенсивность естественного света, падающего под углом α на границу раздела; β – угол преломления.

Разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами, выходящими из кристалла, если направление падающего пучка перпендикулярно оси кристалла:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} h n_o - n_e,$$

где λ – длина волны в вакууме; n_o и n_e – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей; h – толщина кристалла.

Угол поворота плоскости поляризации света в оптически активных кристаллах

$$\varphi = \alpha l,$$

где α – удельное вращение, зависящее от природы вещества, температуры и длины волны света в вакууме; l – путь света в кристалле.

Угол поворота плоскости поляризации света в растворах

$$\varphi = \alpha Cl,$$

где α – удельное вращение, зависящее от природы оптически активного вещества и растворителя; l – толщина слоя раствора; C – концентрация оптически активного вещества.

Разность показателей преломления анизотропной жидкости для необыкновенного и обыкновенного лучей монохроматического света в направлении, перпендикулярном вектору напряженности электрического поля E ,

$$\Delta n = k\lambda E^2,$$

где λ – длина волны света в вакууме, k – постоянная Керра, зависящая от природы вещества, длины волны и температуры.

Угол поворота плоскости поляризации при прохождении света через оптически неактивное вещество, находящееся в однородном магнитном поле индукции B ,

$$\varphi = VBl,$$

где V – постоянная Верде, зависящая от природы вещества и длины волны света; l – длина пути света в магнитном поле.

11.2. Вопросы для самоконтроля

1. В какой плоскости колеблется вектор E света, отраженного от поверхности диэлектрика под углом Брюстера?
2. В каком случае, если падающий луч плоско-поляризован, отраженного света не будет?
3. Что такое оптическая ось кристалла?
4. Какие плоскости в кристалле называются главными?
5. Почему свет, отраженный от границы раздела двух диэлектриков под углом Брюстера, является поляризованным?
6. В чем заключается явление Фарадея?
7. Какой световой пучок называют частично поляризованным?
8. Какие одноосные кристаллы называются положительными?
9. Какие оптически активные вещества называют правовращающими системами?
10. Как поляризован свет, падающий на анализатор, если при любом положении анализатора поле зрения оказывается просветленным?
11. Какими способами можно получить из оптически изотропного вещества анизотропное?
12. Какое явление использовано в призме Николя для удаления одного из лучей?

11.3. Методические указания к практическим занятиям

Задачи на поляризацию света можно условно разделить на четыре группы.

К первой группе можно отнести задачи, в которых для определения соответствующей интенсивности света используют закон Малюса, выяснив при этом величину угла α между главными плоскостями анализатора и поляризатора. В некоторых задачах необходимо учитывать потери интенсивности света вследствие поглощения или отражения от поверхностей поляризатора и анализатора.

Задачи второй группы обычно формулируются на базе явления поляризации света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков. При этом используются закон Брюстера и формулы Френеля. Если дается только угол падения светового луча на поверхность диэлектрика, то для определения угла преломления используют закон преломления.

В задачах на распространение световых лучей в анизотропных средах прежде всего необходимо выяснить причину, обуславливающую анизотропность среды, особенно это необходимо учитывать при различных способах получения искусственной оптической анизотропии, поскольку от способа получения зависит разность показателей преломления анизотропной среды для необыкновенного и обыкновенного лучей монохроматического света в направлении, перпендикулярном вектору напряженности электрического поля E .

В задачах, в которых требуется определить угол поворота плоскости поляризации, следует учитывать среду (оптически активный кристалл, оптически активный раствор, оптически неактивное вещество, находящееся в однородном магнитном поле).

11.4. Примеры решения задач

Пример 1. Для сравнения яркости освещения двух поверхностей одну из них рассматривают непосредственно, а вторую через два николя. Каково отношение яркостей, если освещение обеих поверхностей кажется одинаковым при угле между оптическими осями николей 70° ? Каждый николь поглощает 10% проходящей через него световой энергии.

Решение. Естественный свет интенсивностью I_e при переходе через поверхность призмы Николя разделяется на две световые волны: необыкновенная ($\frac{I_e}{2}$) и обыкновенная ($\frac{I_e}{2}$). В месте склейки призм канадским бальзамом обыкновенная волна претерпевает полное отражение, а необыкновенная проходит, претерпев лишь небольшое преломление и падает на вторую призму Николя.

С учетом поглощения интенсивность света, прошедшего через первый николь,

$$I_1 = 0,5 \cdot 0,9 I_e.$$

Учитывая поглощение света вторым никодем, на основании закона Малюса получаем интенсивность прошедшего света:

$$I_2 = 0,9I_1 \cos^2 \alpha = 0,5 \cdot 0,81I_e \cos^2 \alpha.$$

При прохождении через два николя интенсивность света уменьшилась в $\frac{I_e}{I_2} = 21$ раз.

Пример 2. Частично поляризованный свет проходит через николю. При повороте николя на 60° от положения, соответствующего максимальной яркости, яркость уменьшается в 2 раза. Пренебрегая поглощением света в николе, определить: а) отношение интенсивностей естественного и плоско поляризованного света; б) степень поляризации пучка.

Решение. а) При первом положении николя через него проходит весь ранее поляризованный свет интенсивностью I_n и поляризованный свет, интенсивность которого составляет половину интенсивности естественного света.

Интенсивность прошедшего света будет равна:

$$I' = I_n + 0,5I_e.$$

При втором положении николя прошедший свет имеет интенсивность:

$$I'' = I_n \cos^2 60^\circ + 0,5I_e = \frac{1}{4}I_n + \frac{1}{2}I_e.$$

По условию задачи $I' = 2I''$.

Используя полученные соотношения, имеем

$$I_n + 0,5I_e = 2\left(\frac{1}{4}I_n + 0,5I_e\right),$$

откуда $I_n = I_e$.

Следовательно, отношение интенсивностей естественного и плоско поляризованного света равно единице.

б) Степень поляризации определяется отношением интенсивности поляризованного света к общей интенсивности света:

$$\Delta = \frac{I_s - I_p}{I_s + I_p},$$

где I_s и I_p - максимальная и минимальная интенсивности в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Максимальная интенсивность света, пропускаемого никодем,

$$I_s = I' = I_n + 0,5I_e = \frac{3}{2}I_n.$$

При этом положении плоскости поляризации николя и падающего света параллельны. При повороте николя на 90° свет, ранее поляризованный, не пройдет, а на экран будет падать свет с минимальной интенсивностью:

$$I_p = \frac{1}{2}I_e = \frac{1}{2}I_n.$$

С учетом полученных значений интенсивностей

$$\Delta = 0,5.$$

Пример 3. Под каким углом должен падать пучок света из воздуха на поверхность жидкости, чтобы при отражении от дна стеклянного сосуда ($n_1 = 1,5$), наполненного водой ($n_2 = 1,33$), свет был полностью поляризован?

Решение. Пусть на границу воздух – вода естественный свет падает под углом α . Он частично отражается, частично преломляется под углом β . Эти пучки света частично поляризованы. По закону преломления

$$\sin \alpha = n_2 \sin \beta.$$

На границу вода – стекло падает частично поляризованный свет под углом β . Он частично отражается, частично преломляется. По условию задачи отраженный от стекла луч должен быть полностью поляризованным. При этих условиях угол между отраженным от стекла лучом и преломленным в стекло должен составлять $\frac{\pi}{2}$, а угол β будет углом полной поляризации.

