



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»
(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

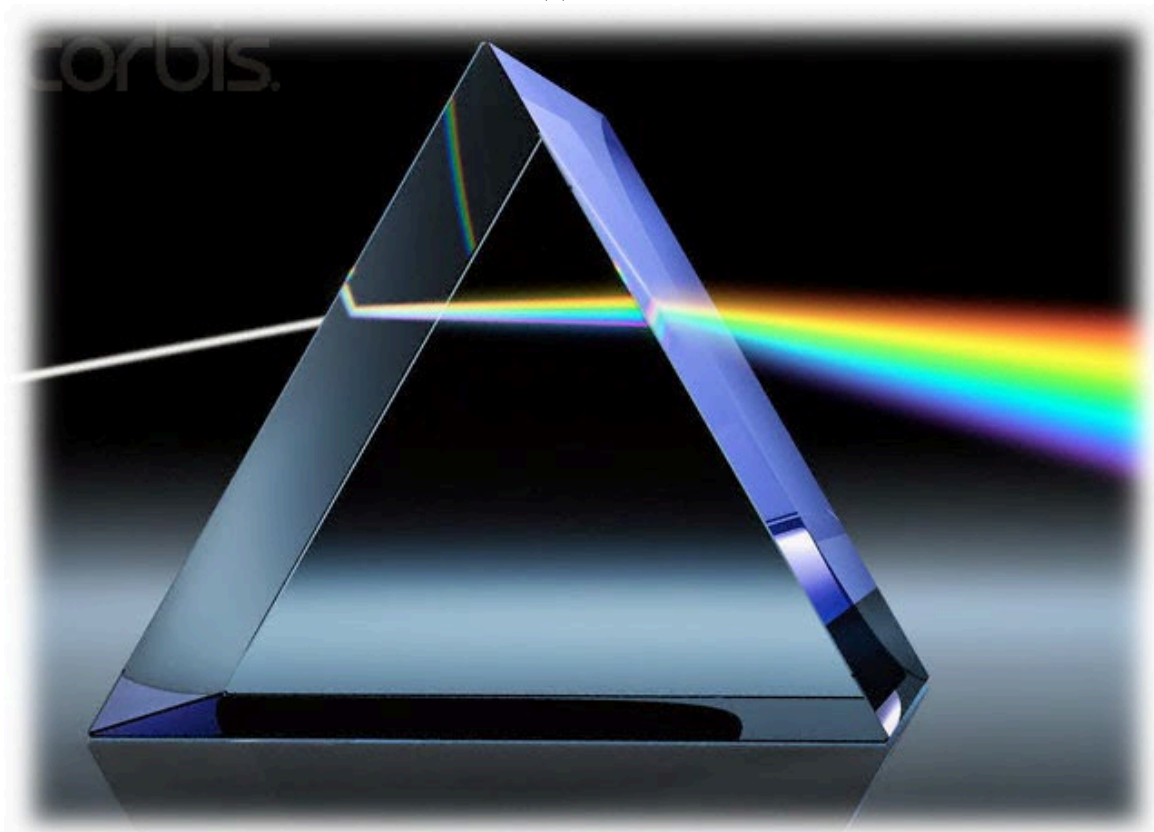
Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства
имени А.Н. Костякова
Кафедра физики

Н.Н. Ивахненко, М.Ю. Бадекин

ФИЗИКА

Раздел ОПТИКА

Учебно-методическое пособие



Москва
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева
2023

УДК 535
ББК 22.34
И 23

Рецензенты:

Дорошкевич А.С. к.ф.-м.н., нач. группы «Установка ЭГ-5» Сектор Исследования нейтронно-ядерных взаимодействий отделения Ядерной физики лаборатории Нейтронной физики им. И.М. Франка;
Чурочкин Д.В. к.ф.-м.н., доцент кафедры общей, теоретической и компьютерной физики СГУ им. Н.Г. Чернышевского.

И 23 Ивахненко, Н. Н. «Физика. Раздел Оптика»: учебно-методическое пособие / Н. Н. Ивахненко, М. Ю. Бадекин; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, 2023. – 88 с. – Текст: электронный.

ISBN 978-5-9675-2003-7

DOI 10.26897/978-5-9675-2003-7-2023-88

В предложенном учебно-методическом пособии представлен комплексный подход к изучению раздела «Оптика». Пособие содержит подразделы: «Интерференция света», «Дифракция света», «Дисперсия и адсорбция света», «Поляризация света». Каждый раздел имеет составляющие: теоретическая часть, практическая часть, примеры решения задач, задания для самостоятельного решения, справочная часть, контрольная часть: тестовые задания. Учебно-методическое пособие может быть использовано обучающимися по направлению подготовки 35.03.10 Ландшафтная архитектура.

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией института садоводства и ландшафтной архитектуры РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, протокол № 3 от 27.10.2023 г.

I 23 Ivakhnenko, N.N. «Physics. Section optics»: educational and methodological manual / N. N. Ivakhnenko, M. Yu. Badekin Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, 2023. – 88 p. – Текст: electronic.

The proposed educational manual presents an integrated approach to the study of the «Optics» section. The manual contains subsections: «Interference of light», «Diffraction of light», «Dispersion and adsorption of light», «Polarization of light». Each section has components: theoretical part, practical part, examples of problem solving, tasks for independent solution, reference part, control part: test tasks. The educational and methodological manual can be used by students in the areas of training 35.03.10 Landscape architecture.

© Ивахненко Н.Н., Бадекин М.Ю., 2023
© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени
К.А. Тимирязева, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
ТЕМА 1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА	
<i>Теоретическая часть</i>	
1.1. Основные понятия и определения	8
1.2. Методы получения когерентных волн. Метод Юнга. Бипризма Френеля. Зеркала Френеля	9
1.3. Условие возникновения интерференционных максимумов и минимумов при интерференции света	11
1.4. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников	12
1.5. Интерференция в тонких пленках	13
1.6. Понятие о голографии	17
1.7. Применение явления интерференции света	22
<i>Практическая часть</i>	
Примеры решения задач	24
Задания для самостоятельного решения	27
Справочная часть	30
Контрольная часть: тестовые задания	31
Верные ответы на тесты	34
ТЕМА 2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА	
<i>Теоретическая часть</i>	
2.1. Основные понятия и определения	35
2.2. Принцип Гюйгенса - Френеля	36
2.3. Метод зон Френеля. Прямолинейность распространения света	38
2.4. Дифракция Фраунгофера (в параллельных лучах). Дифракция на щели. Дифракция на дифракционной решетке	43
2.5. Разрешающая способность оптических приборов	47
2.6. Дифракция рентгеновских волн	48
<i>Практическая часть</i>	
Примеры решения задач	50
Задания для самостоятельного решения	53
Справочная часть	56
Контрольная часть: тестовые задания	57
Верные ответы на тесты	60
ТЕМА 3. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА. АБСОРБЦИЯ СВЕТА	
<i>Теоретическая часть</i>	
3.1. Понятия нормальной и аномальной дисперсии	61
3.2. Абсорбция света	63
<i>Практическая часть</i>	
Примеры решения задач	65
Задания для самостоятельного решения	66

Справочная часть	67
Контрольная часть: тестовые задания	68
Верные ответы на тесты	70
ТЕМА 4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА	
<i>Теоретическая часть</i>	
4.1. Естественный и поляризованный свет	71
4.2. Поляризация при отражении света на границе прозрачных изотропных диэлектриков. Закон Брюстера	72
4.3. Поляризация при прохождении света через оптически анизотропные среды	72
4.4. Поляризаторы и анализаторы. Закон Малюса	74
4.5. Вращение плоскости поляризации	75
4.6. Искусственная оптическая анизотропия. Эффект Керра	76
<i>Практическая часть</i>	
Примеры решения задач	78
Задания для самостоятельного решения	80
Справочная часть	82
Контрольная часть: тестовые задания	83
Верные ответы на тесты	86
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	87

ВВЕДЕНИЕ

Оптика – раздел физики, в котором изучаются: природа света, его закономерности излучения, распространения и взаимодействия света с веществом.