По закону Брюстера

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{n_1}{n_2}, \quad \operatorname{tg} \beta = 1,25, \quad \beta = 48^\circ 24'.$$

Тогда угол α :

$$\sin \alpha = 1,33 \cdot \sin 48^\circ 24' = 0,994, \quad \alpha = 84^\circ.$$

11.5. Задачи для самостоятельного решения

11. 1. Анализатор в 2 раза ослабляет интенсивность падающего на его поляризованного света. Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора? Потерями света в анализаторе пренебречь.

11. 2. Луч естественного света последовательно проходит через две поляризационные призмы, угол между главными плоскостями которых 60° . Какая доля начального потока выйдет из анализатора?

11. 3. Во сколько раз ослабляется свет при прохождении через 2 николя, оптические оси которых составляют 63° , если в каждом тратится 10% падающего света?

11. 4. Естественный свет проходит через два николя, угол между главными плоскостями которых α , попадает на идеально отражающее зеркало, после чего снова проходит через те же николи. Определить интенсивность прошедшего света, если интенсивность падающего I_0 .

11. 5. На стеклянную пластинку ($n=1,5$) падает естественный пучок света под углом $\alpha = 45^\circ$. Построить ход лучей при отражении и преломлении на поверхности пластинки и условно отобразить примерный характер поляризации отраженного и преломленного лучей.

11. 6. Световой луч падает на поверхность воды ($n = 1,33$) под углом 45° . При помощи принятых обозначений дать характеристику поляризации отраженного и преломленного лучей.

11. 7. На какой высоте должно находиться Солнце, чтобы его свет, отраженный от поверхности воды, был максимально поляризован?

11. 8. Луч естественного света отражается от плоского стеклянного дна сосуда, наполненного водой. Каким должен быть угол падения луча, чтобы отраженный луч был максимально поляризован? Показатель преломления стекла 1,52, воды – 1,33.

11. 9. Определить коэффициент отражения стекла, показатель преломления которого $n = 1,5$, при условии, что естественный луч падает на его поверхность под углом Брюстера.

11. 10. Естественный луч падает на гипотенузную грань прямоугольной стеклянной призмы. Определить угол между гранями призмы, если отраженный луч полностью поляризован.

11. 11. Построить график зависимости коэффициента отражения для интенсивности света, поляризованного в плоскости падения, от угла падения.

11. 12. Построить график зависимости коэффициента пропускания для интенсивности света, поляризованного в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, от угла падения.

11. 13. Степень поляризации преломленных лучей определяют как соотношение

$$\Delta = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}},$$

где I_{\parallel} и I_{\perp} – интенсивности отраженных волн, поляризованных соответственно в плоскости падения и перпендикулярно к ней. Пользуясь формулами Френеля и понятием степени поляризации, построить график зависимости Δ от показателя преломления. Свет падает на поверхность под углом Брюстера.

11. 14. Построить ход лучей и условно отобразить характер их поляризации в поляризационной призме Николя.

11. 15. Степень поляризации частично поляризованного света $P = 0,25$. Определить отношение интенсивности поляризованной составляющей пучка света к интенсивности естественной составляющей.

11. 16. Частично поляризованный свет пропустили через анализатор. При этом интенсивность прошедшего света была максимальной. Как изменится интенсивность прошедшего света, если главную плоскость анализатора повернуть на угол $\alpha = 30^{\circ}$?

11. 17. Определить: 1) коэффициент отражения и степень поляризации отраженных лучей при падении естественного света на стекло ($n = 1,5$) под углом 45° ; 2) степень поляризации преломленных лучей.

11. 18. Луч естественного света проходит сквозь плоскопараллельную стеклянную пластинку ($n = 1,54$), падая на неё под углом полной поляризации. Найти степень поляризации лучей, прошедших через пластинку.

11. 19. Пучок плоско поляризованного света ($\lambda = 589$ нм) падает на пластинку исландского шпата перпендикулярно его оптической оси. Определить длины волн обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле, если показатели преломления исландского шпата для обыкновенного и для необыкновенного лучей равны $n_o = 1,66$ и $n_e = 1,49$.

11. 20. Кварцевая пластинка, вырезанная параллельно оптической оси, помещена между двумя скрещенными николями так, что её оптическая ось составляет угол 45° с главными направлениями николей. При какой минимальной толщине пластинки свет с $\lambda_1 = 643$ нм будет проходить через систему с максимальной интенсивностью, а свет с $\lambda_2 = 564$ нм будет сильно ослаблен. Разность $n_e - n_o = 0,009$.

11. 21. Свет проходит через систему из двух скрещенных николей, между которыми расположена кварцевая пластинка, вырезанная перпендикулярно к оптической оси. Определить минимальную толщину пластинки, при которой свет с $\lambda_1 = 436$ нм будет полностью задерживаться, а свет с $\lambda_2 = 497$ нм – пропускаться наполовину. Постоянная вращения кварца для этих длин волн $\varphi_{01} = 41,5$ град/мм, $\varphi_{02} = 31,1$ град/мм.

11. 22. Определить толщину кварцевой пластинки, для которой угол поворота плоскости поляризации света с длиной волны $\lambda = 490$ нм равен 150° . Удельное вращение кварца для этой длины волны $26,3$ град/мм.

12. Учебный блок «Дисперсия света. Поглощение света»

12.1. Основные понятия и законы

Абсолютный показатель преломления однородной прозрачной среды

$$n = \frac{c}{g},$$

где c — скорость света в вакууме, а g — скорость света в среде, значение которой зависит от длины волны (*дисперсия света*).

Для твердых прозрачных веществ

$$n = f(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots,$$

где A, B, C, \dots – постоянные, зависящие от рода вещества; λ – длина волны света.

Фазовая скорость v и групповая скорость u связаны между собой

$$u = g - \lambda \frac{dg}{d\lambda}.$$

Количественной характеристикой дисперсии света может служить *дисперсия вещества*:

$$\bar{d} = \frac{dn}{d\lambda}.$$

Если $\frac{dn}{d\lambda} < 0$ – *нормальная дисперсия*; если $\frac{dn}{d\lambda} > 0$ – *аномальная дисперсия*.

В области нормальной дисперсии $u < g$;

в области аномальной дисперсии $u > g$, но всегда $u < c$.

Электронная теория дисперсии дает зависимость показателя преломления от частоты колебаний вектора E :

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m} \cdot \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2},$$

где ε_0 – электрическая постоянная; N – концентрация электронов; m и e – соответственно заряд и масса электрона; ω_0 – собственная частота колебаний электронов среды; ω – частота колебаний излучения.

При $\omega \approx \omega_0$ формула неприменима (область поглощения).

Область частот $\omega \rightarrow \omega_0$ – область аномальной дисперсии.

Изменение интенсивности света при поглощении происходит в соответствии с *законом Бугера – Ламберта*:

$$I = I_0 e^{-\alpha l},$$

где I_0 – интенсивность света, падающего на поглощающий слой вещества, I – интенсивность света, прошедшего через слой вещества толщиной l , α – коэффициент поглощения, зависящий от рода вещества и длины волны света, а в случае растворов и от концентрации раствора C :

$$\alpha = \alpha_1 C,$$

α_1 – коэффициент поглощения на единицу концентрации раствора (*удельное поглощение*).

Совместное действие поглощения и рассеяния света изменяет интенсивность по закону:

$$I = I_0 e^{-\mu l},$$

где $\mu = \alpha + \alpha_1$ (α – коэффициент поглощения, α_1 – коэффициент рассеяния).

12.2. Вопросы для самоконтроля

1. Как изменяется длина световой волны при переходе из одной среды в другую?
2. Как связаны показатель преломления среды и скорость распространения света в ней?
3. Объясните механизм поглощения света.
4. Почему коэффициент поглощения света зависит от длины волны?
5. В чем заключается метод скрещенных призм?
6. Какую величину принято называть средней дисперсией вещества?
7. Как экспериментально обнаруживаются области аномальной дисперсии света?
8. Почему аномальная дисперсия наблюдается в области поглощения и вблизи от неё?

12.3. Методические указания к практическим занятиям

Большинство задач на дисперсию света носит качественный характер. В расчетных задачах чаще всего необходимо определить пространственное распределение световых лучей с различной длиной волны в процессе их преломления в различных прозрачных средах. Их решение осуществляется

на основании второго закона преломления с учетом дополнительных данных, приведенных в задаче.

При решении задач на поглощение световых волн различными средами следует прежде всего воспользоваться законом Бугера – Ламберта. В зависимости от среды используют соответствующее значение коэффициента поглощения, в случае растворов зависимость от концентрации. В некоторых комбинированных задачах учитывают также потери световой энергии вследствие отражений на поверхностях устройств.

12.4. Примеры решения задач

Пример 1. Найти зависимость между групповой скоростью u и фазовой скоростью v для следующих законов дисперсии:

$$\text{а) } v = \frac{a}{\sqrt{\lambda}}; \quad \text{б) } v = bk; \quad \text{в) } v = \frac{c}{\omega^2},$$

где a , b , c - некоторые постоянные; λ , k , ω - соответственно длина волны, волновое число и циклическая частота.

Решение. Воспользуемся формулой

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}.$$

$$\text{а) } v = \frac{a}{\sqrt{\lambda}}, \quad \frac{dv}{d\lambda} = -\frac{1}{2} a \lambda^{-\frac{3}{2}}, \quad u = a \lambda^{-\frac{1}{2}} + \lambda \cdot \frac{1}{2} a \lambda^{-\frac{3}{2}} = \frac{3}{2} v;$$

$$\text{б) } k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad v = \frac{2\pi b}{\lambda}, \quad \frac{dv}{d\lambda} = -2\pi b \lambda^{-2}, \quad u = 2v;$$

$$\text{в) } v = \frac{c}{\omega^2}, \quad \omega^2 = \frac{4\pi^2 v^2}{\lambda^2}, \quad v = \sqrt[3]{\frac{c}{4\pi^2}} \lambda^{\frac{2}{3}}, \quad \frac{dv}{d\lambda} = \frac{2}{3} \lambda^{-\frac{1}{3}} \sqrt[3]{\frac{c^2}{4\pi^2}}, \quad u = \frac{1}{3} v.$$

Пример 2. Показатель преломления воздуха при нормальных условиях для желтой линии натрия ($\lambda = 589,3$ нм) $n_1 = 1.0002918$. Определить показатель преломления n_2 воздуха при температуре 30°C и давлении $3 \cdot 10^6$ Па.

Решение. Области поглощения в спектрах воздуха и натрия не совпадают, поэтому необходимо использовать уравнение

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{\omega_o^2 - \omega^2}.$$

Полагая, что концентрация электронов прямо пропорциональна концентрации молекул или массе единицы объема вещества, а масса пропорциональна плотности, можем записать:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}.$$

Поскольку циклическая частота вращения электронов в атоме не зависит от температуры вещества, то $\omega_o = \text{const}$.

Отношение плотностей можно определить из системы уравнений Клапейрона-Менделеева для двух состояний газа:

$$p_1 = \frac{\rho_1}{\mu} RT_1, \quad p_2 = \frac{\rho_2}{\mu} RT_2,$$

откуда

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1}.$$

Тогда

$$n_1^2 = 1 + \frac{N_1 e^2}{m \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{\omega_o^2}, \quad n_2^2 = 1 + \frac{N_2 e^2}{m \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{\omega_o^2},$$

откуда

$$\frac{n_1^2 - 1}{n_2^2 - 1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1}.$$

Решая полученное уравнение относительно n_2 , получим:

$$n_2 = \sqrt{\frac{n_1^2 - 1}{p_1 T_2} p_2 T_1} + 1. \quad n_2 = 1,00793.$$

Пример 3. Показатель преломления прозрачного вещества для небольшого интервала длин волн, вдали от линий поглощения, связан с длиной волны соотношением $n = A + \frac{B}{\lambda^2}$.

Определить: а) фазовую скорость; б) групповую скорость; г) дисперсию вещества.

Решение. а) Фазовая скорость света в веществе

$$v = \frac{c}{n}, \quad v = \frac{c}{A + \frac{B}{\lambda^2}} = \frac{c \lambda^2}{A \lambda^2 + B}.$$

б) Групповая скорость

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}, \quad \frac{dv}{d\lambda} = \frac{2\lambda c B}{A \lambda^2 + B^2}, \quad u = \frac{c \lambda^2}{A \lambda^2 + B^2} - \frac{2\lambda c B}{A \lambda^2 + B^2}.$$

г) Дисперсия вещества η численно равна

$$\eta = \frac{dn}{d\lambda}, \quad \eta = -\frac{2B}{\lambda^3}.$$

Поскольку $B > 0$, то $\eta < 0$, а значит, дисперсия нормальная.

Пример 4. Коэффициент поглощения стекла для некоторой монохроматической волны $\alpha = 1 \text{ м}^{-1}$. На сколько процентов уменьшается интенсивность света при прохождении волной оконного стекла ($l = 5 \text{ мм}$)?

Решение. Пусть интенсивность падающего света I_o , а прошедшего I .

Тогда искомая величина $k = \frac{I_o - I}{I_o} \cdot 100\%$.

Согласно закону Бугера-Ламберта

$$I = I_o e^{-\alpha l}.$$

Тогда

$$k_1 = \frac{I_o - I_o e^{-\alpha l}}{I_o} = 1 - e^{-\alpha l};$$

$$k_1 - 1 = -e^{-\alpha l}; \quad 1 - k_1 = e^{-\alpha l}.$$

Прологарифмировав, получим

$$\ln 1 - k_1 = -\alpha l.$$

Рассчитав k_1 , получим

$$k = k_1 \cdot 100\%; \quad k = 0,5\%.$$

Пример 5. Из некоторого вещества изготовили две пластинки: одну толщиной $l_1 = 3,8$ мм, другую - $l_2 = 9$ мм. Введя поочередно эти пластинки в пучок монохроматического света, обнаружили, что первая пропускает 0,84 светового потока, вторая – 0,70. Найти линейный коэффициент поглощения этого вещества.