Исторически на природу света было два мнения. Ньютон считал, что свет – это поток упругих шариков, т.е. он был сторонником корпускулярной природы света. На основании этой теории он объяснил законы отражения и преломления света. Закон преломления света имел вид:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v}{c} = n,$$

где v – скорость света в среде; c – скорость света в вакууме.

Так как $n \geq 1$, то v больше c , что неверно.

В это же время Гюйгенс высказал гипотезу, что свет – это поток механических волн. На основании этой теории он объяснил законы отражения и преломления света.

Закон преломления света у него имел вид:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = n, \text{ что, верно.}$$

Во времена жизни Ньютона и Гюйгенса (начало 18 века) не знали, что c больше v поэтому и победила теория Ньютона, так как она была простая и наглядная, хотя прав был Гюйгенс.

С открытием дифракции (конец 19 века) Френель доказал волновую теорию света, но какие это были волны не знали.

Максвелл создал свою теорию электромагнетизма (1873г.), из которой вытекало, что в природе должны существовать электромагнитные волны,

скорость которых в вакууме равна скорости света. После этого стали считать, что свет — это поток электромагнитных волн.

Для объяснения теплового излучения Планк высказал гипотезу, согласно которой излучение света происходит не непрерывно, а определенными порциями – квантами, т.е. подтверждается квантовая теория света.

Энергия кванта определяется частотой света ν :

$$\varepsilon = h \cdot \nu ,$$

где постоянная Планка равна $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с .

После открытия фотоэффекта, эффекта Комптона, которые нельзя было объяснить с волновой теории света, но которые легко объяснялись с корпускулярной, Эйнштейн высказал гипотезу, что свет не только излучается, но и распространяется и поглощается определенными порциями – квантами.

Кванты электромагнитного излучения Эйнштейн назвал фотонами, они движутся со скоростью света, и не существуют в состоянии покоя (их масса покоя равна нулю). Основными характеристиками фотонов являются их энергия – ε , импульс – p и масса – m , определяемые соотношениями:

$$\varepsilon = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} , \quad p = \frac{h \cdot \nu}{c} = \frac{h \cdot c}{\lambda} , \quad m = \frac{h \cdot \nu}{c^2} = \frac{h}{c \cdot \lambda} .$$

Эти формулы связывают корпускулярные характеристики фотона – их энергию и импульс – с волновой характеристикой излучения – частотой (или длиной волны).

После работ Эйнштейна по фотоэффекту снова стали считать, что свет обладает корпускулярными свойствами.

Таким образом, согласно современным представлениям, свет имеет двойственную корпускулярно-волновую природу.

С волновой точки зрения свет – это электромагнитные волны, воспринимаемые человеческим глазом. Диапазон длин волн видимого света лежит в пределах $4 \cdot 10^{-7}$ м – $8 \cdot 10^{-7}$ м. К световым волнам относится также невидимое для глаза электромагнитное излучение: инфракрасное (ИК) (излучение в диапазоне $5 \cdot 10^{-4}$ м – $8 \cdot 10^{-7}$ м) и ультрафиолетовое (УФ) (излучение в диапазоне $4 \cdot 10^{-7}$ м – 10^{-9} м).

Это связано с тем, что свойства ИК и УФ электромагнитных волн близки к свойствам видимого света.

Таким образом, свет представляет собой поток электромагнитных волн, которые излучаются, распространяются и поглощаются в виде отдельных порций энергии – квантов или фотонов света.

Фотон – минимальная порция электромагнитного излучения.

Поскольку природа света двойственная, для объяснения световых явлений и процессов в оптике используются две теории. С одной стороны, свет представляет собой электромагнитную волну – явления описываются волновой оптикой, а с другой – поток корпускул (частиц) – фотонов и явления описываются корпускулярной (квантовой) оптикой.

Оптику принято подразделять на геометрическую, волновую и квантовую.

Геометрическая оптика не рассматривает природу света. Ее основными законами являются прямолинейность распространения света, законы отражения и преломления на границе раздела прозрачных сред.

Волновая оптика изучает явления, в которых проявляются волновые свойства света (интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия, голография).

Квантовая оптика изучает явления, в которых проявляются квантовые свойства света (тепловое излучение, фотоэффект, эффект Комптона, давление света).

ТЕМА 1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

1.1. Основные понятия и определения

В основе волновой оптики лежит *принцип Гюйгенса*: каждая точка открытого волнового фронта является точечным источником вторичных сферических волн, огибающая которых дает положение фронта волны в следующий момент времени. Все вторичные волны когерентны.

Фронт волны – геометрическое место точек, до которых дошло колебательное движение к данному моменту времени.

Волновая поверхность – геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковых фазах.

В зависимости от вида волновой поверхности, различают *плоские* и *сферические* волны.

Плоские волны – волновая поверхность плоскость.

Сферические волны – волновая поверхность сфера.

Интерференцией света называется наложение двух или нескольких световых волн, в результате которого происходит пространственное перераспределение энергии этих волн и возникает интерференционная картина – чередующиеся максимумы и минимумы интенсивности света.

Необходимым условием интерференции волн является их *когерентность*.

Когерентными называются волны, имеющие одинаковую частоту (*монохроматические*) и постоянную во времени разность фаз в точке наложения.

Кроме того, волны должны обладать пространственной когерентностью – электрический и магнитный векторы электромагнитной волны лежат в одной плоскости, т.е. свет плоско-поляризован. Таким образом, явление *интерференции волн* заключается в перераспределении интенсивности в области их суперпозиции при условии, что эти волны когерентны.

Естественные источники дают некогерентные лучи. Каждый атом излучает квантами – фотонами в течение 10^{-8} с. Новый квант излучения уже не когерентен с предыдущим. Когерентными будут только лучи, полученные из одного и того же фотона. Таким образом, для получения когерентных световых волн, световую волну от одного источника света каким-либо образом «делят» на две части, а после прохождения ими различных путей снова сводят их вместе. При этом *разность фаз складываемых колебаний* будет определяться *оптической разностью хода* этих волн.

Оптическая разность хода (Δ) это геометрическая разность хода l , умноженная на показатель преломления среды n : $\Delta = l \cdot n$.

Способов разделения естественного света от первичного источника на две когерентные между собой волны два: *деление волнового фронта* (метод Юнга, зеркала Френеля, и др.) и *деление амплитуды* (интерференция в тонких пленках).