Решение. В нашем случае $\rho_1 = \frac{I_1}{I_o} = 0,84;$ $\rho_2 = \frac{I_2}{I_o} = 0,70.$

1) Если пренебречь отражением на поверхностях, то по закону Бугера-Ламберта имеем:

$$I_1 = I_o e^{-\alpha l_1}; \quad I_2 = I_o e^{-\alpha l_2}.$$

Тогда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\rho_1 I_o}{\rho_2 I_o} = \frac{\rho_1}{\rho_2}; \quad \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{e^{-\alpha l_1}}{e^{-\alpha l_2}} = e^{\alpha l_2 - l_1};$$

$$\alpha l_2 - l_1 = \ln \frac{\rho_1}{\rho_2}; \quad \alpha = \frac{\ln \frac{\rho_1}{\rho_2}}{l_2 - l_1}.$$

2) С учетом отражения на поверхностях:

Пусть ρ - коэффициент отражения. Тогда после первой поверхности

$$I' = 1 - \beta I_o.$$

До второй поверхности доходит

$$I'' = I' e^{-\alpha l_1} = 1 - \beta I_o e^{-\alpha l_1}.$$

После отражения на второй поверхности

$$I_1 = 1 - \beta I'' = 1 - \beta^2 I_o e^{-\alpha l_1}.$$

Аналогично для второй пластинки получим

$$I_2 = 1 - \beta^2 I_o e^{-\alpha l_2}.$$

Тогда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1 - \beta^2 I_o e^{-\alpha l_1}}{1 - \beta^2 I_o e^{-\alpha l_2}} = \frac{e^{-\alpha l_1}}{e^{-\alpha l_2}} = e^{\alpha l_2 - l_1}.$$

Откуда

$$\alpha = \frac{\ln \frac{\rho_1}{\rho_2}}{l_2 - l_1}.$$

12.5. Задачи для самостоятельного решения

12.1. Считая абсолютный показатель преломления капле воды для красных лучей равным 1,33, покажите, что все точки радуги видны для красного света под углом 40° по отношению к прямой, соединяющей глаз наблюдателя с центром радуги.

12.2. Можно ли в Минске, во время летнего солнцестояния, наблюдать радугу в любое время дня?

12.3. Длина световой волны в воде в 1,33 раза меньше чем в воздухе. Означает ли это, что водолаз не сможет видеть окружающие предметы в естественном цвете?

12.4. Световой пучок, содержащий две монохроматические составляющие, падает на боковую грань призмы с преломляющим углом 60° , находящейся в воде под углом 45° . Показатели преломления для этих составляющих равны соответственно 1,515 и 1,520. Определите угол между обоими составляющими после выхода из призмы.

12.4. Построить ход лучей, которые проходят через плоскопараллельную пластинку, для двух случаев: 1) на пластинку падает монохроматический пучок света; 2) на пластинку падает пучок белого света.

12.5. Световой луч, частота которого $\nu = 7,0 \cdot 10^{14}$ Гц, переходит из вакуума в воду ($n_1 = 1,33$). Чему равно при этом изменение длины волны $\Delta\lambda$?

12.6. В воде на расстоянии $r = 20$ м один водолаз передает другому сигнал с помощью белого света. Показатель преломления для красных лучей в воде $n_{кр} = 1,329$, для фиолетовых – $n_{ф} = 1,344$? Определить интервал времени Δt , на который раньше красные лучи по сравнению с фиолетовыми попадут в глаз наблюдателя?

12.7. Длина волны фиолетовых лучей света в воздухе $\lambda = 400$ нм. Чему равна длина волны этих лучей в воде ($n = 1,33$) λ_1 ?

12.8. Для луча света, который выходит из вещества в воздух, предельный угол полного внутреннего отражения для данного вещества $\gamma = 45^\circ$. Чему равна скорость распространения света в веществе g ?

12.9. Луч света проходит через пластинки из алмаза ($n_1 = 2,4$) и стекла ($n_2 = 1,5$) за одно и то же время. Определить отношение толщин пластинок?

12.10. Световой пучок, содержащий две монохроматические составляющие, падает на боковую грань призмы с преломляющим углом 60° , находящейся в воде под углом 45° . Показатели преломления для этих составляющих равны соответственно 1,515 и 1,520. Определить угол между обоими составляющими после выхода из призмы.

12.11. Длина световой волны в воде в 1,33 раза меньше чем в воздухе. Означает ли это, что водолаз не сможет видеть окружающие предметы в естественном цвете?

12. 12. Считая абсолютный показатель преломления капель воды для красных лучей равным 1,33, показать, что все точки радуги видны для красного света под углом 40° по отношению к прямой, соединяющей глаз наблюдателя с центром.

12. 13. Определить дисперсию вещества, фазовую и групповую скорости, если известно, что показатель преломления прозрачного вещества для малых интервалов длин волн зависит от длины волны следующим образом:

$$n = A + B/\lambda^2.$$

12. 14. Исходя из предположения о том, что зависимость показателя преломления n от длины волны в вакууме λ для некоторой среды определяется формулой $n = a + b/\lambda^2$, где a и b – const, найти выражение через λ для групповой скорости u в данной среде.

12. 15. Используя связь между фазовой и групповой скоростью

$$u = \vartheta - \lambda \frac{d\vartheta}{d\lambda},$$

показать, что $u = \frac{d\omega}{dk}$, где ω – круговая частота, k – волновое число ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$).

12. 16. Доказать, что в области нормальной дисперсии групповая скорость меньше скорости света в вакууме.

12. 17. Найти зависимость между групповой скоростью u и фазовой v

для следующих законов дисперсии: 1) $\vartheta = \frac{a}{\sqrt{\lambda}}$; 2) $\vartheta = bk$; 3) $\vartheta = \frac{c}{\omega^2}$,

где a , b и c – некоторые постоянные, λ , k , ω – длина волны, волновое число, круговая частота соответственно.

12. 18. Выразить групповую скорость $u = \frac{d\omega}{dk}$ через фазовую скорость

света v и $\frac{d\vartheta}{d\lambda}$, а также через v и $\frac{dn}{d\lambda}$.

12. 19. Показатель преломления сероуглерода для света с длинами волн 509, 534 и 589 нм равен соответственно 1,647, 1,640 и 1,630. Определить фазовую и групповую скорости света вблизи длины волны 534 нм.

12. 20. Измерение дисперсии показателя преломления оптического стекла дало $n_1 = 1,528$ для $\lambda_1 = 0,434$ мкм и $n_2 = 1,523$ для $\lambda_2 = 0,486$ мкм. Вычислить отношение групповой скорости к фазовой скорости для света с длиной волны 0,434 мкм.

12. 21. Прозрачная пластинка пропускает половину светового падающего потока. Определить коэффициент поглощения, если толщина пластинки $l = 4,2$ см. Считать, что 10% падающего потока отражается от поверхности пластинки.

12. 22. Коэффициент поглощения стекла для некоторой монохроматической волны $\alpha = 1 \text{ м}^{-1}$. На сколько процентов уменьшается интенсивность света при прохождении волной оконного стекла ($l_1 = 5$ мм), зеркального стекла ($l_2 = 10$ мм)?

12. 23. Из некоторого вещества изготовили две пластинки толщиной

$l_1 = 3,8$ мм и $l_2 = 9$ мм. Введя поочередно эти пластинки в пучок монохроматического света, обнаружили, что первая пропускает 0,84 светового потока, вторая – 0,70. Найти линейный коэффициент поглощения данного вещества.

12. 24. Пластика толщиной $l_1 = 3,8$ мм пропускает 0,84 падающего светового потока. Другая пластика с того же вещества толщиной $l_2 = 9,0$ мм пропускает 0,70 того же светового потока. Найти коэффициент поглощения этого вещества.

12. 25. В 4 % растворе вещества в прозрачно растворителе интенсивность света на глубине 20 см ослабляется в 2 раза. Во сколько раз ослабляется интенсивность света на глубине 30 см в 8 % растворе того же вещества?

12. 26. Монохроматический свет проходит через слой вещества толщиной 15 см. При этом его интенсивность уменьшается в 4 раза. Определить коэффициент рассеяния, если коэффициент поглощения $0,025 \text{ см}^{-1}$.

12. 27. Через стопу из $N = 5$ одинаковых плоскопараллельных стеклянных пластинок проходит монохроматический пучок света. Толщина каждой пластинки $l = 0,50$ см, а коэффициент отражения на каждой поверхности $\rho = 0,050$. Стопа пропускает 0,55 интенсивности падающего света. Определить коэффициент поглощения данного стекла. Вторичными отражениями света пренебречь.

12. 28. В центре сферического слоя вещества, внутренний радиус которого равен r_1 , наружный – r_2 , находится точечный монохроматический источник, испускающий световой поток Φ . Линейный коэффициент поглощения вещества равен α , коэффициент отражения поверхностей – ρ . Пренебрегая вторичными отражениями, найти интенсивность света на выходе из этого вещества.

12. 29. Сколько слоев половинного ослабления в пластинке, которая уменьшает интенсивность узкого пучка рентгеновского излучения в 50 раз?

13. Учебный блок «Оптика движущихся источников света»

13.1. Основные понятия и законы

В отличие от всех других скоростей движения физических объектов, меняющихся при переходе от одной системы координат к другой, скорость света в вакууме c не зависит ни от движения источника света, ни от движения наблюдателя. Она одинакова во всех инерциальных системах отсчёта, т. е. является *инвариантом*.

Воспринимаемая неподвижным наблюдателем частота ν света, приходящего от движущегося источника, отличается от собственной частоты ν_0 излучаемого света неподвижным источником (*эффект Доплера*).

Если угол между скоростью источника v и направлением наблюдения равен 90° (*поперечный эффект Доплера*), то:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2},$$

где $\beta = \frac{v}{c}$.

Если угол между скоростью источника v и направлением наблюдения равен 0° (взаимное удаление), то имеет место *красное смещение*:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}.$$

Если угол между скоростью источника v и направлением наблюдения равен 180° (взаимное сближение), то имеет место *фиолетовое смещение*:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}.$$

13.2. Вопросы для самоконтроля

1. Что такое абберация света?
2. Какова цель опытов Физо по распространению света в движущейся среде? Каков результат опытов?
3. Какова цель опытов Майкельсона по обнаружению абсолютного движения Земли в эфире? Какой результат опытов?
4. Каковы следствия из опытов Майкельсона?
5. Какие методы определения скорости света вам известны?
6. Каковы исторические предпосылки возникновения в физике концепции эфира?
7. Какие изменения понятие эфира претерпело после создания электромагнитной теории света?
8. Каковы основные применения эффекта Доплера в астрофизике?

13.3. Методические указания к практическим занятиям

При решении задач на данную тему следует прежде всего выяснить характер относительного движения источника и приемника. В зависимости от того, удаляется источник от приемника или приближается, сможем выбрать соответствующий знак в выражении для частоты колебаний, регистрируемой приемником (ν) и частоты колебаний источника (ν_0).

Во многих задачах необходимо воспользоваться связью между частотой колебаний ν и соответствующей длиной волны λ .

Иногда следует использовать закон сложения скоростей в специальной теории относительности:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}},$$

где u' - относительная скорость; v - переносная скорость; u - абсолютная скорость.

13.4. Примеры решения задач

Пример 1. С какой скоростью удаляется от Солнечной системы некоторая туманность, если линия водорода $\lambda = 434$ нм в ее спектре смещена в сторону длинных волн на 13 нм?

Решение. Смещение спектральной линии произошло вследствие эффекта Доплера

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}$$

Поскольку

$$v_0 = \frac{c}{\lambda}, \quad v = \frac{c}{\lambda + \Delta\lambda},$$

то, упрощая подкоренное выражение, получим

$$\frac{c}{\lambda + \Delta\lambda} = \frac{c}{\lambda} \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}, \quad \left(\frac{\lambda}{\lambda + \Delta\lambda}\right)^2 = \frac{c-v}{c+v}.$$

Решая последнее уравнение относительно v , получаем:

$$v = \frac{c \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda + \Delta\lambda} \right)^2 \right]}{1 + \left(\frac{\lambda}{\lambda + \Delta\lambda} \right)^2}, \quad v = \frac{1}{3}c.$$

Пример 2. Ионизированный атом, вылетев из ускорителя со скоростью $0,89c$, испустил фотон в направлении своего движения. Определить скорость фотона относительно ускорителя.

Решение. Применим формулу закона сложения скоростей

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

Фотон – квант света, поэтому $v = c$.

Тогда

$$u = \frac{0,89c + c}{1 + \frac{0,89c \cdot c}{c^2}} = c.$$

Вывод: скорость света в вакууме не зависит от скорости источника света и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.

Пример 3. Эффект Доплера позволил открыть двойные звезды столь удаленные, что разрешение их с помощью телескопа оказалось невозможным. Спектральные линии таких звезд периодически становятся двойными, из чего можно предположить, что источником излучения

являются две звезды, обращающиеся вокруг их центра масс. Считая массы обеих звезд одинаковыми, найти расстояние между ними, если максимальное расщепление линий равно $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 1,2 \cdot 10^{-4}$, причем оно возникает через каждые 30 дней.

Решение. В нашем случае период вращения звезд вокруг их центра масс $T = 30$ дней. Пусть радиус вращения r (рис. 31).

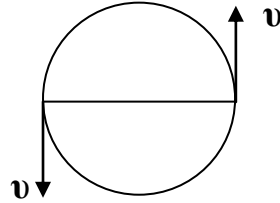


Рис. 31

Искомое расстояние $l = 2r$. Линейная скорость вращения звезд $v = \omega \cdot r$, где угловая скорость $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Тогда $v = \frac{2\pi r}{T}$. Откуда $r = \frac{vT}{2\pi}$; $l = \frac{2vT}{2\pi} = \frac{vT}{\pi}$.