1.2. Методы получения когерентных волн

а) Метод Юнга

В методе Юнга когерентными источниками света служат две узкие щели S_1 и S_2 (рис. 1.1), расположенные близко друг к другу на расстоянии d много меньшем от расстояния до экрана. Результат интерференции наблюдается на экране, расположенном параллельно обоим щелям на большом расстоянии ($l \gg d$) от них. Щели S_1 и S_2 находятся на волновой поверхности световой волны от источника S , а, следовательно, (согласно принципу Гюйгенса) являются когерентными и при наложении будут давать интерференционную картину.

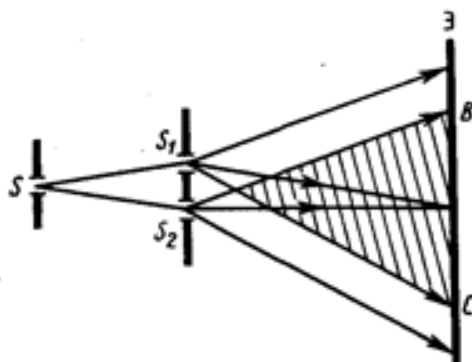


Рис. 1.1 Щели Юнга

б) Бипризма Френеля

Бипризма Френеля – две трёхгранные призмы, сложенные основаниями (рис 1.2). Когерентными источниками (S_1 и S_2) являются мнимые изображения источника S , возникающие в каждой призме. Световые волны от источника S являются когерентными, а, следовательно, являются когерентными и волны, идущие от S_1 и S_2 .

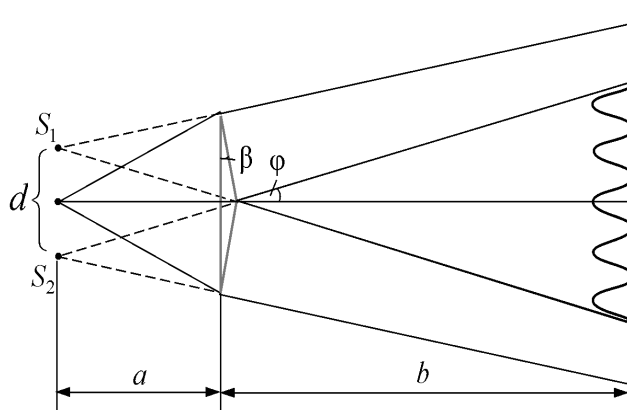


Рис. 1.2. Бипризма Френеля

в) Зеркала Френеля

Зеркала Френеля – два плоских зеркала, сложенные под углом близким к 180° (рис. 1.3). Когерентными источниками (S_1 и S_2) являются действительные изображения источника S , возникающие в каждом зеркале.

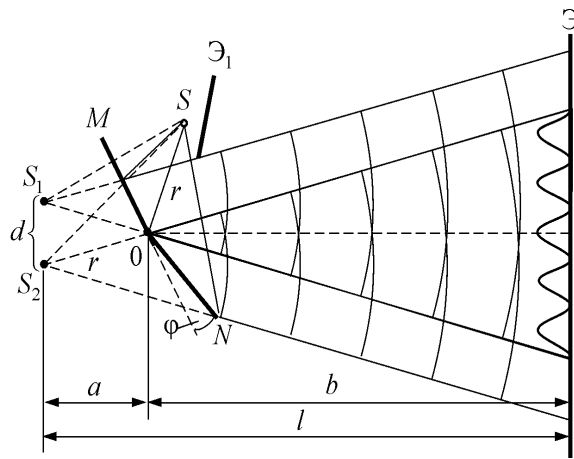


Рис. 1.3 Зеркала Френеля

1.3. Условие возникновения интерференционных максимумов и минимумов при интерференции света

При наложении двух световых волн, результирующая амплитуда, а, следовательно, и интенсивность, определяется разностью фаз складываемых когерентных колебаний.

Если в точку наблюдения обе световые волны приходят *синфазно* (фазы их колебаний одинаковы или отличаются на *четное* число π), то в этой точке световые колебания *усиливают друг друга*.

Если же световые волны в точку наблюдения приходят в *противоположных фазах* (фазы колебаний отличаются на *нечетное* число π), то в этой точке световые колебания *ослабляют друг друга*.

Другими словами, если $\Delta\varphi = \pm 2k\pi$, световые колебания *усиливают друг друга*, если же $\Delta\varphi = \pm(2k+1)\pi$, то световые колебания *ослабляют друг друга*.

Разность фаз складываемых колебаний определяется оптической разностью хода этих волн. Если на оптической разности хода ($\Delta = \Delta x \cdot n$) волн укладывается *целое число длин волн* или *четное число длин полуволн* обе световые волны приходят в точку наблюдения в одинаковых фазах и

усиливают друг друга. Таким образом, условие интерференционного максимума можно записать в виде: $\Delta = \pm k \cdot \lambda = \pm 2k \cdot \lambda / 2$.

Если же на оптической разности хода ($\Delta = \Delta x \cdot n$) волн укладывается нечетное число длин полуволн обе световые волны приходят в точку наблюдения в противоположных фазах и ослабляют друг друга.

Таким образом, условие интерференционного минимума можно записать в виде: $\Delta = \pm (2k + 1) \cdot \lambda / 2$. Возникновение интерференционных максимумов и минимумов при интерференции света показано на рис. 1.4 (а, б). При $\Delta = \lambda$ на экране светлое пятно – максимум. При $\Delta = \lambda / 2$ на экране темное пятно – минимум.

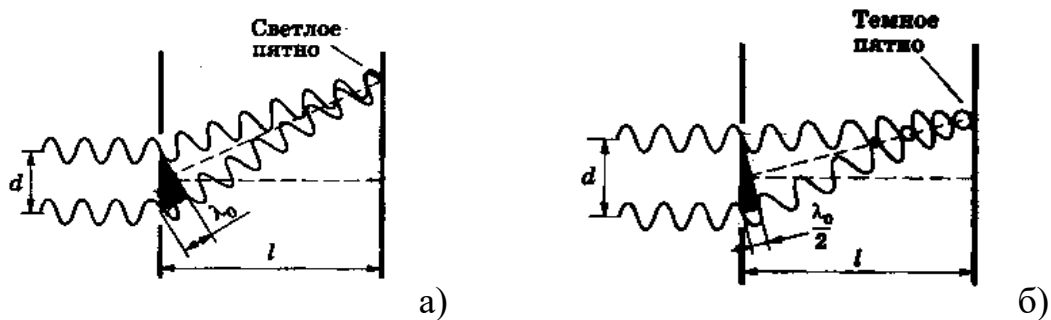


Рис. 1.4 Возникновение максимумов и минимумов при интерференции света

1.4. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников

Рассчитаем интерференционную картину от двух когерентных источников (узкие щели S_1 и S_2), расположенных близко друг к другу на расстоянии d и являющиеся реальными или мнимыми изображениями единого источника света (рис. 1.5). Результат интерференции наблюдается на экране, расположенном параллельно обоим щелям на большом расстоянии ($l \gg d$) от них. Начало отсчета картины выбрано в точке O , симметричной относительно обеих щелей. Интенсивность картины в любой точке A экрана, лежащей на

расстоянии x от точки O , определяется разностью хода волн от обоих источников $\Delta = S_2 - S_1$. Нетрудно показать, что в данном случае $\Delta = x \cdot d / l$ (при $l \gg d$), откуда легко получить выражения для координат интерференционных максимумов и минимумов:

$$x_{\max} = \pm k \cdot \frac{l}{d} \cdot \lambda, \quad x_{\min} = \pm \left(k + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{l}{d} \cdot \lambda, \quad (1.1)$$

где $k=0, 1, 2, \dots$ – порядок максимумов и минимумов.

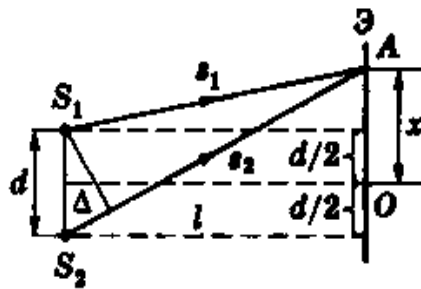


Рис. 1.5 Положение максимума и минимума при интерференции света

Главный максимум, соответствующий $k=0$ будет находиться в точке O , а по обе стороны от него, на равных расстояниях, будут расположены чередующиеся максимумы и минимумы первого, второго и т.д. порядков. Расстояние между соседними максимумами или минимумами называется *шириной интерференционной полосы*, равной в данном случае $\Delta x = l \cdot \lambda / d$. Описанная картина справедлива лишь для *монохроматического света*.

1.5. Интерференция в тонких пленках

Интерференцией света объясняется цветовая окраска мыльных пузырей или тонких масляных пленок на воде, хотя и мыльный раствор, и масло бесцветные. Световые волны отражаются от верхней и нижней поверхностей пузыря или масляной пленки и *интерferируют*. Когерентные пучки можно

получать при отражении света от верхней и нижней поверхностей тонкой прозрачной плоскопараллельной пластинки. На пластинке происходит *деление амплитуды*, поскольку фронты волн на ней сохраняются, изменяя лишь направление своего движения. При этом возможны *два вида* интерференционных картин.

Полосы равного наклона – интерференционные полосы, возникающие в результате наложения лучей, падающих на плоскопараллельную пластинку ($d=const$) рассеянным пучком (под разными углами, $\alpha \neq const$). В местах, где $\alpha=const$ возникают полосы равного наклона. В общем случае это эллипсы или окружности.

Полосы равной толщины – интерференционные полосы, возникающие в результате наложения параллельного пучка лучей, отраженных от пластинки переменной толщины (клинообразной).

Рассмотрим отражение светового луча точечного источника S от верхней и нижней поверхностей плоскопараллельной пластинки толщиной d (рис. 1.6). Образованные при этом лучи 1 и 2 будут параллельными друг другу и когерентными, поэтому если их свести в точке P на экране, они будут интерферировать.

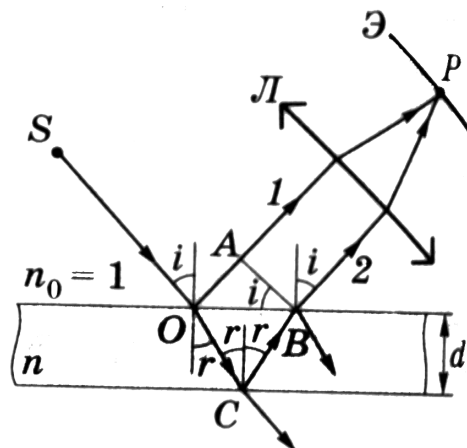


Рис. 1.6 Интерференция в тонких пленках

Результат наложения когерентных лучей определяется *оптической разностью хода* между ними $\Delta = n_1 \cdot S_1 - n_2 \cdot S_2$, где S_1 и S_2 – геометрические длины

путей, проходимых обоими лучами в различных средах, n_1 и n_2 – показатели преломления этих сред. Очевидно, что в данном случае оптическая разность хода между интерферирующими лучами 1 и 2 от точки O до плоскости AB определяется соотношением: $\Delta = n \cdot (|OC| + |CB|) - |OA| \pm \lambda/2$, где n – показатель преломления пластинки (для воздуха $n=1$). Появление слагаемого $\pm \lambda/2$ обусловлено потерей полуволны при отражении луча света 1 от верхней поверхности пластинки. Нетрудно показать, что оптическая разность хода при отражении луча света от прозрачной пластинки толщиной d равна:

$$\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda}{2} = 2dn \cdot \sqrt{1 - \sin^2 r} \pm \frac{\lambda}{2} = 2dn \cdot \cos r \pm \frac{\lambda}{2}, \quad (1.2)$$

где i – угол падения луча на пластинку, r – угол преломления луча.

Таким образом, в отраженном свете условие интерференционных максимумов имеет вид:

$$2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda, \quad (1.3)$$

а условие интерференционных минимумов представлено в виде:

$$2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (1.4)$$

где $k=0, 1, 2, \dots$ – порядок интерференции.

Следует отметить, что в проходящем свете (при рассматривании картины сквозь прозрачную пластинку) оптическая разность хода отличается от отраженного света на $\lambda/2$, поскольку не происходит потери полуволны, как при отражении от пластинки. Поэтому максимумам интерференции в отраженном свете соответствуют минимумы в проходящем, и наоборот.

То есть, условия усиления и ослабления в проходящем свете *меняются местами*.

Типичным примером полос равной толщины являются *кольца Ньютона* – интерференционная картина, наблюдаемая при отражении света от воздушного зазора переменной толщины, образованного между плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны (рис. 1.7.).

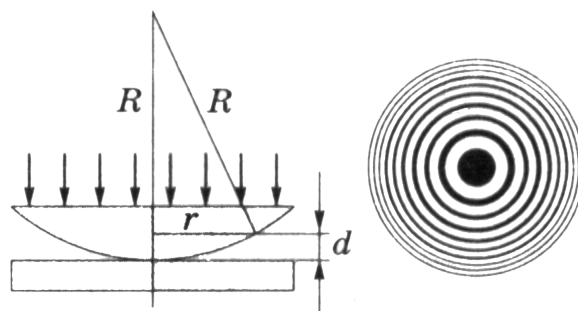


Рис. 1.7 Кольца Ньютона

Параллельный пучок света падает на плоскую поверхность линзы нормально, а полосы равной толщины имеют вид концентрических окружностей (колец). Полученное выше выражение для оптической разности хода двух световых волн, отраженных от плоскопараллельной пластинки в данном случае для воздушного ($n=1$) промежутка толщиной d и нормальном падении лучей ($\sin 0^\circ=0$) приобретает вид: $\Delta=2d+\lambda/2$. Из геометрических построений можно выразить толщину воздушного промежутка через радиус соответствующего k -того интерференционного кольца:

$$\Delta = \frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2}, \quad (1.5)$$

где R – радиус кривизны линзы.

Приравнивая это выражение к условию интерференционного максимума, получим формулу для вычисления *в отраженном свете* радиуса k -того *светлого* кольца:

$$r_k^{\max} = \sqrt{\left(k - \frac{1}{2}\right)\lambda R}. \quad (1.6)$$

Аналогично, для вычисления радиуса k -того *темного* кольца имеем:

$$r_k^{\min} = \sqrt{k\lambda R}. \quad (1.7)$$

В проходящем свете светлые и темные кольца меняются местами.