Скорость v определим из соотношения:

$$\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2, \quad \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1,$$

где

$$\nu_1 = \nu \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}, \quad \nu_2 = \nu \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}.$$

Поскольку $\lambda_1 = \frac{c}{\nu_1}$, $\lambda_2 = \frac{c}{\nu_2}$,

то

$$\lambda_1 = \frac{c}{\nu} \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} = \lambda \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}, \quad \lambda_2 = \frac{c}{\nu} \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}.$$

Тогда

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} = \frac{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}}{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}} - \frac{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}}{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}} = \frac{1 + \frac{v}{c} - 1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2v}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Полученное выражение возведем в квадрат

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2 = \frac{4v^2}{c^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{4v^2}{c^2 - v^2}.$$

Откуда

$$4v^2 = c^2 - v^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)^2; \quad v^2 = \frac{c^2}{4 + \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)^2}; \quad v = \frac{c}{\sqrt{4 + \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)^2}}.$$

Тогда

$$l = \frac{cT}{\pi \sqrt{4 + \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)^2}}. \quad l = 3 \cdot 10^7 \text{ км.}$$

13.5. Задачи для самостоятельного решения

13. 1. Космический корабль движется от Земли со скоростью 10 км/с. Определить изменение частоты $\Delta\nu$, которую регистрирует приемник, если антенна корабля излучает частоту $\nu = 30$ МГц.

13. 2. С какой скоростью удаляется от нас некоторая туманность, если известно, что линия водорода $\lambda = 434$ нм в её спектре смещена в сторону красной области спектра на 130 нм?

13. 3. Каково доплеровское смещение $\Delta\lambda$ линии водорода ($\lambda = 486,1$ нм) при наблюдении вдоль пучка водородных каналовых лучей, имеющих среднюю скорость $v = 1300$ км/с?

13. 4. Определить доплеровское смещение $\Delta\lambda$ спектральной линии атомарного водорода $\lambda = 656,3$ нм, если её наблюдать под прямым углом к пучку атомов водорода с кинетической энергией $T = 1,0$ МэВ.

13. 5. Как движется относительно Земли некоторая туманность, если известно, что линия водорода H_γ ($\lambda = 434$ нм) в спектре туманности смещена на 2 нм в сторону красной области спектра?

13. 6. Радиолокатор работает на длине волны $\lambda = 50$ см. Определить скорость приближающегося самолета, если частота биений между сигналом передатчика и сигналом, отраженным от самолета, в месте расположения локатора равна $\Delta\nu = 1$ кГц.

13. 7. С какой скоростью должна была бы двигаться автомашина, чтобы красный свет светофора ($\lambda = 700$ нм) превратился в зеленый ($\lambda = 550$ нм)?

13. 8. Каково доплеровское смещение $\Delta\lambda$ линии водорода ($\lambda = 486,1$ нм) при наблюдении в направлении, перпендикулярном к направлению пучка водородных каналовых лучей, имеющих среднюю скорость $v = 1300$ км/с?

13. 9. Чему равно максимальное доплеровское смещение $\Delta\lambda$ для линии водорода H_β , излучаемой движущимися атомами водорода с кинетической энергией 4 МэВ.

13. 10. Чему равно максимальное полугодовое изменение $\Delta\lambda$ зеленых линий ($\lambda = 550$ нм) спектра звезд, лежащих в плоскости земной орбиты?

13. 11. Определить длину волны излучения источника монохроматического излучения, который движется со скоростью $v = 0,1 c$ в направлении приемника, регистрирующего излучение этого источника $\lambda = 542$ нм.

13. 12. Определить относительное изменение длины волны источника

$(\frac{\Delta\lambda}{\lambda})$, который движется со скоростью v в среде с показателем преломления n .

13. 13. Каким будет относительное изменение спектральных линий излучения атомарного водорода $(\frac{\Delta\lambda}{\lambda})$, обусловленное эффектом Доплера, если температура атомарного водорода составляет $T = 300$ К?

13. 14. По некоторой прямой движутся в одном направлении наблюдатель со скоростью $v_1 = 0.50 c$ и впереди него источник монохроматического света со скоростью $v_2 = 0.75 c$. Собственная частота света равна ω_0 . Определить частоту света, которую зафиксирует наблюдатель.

13. 15. При наблюдении спектральной линии $\lambda = 590$ нм в направлениях на противоположные края солнечного диска на его экваторе обнаружили различие в длинах волн на $\Delta\lambda = 8$ пм. Найти период вращения Солнца вокруг собственной оси.

13. 16. Получить выражение для уширения $\Delta\lambda/\lambda$ спектральных линий в случае поперечного эффекта Доплера.

13.17. Определить доплеровское смещение для спектральной линии атомарного водорода с длиной волны λ , если её наблюдать под прямым углом к пучку атомов водорода с кинетической энергией T .

14. Контрольный тест по учебному модулю № 2 «Волновая оптика»

Вариант 1

1.1 В результате интерференции света происходит

- 1) усиление результирующих световых колебаний;
- 2) ослабление результирующих световых колебаний;
- 3) усиление или ослабление результирующих световых колебаний в разных точках пространства;
- 4) усиление или ослабление результирующих световых колебаний в определенной точке пространства;
- 5) наложение световых волн.

2.2 Когерентные источники, расположенные на расстоянии $l = 3$ мм, лежат в плоскости, параллельной экрану, на расстоянии $L = 8$ м от него. Если длина световой волны $\lambda = 600$ нм, то расстояние между соседними интерференционными полосами на экране Δy равно

- 1) 1,2 мм; 2) 1,6 мм; 3) 1,8 мм; 4) 2,4 мм; 5) 2,5 мм.

3.2 Если при освещении дифракционной решетки светом ($\lambda = 600$ нм) второй максимум виден под углом $\varphi = 30^\circ$ к нормали решетки, то постоянная её d равна

- 1) 2,0 мкм; 2) 2,4 мкм; 3) 3,0 мкм; 4) 3,6 мкм; 5) 4,2 мкм.

4.2 Если перпендикулярно световому лучу ($\lambda = 500$ нм) установить стеклянную пластинку ($n = 1,5$) толщиной $d = 2$ мм, то фаза волны изменится на $\Delta\phi$, равное

- 1) $2 \cdot 10^3 \pi$; 2) $3 \cdot 10^3 \pi$; 3) $4 \cdot 10^3 \pi$; 4) $5 \cdot 10^3 \pi$; 5) $6 \cdot 10^3 \pi$.

5.3 Если при нормальном падении света на дифракционную решетку частично перекрываются третий и четвертый порядки, то при этом на длину волны $\lambda_1 = 780$ нм спектра третьего порядка в спектре четвертого порядка накладывается длина волны λ_2 , равная

- 1) 460 нм; 2) 480 нм; 3) 520 нм; 4) 585 нм; 5) 600 нм.

6.3 Если на стеклянную пластинку ($n = 1,5$) толщиной $d = 0,4$ мкм падает нормально пучок белого света, то в отраженном пучке усиливаются световые волны с длиной волны λ , равной

- 1) 460 нм; 2) 480 нм; 3) 520 нм; 4) 585 нм; 5) 800 нм.

7.3 Два когерентные источники света ($\lambda = 500$ нм), расстояние между которыми $l = 1,0$ мм, лежат в плоскости, параллельной экрану. Если расстояние между центральным и вторым максимумами интерференционной картины $y = 4,0$ мм, то экран расположен от источников света на расстоянии L , равном ... м.

8.3 Если в точку в среде с показателем преломления $n = 2$ приходят когерентные лучи ($\lambda = 400$ нм) с геометрической разностью хода $\Delta = 1,6$ мкм, то в ней наблюдается интерференционный

9.4 Если число дифракционных максимумов в спектре, который получается при помощи дифракционной решетки с постоянной $d = 2,0$ мкм, равно $k = 7$, то длина волны падающего на решетку монохроматического света λ равна ... мкм.