1.6. Понятие о голографии

Фотография – запись амплитудных значений излучения, исходящего от предмета. Фотография даёт плоское изображение предмета.

Голография – полная запись амплитуд и фаз излучения, исходящего от предмета. Голография даёт объёмное изображение предмета.

Метод получения голограмм предложил в 1948г. Габор. Однако полное осуществление идеи Габора стало возможным только после появления в 1960 г. источников света высокой степени когерентности – *лазеров*. Исходная схема Габора была усовершенствована американскими физиками Э. Лейтом и Ю. Упатниексом, которые получили в 1963 г. первые лазерные голограммы. Советский ученый Ю.Н. Денисюк предложил в 1962 г. оригинальный метод фиксирования голограмм на толстослойной эмульсии. Этот метод, в отличие от голограмм на тонкослойной эмульсии, даёт цветное изображение предмета. Особенностью является то, что голограмма получается без использования линз.

Голограмма – это еще не изображение предмета, а интерференционная картина, возникающая на фотопленке путем наложения двух когерентных пучков света: опорного пучка и волнового поля, исходящего от предмета. Для получения голограммы необходимо высоко-когерентное излучение. Такое излучение дают лазеры. Таким образом, источником света при получении голограммы являются лазеры. При наложении опорного пучка и волнового

поля, исходящего от предмета, возникает интерференционная картина смены минимумов и максимумов света, зависящая от разности хода, а она, в свою очередь, зависит от формы предмета. При освещении этой пластинки (голограммы) пучком света, зафиксированная на ней волна возобновляется в почти первобытном виде, так что при восприятии возобновленной волны глазом зрительное ощущение бывает практически таким, каким оно было бы при наблюдении самого предмета.

Простейшие схемы метода получения голограмм на тонкослойной эмульсии и возобновления изображения даны на рис. 1.8 (а) – схема установки для получения голограмм, а рис. 1.8 (б) – схема возобновления изображения. Световой пучок, испускаемый лазером, расширен с помощью системы линз и делится на две части.

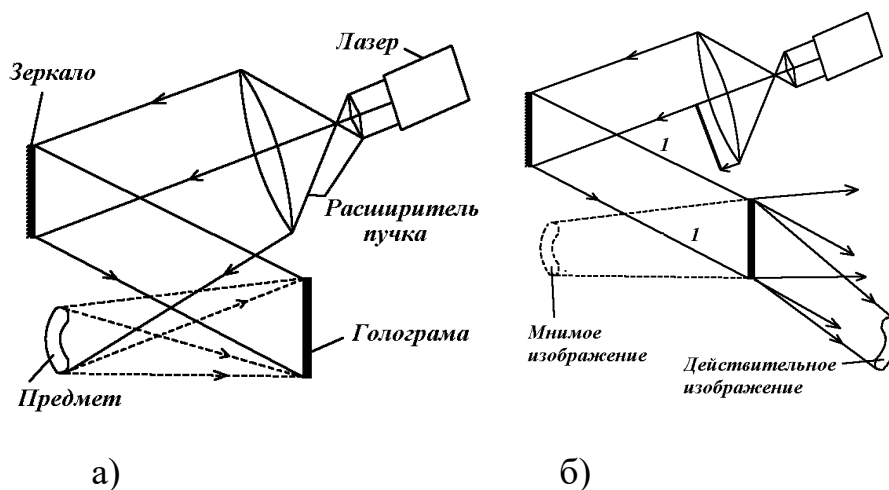


Рис. 1.8 Схема установки для получения голограмм – (а) и схема возобновления изображения – (б)

Одна часть отражается зеркалом к фотопластинке, и образует, так называемый, опорный пучок 1. Вторая часть попадает на пластинку, отразившись от предмета, она образует предметный пучок 2. Обе части должны быть когерентными.

Это требование выполняется, поскольку лазерное излучение имеет высокую степень пространственной когерентности (световые колебания когерентны по всем поперечным сечениям лазерного пучка). Опорный и

предметный пучки, накладываясь друг на друга, образуют интерференционную картину, фиксируемую фотопластинкой.

Экспонируемая таким способом и проявленная фотопластинка и есть голограмма. В образовании голограммы участвуют два пучка света, в связи с чем, описанная схема получения голограмм называется двухлучевой. Для возобновления изображения, проявленную фотопластинку располагают относительно источника света так, как она находилась при фотографировании, и освещают опорным пучком света (часть лазерного пучка, которая освещала при фотографировании предмет, теперь перекрывается). Опорный пучок дифрагирует на голограмме, в результате чего возникает волна, имеющая точно такую структуру, как волна, отражающаяся предметом. Эта волна дает мнимое изображение предмета, воспринимаемое глазом наблюдателя.

Рядом с волной, образуемой мнимое изображение, возникает еще одна волна, дающая действительное изображение предмета. Действительное изображение псевдоскопическое; это значит; что оно имеет рельеф, обратный рельефу предмета, — выпуклые места заменены вогнутыми и наоборот.

Рассмотрим характер голограммы и процесс возобновления изображения. Пусть на фотопластинку падают два когерентных параллельных пучка световых лучей, идущие под углом φ один к одному. Пучок 1 является опорным, пучок 2 — предметным (предмет в этом случае представляет собой бесконечно взятую точку). Для простоты допустим, что пучок 1 падает на пластинку нормально. Все полученные результаты остаются справедливыми и при наклонном падении опорного пучка, однако, формулы в этом случае более громоздкие. В результате интерференции опорного и предметного пучков на пластинке образуется система чередующихся прямолинейных максимумов и минимумов интенсивности.

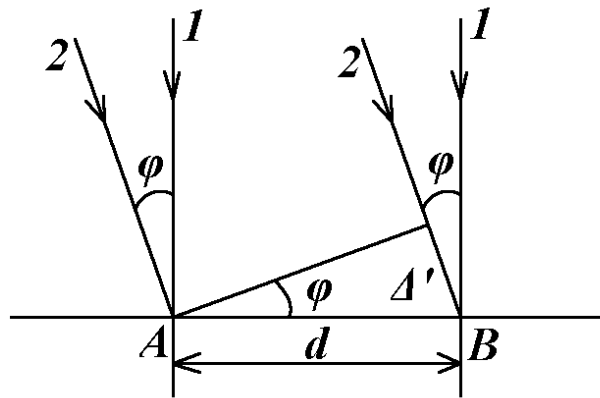


Рис. 1.9 Процесс возобновления изображения

Пусть точки A и B соответствуют серединам соседних интерференционных максимумов. Тогда разность хода Δ' равна λ . Из рисунка 1.9 видно, что $\Delta' = d \sin \varphi$, следовательно: $d \sin \varphi = \lambda$.

Зафиксировав на пластинке (путем экспонирования и проявления) интерференционную картину, направим на нее опорный пучок 1. Пластинка для этого пучка играет роль дифракционной решетки, период d которой определяется вышеприведенной формулой. При освещении пластинки опорным пучком (рис. 1.10) возникает дифракционная картина, максимумы которой образуют с нормалью к пластинке углы, обусловленные условием:

$$d \sin \varphi = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1)$$

Максимум, соответствующий $m=0$, лежит на продолжении опорного пучка. Максимум, соответствующий $m=+1$, имеет такое же направление, которое имел при экспонировании предметный пучок 2. Кроме того, возникает максимум, соответствующий $m=-1$.

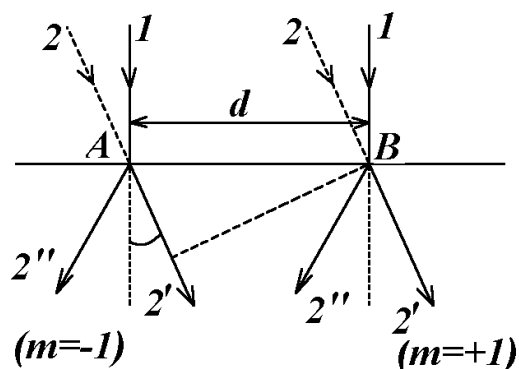


Рис. 1.10 Дифракционная картина, возникающая при освещении голограммы опорным пучком

Можно показать, что полученный результат справедлив и в том случае, когда предметный пучок 2 является не параллельным. При этом максимум, соответствующий $m=+1$, имеет характер расходящегося пучка лучей 2' (он дает мнимое изображение точки, из которой выходили лучи 2 при экспонировании); максимум же, соответствующий $m=-1$, имеет характер совпадающего пучка лучей 2'' (он образует действительное изображение точки, из которой выходили лучи 2 при экспонировании). При получении голограммы пластинка освещается опорным пучком 1 и множеством расходящихся пучков 2, отраженных разными точками предмета. На пластинке возникает сложная интерференционная картина, образованная в результате наложения картин, полученных каждым из пучков 2 отдельно. При освещении голограммы опорным пучком 1 оказываются возобновленными все части 2, то есть полная световая волна, отражаемая предметом (ей отвечает $m=+1$). Кроме нее, возникают еще две волны (что отвечают $m=0$ и $m=-1$). Но эти волны распространяются в других направлениях и не мешают восприятию волны, дающей мнимое изображение предмета.

Изображение предмета, получаемое голограммой, является объемным. На него можно смотреть из разных положений. Если при съемке близкие предметы закрывали более отдаленные, то, сместившись в сторону, можно заглянуть за ближайший предмет (вернее, за его изображение) и увидеть спрятанные до того

отдаленные предметы. Это объясняется тем, что, сместившись в сторону, мы воспринимаем изображение, возобновленное от периферической части голограммы, на которую при экспонировании падали также и лучи, отраженные от спрятанных предметов. Рассматривая изображение ближних и далеких предметов, придется, как и при рассмотрении самих предметов, по-разному аккомодировать глаз.

Если голограмму разбить на несколько кусков, то каждый из них при просвечивании дает такую же картину, что и исходная голограмма. Однако, чем меньшая часть голограммы используется для возобновления изображения, тем меньше его четкость.

Возможные применения голограммы достаточно разнообразны. Далеко не полный их перечень: автомобильная промышленность, фармацевтика, контроль качества обработки и упаковки изделий. В литературе можно встретить утверждение, что это изобретение можно уравнивать по его последствиям с созданием радиосвязи.

1.7. Применение явления интерференции света

Перечислим некоторые применения интерференции:

1. Интерференционная спектроскопия – точное измерение длин волн источников света.
2. Улучшение качества оптических приборов (просветление оптики).
3. Интерференционная рефрактометрия – определение показателей преломления жидкостей.
4. Интерференционные методы контроля качества обработки поверхностей оптических деталей (микроинтерферометрия).
5. Интерферометрия – изучение спектрального состава оптического излучения с высокой разрешающей способностью.
6. Определение коэффициентов расширения твердых тел (дилатометрия).
7. Голография.

Контрольные вопросы:

1. Объясните, какова природа света?
2. Что такое фотон?
3. Дайте определение интерференции света.
4. Что называется, оптической разностью хода световых волн?
5. Какие световые волны называются когерентными?
6. Что такое пространственная когерентность?
7. Какие методы получения когерентных волн знаете?
8. Объясните метод Юнга.
9. Опишите бипризму Френеля.
10. Охарактеризуйте зеркала Френеля.
11. Запишите и объясните формулы, выражающие условия максимумов и минимумов при интерференции света.
12. Покажите с помощью рисунка, как происходит интерференция в тонких пленках.
13. Что такое полосы равной толщины?
14. Что такое полосы равного наклона?
15. Что такое кольца Ньютона?
16. Какой процесс называется «Голография».
17. Что такое голограмма?
18. Приведите примеры применения голограммы.

Практическая часть

Примеры решения задач

Пример 1.

Белый свет проходит через две щели, находящиеся одна от другой на расстоянии $d=0,50$ мм. Интерференционная картина наблюдается на экране, на расстоянии $l=2,5$ м от щелей. Полоса первого порядка ($m=1$) напоминает радугу, фиолетовую с одного края и красную с другого. Фиолетовые цвета находятся приблизительно в $x_1=2,0$ мм, а красные в $x_2=3,5$ мм от середины центральной белой полосы. Оцените длины волн фиолетового и красного цветов.

Решение

Полоса первого порядка ($m=1$) наблюдается под углом, определяемом из соотношения: $d \sin \theta = m\lambda$, откуда $\sin \theta = \frac{m\lambda}{d}$.

Расстояние x_1 , на котором находится фиолетовая полоса первого порядка от середины центральной белой полосы определяется соотношением:

$$x_1/l = \operatorname{tg} \theta_1, \text{ а красная - } x_2/l = \operatorname{tg} \theta_2.$$

Учитывая, что при малых углах $\operatorname{tg} \theta = \sin \theta$, можно записать:

$$x_1/l = \frac{\lambda_1}{d}, x_2/l = \frac{\lambda_2}{d}.$$

$$\text{Откуда } \lambda_1 = \frac{x_1 d}{l}, \quad \lambda_2 = \frac{x_2 d}{l}.$$

Проверим размерность физических величин:

$$[\lambda] = \frac{m \cdot m}{m} = m$$

Подставим числовые данные:

$$\lambda_1 = \frac{(5,0 \cdot 10^{-4})(2,0 \cdot 10^{-3})}{2,5} = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \quad \lambda_2 = \frac{(5,0 \cdot 10^{-4})(3,5 \cdot 10^{-3})}{2,5} = 7,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Ответ: длина волны фиолетовой составляющей света равна $\lambda_1=4,0 \cdot 10^{-7}$ м, а красной – $\lambda_2=7,0 \cdot 10^{-7}$ м.

Пример 2.

Очень тонкий проводник диаметром $7,35 \cdot 10^{-6}$ м помещен между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами. Свет с длиной волны в воздухе $6 \cdot 10^{-7}$ м падает (и наблюдается) перпендикулярно пластинам. Наблюдатель видит серию светлых и темных полос. Сколько светлых и темных полос видит наблюдатель в этом случае? Какой будет полоса рядом с проводником – светлой или темной?

Решение.