10.5 Если на дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием, то красная линия гелия ($\lambda_1 = 670$ нм) спектра второго порядка накладывается на линию в спектре третьего порядка с длиной волны λ_2 , равной ... нм.

Вариант 2

1.1 А42.2(2) Если две волны от когерентных источников света с частотой колебаний $\nu = 5,0 \cdot 10^{14}$ Гц сходятся в одной точке, для которой разность хода $\Delta = 9,0 \cdot 10^{-7}$ м, то в данной точке результирующие световые колебания

- 1) усиливаются;
- 2) ослабляются;
- 3) не изменяются;
- 4) усиливаются в 2 раза;
- 5) ослабляются в 2 раза.

2.2 А42.4(3) На экране, расположенном на расстоянии $L = 6,0$ м от двух когерентных источников, лежащих в параллельной экрану плоскости, расстояние между двумя ближайшими интерференционными максимумами, лежащими по разные стороны от симметрии установки, равно $y = 4,8$ мм. Если расстояние между источниками света равно $l = 1,0$ мм, то длина световой волны λ равна

- 1) 400 нм;
- 2) 450 нм;
- 3) 500 нм;
- 4) 550 нм;
- 5) 600 нм.

3.2 А42.18(4) Если на дифракционную решётку с периодом $d = 2$ мкм нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм, то угол между главными максимумами второго порядка φ равен

- 1) 30° ;
- 2) 45° ;
- 3) 60° ;
- 4) 80° ;
- 5) 90° .

4.2 А42.7(3) В опыте Юнга расстояние между отверстиями $l = 1,0$ мм, установка освещается монохроматическим светом ($\lambda = 600$ нм). Если при этом ширина интерференционной полосы $\Delta y = 1,8$ мм, то экран расположен от отверстий на расстоянии L , равном

- 1) 1,5 м;
- 2) 2,0 м;
- 3) 3,0 м;
- 4) 4,4 м;
- 5) 5,2 м.

5.3 В42.11(4) Если на дифракционную решетку ($N = 500$ штрихов на 1 мм) нормально падает монохроматический свет ($\lambda = 720$ нм), то наибольший порядок спектра k равен

- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4;
- 5) 5.

6.3 В42.6(4) Два когерентные источники света ($\lambda = 500$ нм) расположены в плоскости, параллельной экрану, находящемуся на расстоянии $L = 4,0$ м от источников. Если расстояние между центральным и вторым максимумами интерференционной картины $y = 4,0$ мм, то расстояние l между источниками равно

- 1) 1,0 мм;
- 2) 2,0 мм;
- 3) 3,0 мм;
- 4) 4,4 мм;
- 5) 5,2 мм.

7.3 А42.20(4) Если на дифракционную решетку, которая имеет $N = 500$ штрихов на 1 мм, падает плоская монохроматическая волна ($\lambda = 500$ нм), то

наибольший порядок дифракционного спектра k , который можно наблюдать, равен

8.3 В42.2(3) Если в точку в среде с показателем преломления $n = 1,5$ приходят когерентные лучи ($\lambda = 600$ нм) с геометрической разностью хода $\Delta = 2,0$ мкм, то в ней наблюдается интерференционный

9.4 В42.17(4) Если на щель шириной $b = 1,00$ мкм падает нормально свет, длина волны которого $\lambda = 500$ нм, то угловое положение первого минимума относительно центрального максимума определится углом φ , равным ... градусов.

10.5 В42.19(5) На дифракционную решетку, постоянная которой $d = 0,02$ мм, падает нормально свет с длиной волны $\lambda = 500$ нм. Если расстояние между нулевым и четвертым дифракционными максимумами на экране $l = 50$ мм, то экран расположен от дифракционной решетки на расстоянии r , равном ... м.

Вариант 3

1.1 А42.13(1) Периодом дифракционной решетки называют (рис. 32)

- 1) L ; 2) l ; 3) d ;
4) b ; 5) a .

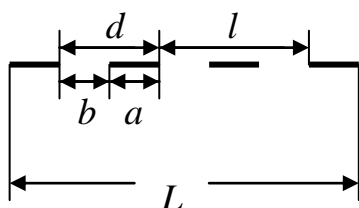


Рис. 32

2.2 А42.15(2) Если на дифракционной решетке длиной $L = 2,5$ см нанесено $N = 12500$ штрихов, то постоянная такой решетки d равна

- 1) 1,5 мкм; 2) 2,0 мкм; 3) 2,5 мкм; 4) 2,8 мкм; 5) 3,0 мкм.

3.2 А42.5(3) Если расстояние между когерентными источниками увеличить в 2 раза, а расстояние от их плоскости до экрана уменьшить в 2 раза, то расстояние между интерференционными максимумами

- 1) увеличится в 4 раза; 2) увеличится в 2 раза;
3) уменьшится в 4 раза; 4) уменьшится в 2 раза;
5) не изменится.

4.2 А42.9(2) Если на пути монохроматической световой волны в воздухе нормально установить стеклянную пластинку толщиной $d = 2,0$ мкм и с показателем преломления $n = 1,5$, то оптическая длина пути изменится на ΔL , равное

- 1) 1,0 мкм; 2) 1,5 мкм; 3) 2,0 мкм; 4) 2,5 мкм; 5) 3,0 мкм.

5.3 A42.11(3) Если световые волны от двух когерентных источников приходят в некоторую точку экрана с разностью хода $\Delta = 2,8$ мкм, то в данной точке для длины волны $\lambda = 800$ нм наблюдается интерференционный минимум, порядок которого равен

- 1) 2; 2) 3; 3) 4; 4) 5; 5) 7.

6.3 B42.4(4) Если в точке, в которую приходят желтые лучи света ($\lambda = 600$ нм), распространяющиеся в воде ($n = 1,33$) с геометрической разностью хода $(r_2 - r_1) = 1,8$ мкм, наблюдается интерференционный максимум, то в оптической разности хода при этом укладывается количество N полуволен $\frac{\lambda}{2}$, равное ...

- 1) 4; 2) 6; 3) 8; 4) 9; 5) 10.

7.3 B42.7(4) Если на пути одного из интерферирующих лучей ($\lambda = 660$ нм) разместить прозрачную пластинку, показатель преломления которой $n = 1,6$, то центральная светлая полоса при этом сместится и займет место шестой светлой полосы при толщине пластинки d , равной ... мкм.

8.3 B42.14(4) Если на дифракционную решетку ($d = 2$ мкм) нормально падает свет ($\lambda = 589$ нм), то число наблюдаемых на экране дифракционных максимумов N равно ...

9.4 B42.16(4) Если на дифракционную решётку ($d = 2$ мкм) нормально падает свет, который прошел через светофильтр, пропускающий волны длиной от $\lambda_1 = 400$ нм до $\lambda_2 = 500$ нм, то спектры разных порядков ... накладываться друг на друга.

10.5 B42.20(5) При наблюдении через дифракционную решетку красный край первого спектра виден на расстоянии $l = 3,5$ см от середины изображения щели на экране, расположенном на расстоянии $r = 50,0$ см от решетки. Если постоянная решетки $d = 0,01$ мм, то длина волны красного света λ равна ... нм.