Тонкой пленкой (рис. 1.4) в этом случае служит воздушный клин между двумя стеклянными пластинами. Из-за изменения фазы при отражении от нижней поверхности темные полосы отвечают разнице хода $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda$ и так далее. Так как световые лучи перпендикулярны пластинам, разность хода равна $2t$, где t – толщина воздушного зазора в данной точке.

Следовательно, темные полосы наблюдаются там, где:

$$2t = \lambda m, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Светлые полосы наблюдаются там, где:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m - \text{целое число.}$$

В том месте, где находится провод, $t = 7,35 \cdot 10^{-6}$ м. В этой точке разность хода $2t = 2 \cdot 7,35 \cdot 10^{-6}$ м. Порядок интерференционной полосы (тёмной) будет: $m = 14,7 \cdot 10^{-6} / 6,00 \cdot 10^{-7} = 24,5$.

Так как это полуцелое число, полоса, примыкающая к проводу, будет светлой. Всего вдоль пластин возникнет 25 темных полос, что отвечает разнице хода равной: $\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, 24\lambda$, включая одну «полосу» в точке касания ($t = 0$). Между ними расположатся 24 светлых полосы плюс одна полоса в проводнике, то есть всего 25 светлых полос. Светлые и темные полосы будут равными только при идеальной гладкости стеклянных пластин. В противном случае полосы будут не равными. Это очень чувствительный метод проверки на гладкость поверхности.

Ответ: 25 светлых и столько же темных полос.

Пример 3.

Чему равна толщина оптического покрытия из Mg_2 ($n=1,38$), предназначенного для гашения света с длиной волны около 550 нм при нормальном падении на стекло из $n=1,50$?

Решение.

При отражении света от передней и от задней поверхностей покрытия происходит сдвиг по фазе на 180° . Следовательно, для того, чтобы при нормальном падении возникла интерференция, которая ослабляет, на толщине покрытия должно уложиться полуцелое число длин волн, то есть:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

где m – целое число.

Обычно выбирают минимальную толщину ($m=0$), потому что при этом интерференция ослабляется и возникает в самом широком диапазоне углов. При $m=0$ получаем: $t = \lambda_n/4 = \lambda/4n = 550/4 \cdot 1,38 = 99,6$ нм.

Ответ: 99,6 нм.

Пример 4.

Мыльный пузырь кажется зеленым ($\lambda=540$ нм) в точке, ближайшей к наблюдателю. Какова его минимальная толщина? Допустимо, что $n=1,35$.

Решение.

От ближайшей к наблюдателю точки сферической поверхности свет отражается перпендикулярно. Следовательно, разность хода равна $2t$, где t – толщина мыльной пленки. При отражении света от внешней поверхности пузыря фаза изменяется на 180° . При отражении света от внутренней поверхности пузыря изменение фазы не происходит. Следовательно, зеленый свет отвечает минимальной разнице хода, равной половине длины волны, т.е. $1/2\lambda$. Таким образом, $2t = \lambda/2n$, откуда $t = 540/(4 \cdot 1,35) = 100$ (нм) $= 1 \cdot 10^{-7}$ м.

Ответ: $1 \cdot 10^{-7}$ м.

Задания для самостоятельного решения

1.1. Чему равна толщина оптического покрытия из Al_2O_3 ($n=1,52$), предназначенного для гашения света с длиной волны около $5,5 \cdot 10^{-7}$ м при нормальном падении на стекло ($n=1,50$)?

1.2. Пучок монохроматических световых волн ($\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ м) падает под углом $\alpha = 30^\circ$ на мыльную пленку, находящуюся в воздухе ($n=1,3$). При какой наименьшей толщине d пленки, отраженные световые волны будут максимально ослаблены в результате интерференции и максимально усилены?

1.3. На стеклянный клин падает нормально монохроматический свет ($\lambda=5,82 \cdot 10^{-7}$ м). Угол клина равен $20''$. Какое число темных интерференционных полос приходится на единицу длины клина? Показатель преломления стекла $n=1,5$.

1.4. В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью. Определить показатель преломления жидкости, если радиус третьего светлого кольца равен 3,65 мм. Наблюдение ведется в проходящем свете. Радиус кривизны линзы $R=10$ м. Длина волны света $\lambda=5,69 \cdot 10^{-7}$ м.

1.5. На стеклянную пластинку выпуклой стороной положена плоско-выпуклая линза. Сверху линза освещена монохроматическим светом с длиной волны $\lambda=6,6 \cdot 10^{-7}$ м. Найти радиус кривизны линзы, если радиус четвертого кольца Ньютона в отраженном свете равен $2 \cdot 10^{-3}$ м.

1.6. Какая толщина мыльной пленки, если при наблюдении ее в отраженном свете она имеет зеленую окраску ($\lambda=5 \cdot 10^{-7}$ м) при угле отражения 35° .

1.7. На тонкий стеклянный клин под углом 90° к его поверхности падает параллельный пучок света с длиной волны $\lambda=5,85 \cdot 10^{-7}$ м. Расстояние между соседними темными интерференционными полосами в отраженном свете равно $5 \cdot 10^{-3}$ м. Показатель преломления стекла равен 1,6. Определить угол клина.

1.8. Какова толщина мыльной пленки, если при наблюдении ее в

отраженном свете она имеет зеленую окраску ($\lambda=5\cdot 10^{-7}$ м) при угле отражения 40° .

1.9. На тонкую пленку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda=5\cdot 10^{-7}$ м. Отраженный от пленки свет максимально усилен в результате интерференции. Определить минимальную толщину пленки, если показатель преломления материала пленки равен 1,4.

1.10. На тонкий стеклянный клин под углом 85° к его поверхности падает параллельный пучок света с длиной волны $\lambda=6,5\cdot 10^{-7}$ м. Расстояние между соседними темными интерференционными полосами в отраженном свете равно $5,5\cdot 10^{-4}$ м. Показатель преломления стекла равен 1,55. Определить угол клина.

1.11. На тонкую пленку в направлении 46° к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda=5\cdot 10^{-7}$ м. Отраженный от пленки свет максимально усилен в результате интерференции. Определить минимальную толщину пленки, если показатель преломления материала пленки равен 1,55.

1.12. Как изменится расстояние между соседними интерференционными полосами Δ на экране в опыте Юнга, если зеленый светофильтр ($\lambda=5\cdot 10^{-7}$ м) заменить на красный ($\lambda=6,5\cdot 10^{-7}$ м)? (Ширина интерференционной полосы $\Delta=l\cdot\lambda/d$, где l – расстояние от когерентных источников света к экрану, d – расстояние между ними).

1.13. На пути пучка света расположили стеклянную пластинку толщиной $d=1\cdot 10^{-3}$ м так, что угол падения $\alpha=30^\circ$. На сколько при этом изменится оптическая длина пути ΔL этого светового пучка? ($L=n\cdot l$, где l – геометрическая длина пути луча). Показатели преломления воздуха $n_1=1$ и стекла $n_2=1,5$.

1.14. Определите частоту оранжевого излучения ν , если длина его волны в вакууме $\lambda=6,0\cdot 10^{-7}$ м. (Скорость распространения света в вакууме $c=3\cdot 10^8$ м).

1.15. На бензиновую пленку с показателем преломления $n=1,21$ падает белый свет под углом падения $\alpha=30^\circ$. Какая минимальная толщина этой пленки d , если отраженные от нее лучи окрашены в фиолетовый цвет ($\lambda=4,2\cdot 10^{-7}$ м)?