Вариант 4

1.1 A42.14(3) Периодом дифракционной решетки называют (рис. 4. 17)

- 1) $l + a$; 2) $d + l$; 3) $d + a$; 4) $d + b$; 5) $a + b$.

2.2 A42.16(3) Если постоянная дифракционной решетки $d = 2,0$ мкм, то на всей длине решетки $L = 2,5$ см нанесено N штрихов, равное

- 1) 15000; 2) 12500; 3) 10500; 4) 10000; 5) 9500.

3.2 А42.6(3) Если в опыте Юнга зеленый светофильтр ($\lambda_1 = 500$ нм) заменить красным ($\lambda_2 = 650$ нм), то расстояние между соседними интерференционными полосами Δy на экране увеличится в

- 1) 1,3 раза; 2) 1,6 раза; 3) 1,8 раза; 4) 2,0 раза; 5) 2,4 раза.

4.2 А42.8(3) В опыте Юнга расстояние между отверстиями $l = 0,5$ мм, расстояние до экрана $L = 3$ м. Если установку осветить монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 500$ нм, то вторая интерференционная полоса получается от центра картины на расстоянии y , равном

- 1) 2 мм; 2) 4 мм; 3) 5 мм; 4) 6 мм; 5) 10 мм.

5.3 А42.12(4) Если в некоторой точке пространства наблюдается второй интерференционный максимум когерентных световых волн с длиной волны $\lambda = 600$ нм, то оптическая разность хода волн Δ при этом равна

- 1) 1,2 мкм; 2) 1,6 мкм; 3) 1,8 мкм; 4) 2,0 мкм; 5) 2,4 мкм;

6.3 В42.3(3) Если в точке, в которую приходят желтые лучи света ($\lambda = 600$ нм), распространяющиеся в воде ($n = 1,33$) с геометрической разностью хода $(r_2 - r_1) = 1,2$ мкм, наблюдается интерференционный минимум, то в оптической разности хода при этом укладывается количество N полуволн $\frac{\lambda}{2}$, равное

- 1) 2; 2) 3; 3) 4; 4) 5; 5) 7.

7.3 В42.8(4) Если на пути одного из интерферирующих лучей ($\lambda = 660$ нм) разместить прозрачную пластинку толщиной $d = 6,6$ мкм, то центральная светлая полоса при этом сместится и займет место шестой светлой полосы при показателе преломления пластинки n , равном ...

8.3 В42.12(4) Если на дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет ($\lambda = 500$ нм), то наибольший порядок спектра $k = 4$ будет наблюдаться для решетки, у которой на 1 мм укладывается N штрихов, равное ...

9.4 В42.18(4) На узкую щель падает нормально свет, длина волны которого $\lambda = 500$ нм. Если угловое положение первого минимума относительно центрального максимума определяется углом $\varphi = 30^\circ$, ширина щели b равна ... мкм.

10.5 В42.10(4) На тонкую пленку ($n = 1,5$) перпендикулярно к ее поверхности падает луч света ($\lambda = 600$ нм). Если пленка в отраженном свете будет казаться желтой, то наименьшая толщина пленки d равна ... мкм.

Ответы

Электромагнитная природа света. Интерференция и дифракция света

Вариант 1

1.1	2.2	3.2	4.2	5.3	6.3	7.3	8.3	9.4	10.5
3	2	2	3	4	5	4,0м	максимум	0,666мкм	447 нм

Вариант 2

1.1	2.2	3.2	4.2	5.3	6.3	7.3	8.3	9.4	10.5
2	1	3	3	2	1	4	максимум	30°	0,5 м

Вариант 3

1.1	2.2	3.2	4.2	5.3	6.3	7.3	8.3	9.4	10.5
3	2	3	1	2	3	6,6 мкм	7	будут	700 нм

Вариант 4

1.1	2.2	3.2	4.2	5.3	6.3	7.3	8.3	9.4	10.5
5	2	1	4	1	4	1,6	500	1,0	0,1

15. Экзаменационные вопросы

1. Предмет оптики. Исторический очерк развития оптики. Электромагнитная и квантовая теории света.
2. Источники и приёмники света.
3. Основные энергетические и световые величины и их единицы.
4. Связь между энергетическими и световыми величинами.
5. Геометрическая оптика. Принцип Ферма. Законы отражения и преломления света.
6. Полное внутреннее отражение. Волоконная оптика.
7. Сферические зеркала.
8. Отражение и преломление света на плоской границе раздела двух сред. Призмы.
9. Преломление света на сферической поверхности.
10. Преломление света в линзах. Формула линз. Оптическая сила линзы.
11. Центрированные оптические системы.
12. Аберрации оптических систем, методы их ликвидации.
13. Световой поток, проходящий через оптическую систему. Диафрагмы, светосила.
14. Глаз как оптическая система.
15. Оптические приборы (лупа, микроскоп, телескоп, фотоаппарат, проекционный аппарат).
16. Понятие о когерентности. Явление интерференции.
17. Методы наблюдения интерференции в оптике.
18. Влияние размеров и некогерентности источника на интерференционную картину.
19. Интерференция при отражении и преломлении света в тонких плёнках и пластинах. Полосы равного наклона.
20. Полосы равной толщины. Кольца Ньютона.
21. Интерферометры. Многолучевая интерференция.
22. Применение интерференции в науке и технике. Просветление оптики, интерференционные фильтры.

23. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля. Зоны Френеля.
Объяснение прямолинейного распространения света по волновой теории. Геометрическая оптика как предельный случай волновой оптики.
24. Дифракция Френеля на круглом отверстии, на круглом экране,
на краю полубесконечного экрана.
25. Дифракция Фраунгофера на узкой щели и круглом отверстии.
26. Дифракционные решётки. Дисперсия и разрешающая способность решётки.
27. Дифракция света на пространственных решётках.
Понятие о голографии.
28. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах. Формула Вульфа-Брегга.
29. Дифракционная природа изображения. Разрешающая способность оптических приборов.
30. Естественный и поляризованный свет. Эллиптическая и круговая поляризации. Поляризаторы и анализаторы. Закон Малюса.
31. Поляризация света при отражении и преломлении на границе раздела однородных и изотропных сред. Закон Брюстера.
32. Двойное лучепреломление. Поляризация света при двойном лучепреломлении.
33. Интерференция плоскополяризованных волн.
Хроматическая поляризация.
34. Искусственная оптическая анизотропия.
35. Поляризационные приборы.
36. Вращение плоскости поляризации. Поляриметры и их применение.
37. Дисперсия света. Нормальная и аномальная дисперсии.
38. Основы электронной теории дисперсии света.
39. Поглощение света. Коэффициент поглощения. Спектры поглощения. Цвет тел.
40. Применение дисперсии. Спектральные приборы.

41. Рассеяние света. Закон Релея.
42. Молекулярное рассеяние света. Цвет неба и зари.
43. Скорость света. Фазовая и групповая скорости. Эффект Вавилова-Черенкова.
44. Явление Доплера в оптике.
45. Понятие о нелинейной оптике.
46. Астрономические методы измерения скорости света.
47. Лабораторные методы измерения скорости света.
48. Опыт Физо.
49. Опыт Майкельсона.
50. Оптические явления в природе.