(Минимальная толщина пленки отвечает порядку интерференционного спектра $k_{min}=0$).

1.16. На стеклянную пластинку нанесен тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления $n=1,3$. Она освещена пучком света с длиной волны $\lambda=640$ нм, падающей на пластинку нормально. Какой минимальной толщины d должен быть слой этого вещества, чтобы отраженный пучок имел наименьшую интенсивность? (Минимальная толщина пленки отвечает порядку интерференционного спектра $k_{min}=0$).

1.17. Как изменится расстояние между соседними интерференционными полосами Δ на экране в опыте Юнга, если зеленый светофильтр (длина волны $\lambda=500$ нм) заменить на красный ($\lambda=650$ нм)? (Ширина интерференционной полосы $\Delta=l\cdot\lambda/d$, где l – расстояние от когерентных источников света к экрану, d – расстояние между ними).

1.18. На плоско-параллельную пластинку положили плоско-выпуклую линзу малой кривизны, при освещении которой светом с длиной волны $\lambda=0,68$ мкм в отраженном свете наблюдают кольца Ньютона. Диаметр седьмого темного кольца $D_7=12$ мм. Определить радиус кривизны выпуклой линзы R .

1.19. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается красным светом с длиной волны $\lambda=630$ нм. Определить радиус третьего темного кольца в отраженном свете, если радиус кривизны линзы $R=6,4$ м.

1.20. Как изменится расстояние между соседними интерференционными полосами Δ на экране в опыте Юнга, если синий светофильтр ($\lambda=4,8\cdot 10^{-7}$ м) заменить на красный ($\lambda=6,5\cdot 10^{-7}$ м)? (Ширина интерференционной полосы $\Delta=l\cdot\lambda/d$, где l – расстояние от когерентных источников света к экрану, d – расстояние между ними).

Таблица 1

Длины волн видимой части спектра

<i>Цвет</i>	<i>Границы, м</i>	<i>Цвет</i>	<i>Границы, м</i>
Фиолетовый	$(38 - 45) \cdot 10^{-8}$	Желто-зеленый	$(55,0 - 57,5) \cdot 10^{-8}$
Синий	$(45 - 48) \cdot 10^{-8}$	Желтый	$(57,5 - 58,5) \cdot 10^{-8}$
Голубой	$(48 - 51) \cdot 10^{-8}$	Оранжевый	$(58,5 - 62,0) \cdot 10^{-8}$
Зеленый	$(51 - 55) \cdot 10^{-8}$	Красный	$(62,0 - 76,0) \cdot 10^{-8}$

Таблица 2

Показатели преломления (*n*)

<i>Вещество</i>	<i>n</i>	<i>Вещество</i>	<i>n</i>
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Воздух	1,00	Спирт	1,36
Вода	1,33	Стекло	1,50 – 1,90
Лед	1,31	Сероуглерод	1,63
Кварц	1,54	Каменная соль	1,54

Таблица 3

Основные физические постоянные (округлённые значения)

<i>Физическая постоянная</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Числовое значение</i>
Ускорение свободного падения	<i>g</i>	9,81 м/с ²
Универсальная газовая постоянная	<i>R</i>	8,31 Дж/(моль К)
Число Авогадро	<i>N_A</i>	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Постоянная Больцмана	<i>k</i>	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Элементарный заряд	<i>e</i>	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	<i>c</i>	$3 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	<i>h</i>	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж с
Масса покоя протона	<i>m</i>	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг

Таблица 4

Предельные углы (α_0) полного внутреннего отражения света

<i>Вещество</i>	<i>α_0, град</i>	<i>Вещество</i>	<i>α_0, град</i>
Алмаз	24	Глицерин	43
Бензин	45	Спирт	47
Вода	49	Стекло	30 – 42

Контрольная часть: тестовые задания

1.1. Выберите правильное определение интерференции света:

а) интерференция – зависимость скорости распространения волны от частоты или длины волны $V=f(\nu)=\varphi(\lambda)$. Как результат – разложение сложного излучения на его составные части по частотам или длинам волн;

б) интерференция – явление отклонения света от его прямолинейного распространения, в результате чего световые волны могут попадать в область геометрической тени;

в) интерференция – наложение световых волн, в результате которого возникает *интерференционная картина* – чередующиеся светлые и темные области (*максимумы и минимумы* интенсивности света).

1.2. Выберите формулу условия максимума при интенсивности света при интерференции и поясните все входящие величины:

а) $\Delta = \pm(2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

б) $\Delta = \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

в) $\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i}.$

1.3. Выберите формулу условия минимума при интенсивности света при интерференции и поясните все входящие величины:

а) $\Delta = \pm(2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

б) $\Delta = \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

в) $\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i}.$

1.4. Выберите формулу оптической разности хода световых волн в тонких плёнках в отраженном свете и поясните все входящие величины:

а) $\Delta = \pm(2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

б) $\Delta = \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

в) $\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i}.$

1.5. Выберите формулу условия интерференционных максимумов при интерференции в тонких пленках в отраженном свете и поясните все входящие величины:

а) $2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda ;$

б) $2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} ;$

в) $2d \cdot \sin \theta = k\lambda; k = 0, 1, 2, \dots$

1.6. Выберите формулу условия интерференционных минимумов при интерференции в тонких пленках в отраженном свете и поясните все входящие величины:

а) $2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda}{2} = k \cdot \lambda ;$

б) $2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} ;$

в) $2d \cdot \sin \theta = k\lambda; k = 0, 1, 2, \dots$

1.7. Выберите формулу для расчета радиуса темных колец Ньютона в отраженном свете и поясните все входящие величины:

а) $r_k = \sqrt{\frac{kR\lambda}{n}};$

б) $\Delta = \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

в) $\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i}.$

1.8. Выберите правильное определение когерентных световых волн:

а) монохроматические световые волны;

б) поляризованные световые волны;

в) волны у которых частоты одинаковы, а разность фаз в точке наложения с течением времени не меняется.

1.9. *Полосы равной толщины это:*

а) полосы разной интенсивности света, образующиеся при интерференции параллельных лучей на тонкой клинообразной пленке;

б) полосы разной интенсивности света, образующиеся при интерференции расходящихся лучей на тонкой клинообразной пленке;

в) полосы разной интенсивности света, образующиеся при интерференции расходящихся лучей на тонкой плоской пленке.

1.10. *Полосы равного наклона это:*

а) полосы разной интенсивности света, образующиеся при интерференции параллельных лучей на тонкой клинообразной пленке;

б) полосы разной интенсивности света, образующиеся при интерференции расходящихся лучей на тонкой клинообразной пленке;

в) полосы разной интенсивности света, образующиеся при интерференции расходящихся лучей на тонкой плоской пленке.

1.11. *Оптическая разность хода световых лучей это:*

а) разница длин волн лучей;

б) разница пройденных лучами геометрических путей;

в) разница пройденных лучами геометрических путей, умноженная на коэффициент преломления данной среды.

1.12. *Для наблюдения интерференционного максимума оптическая разность хода Δ волн от двух когерентных источников света должна составлять:*

а) $\Delta = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$;

б) $\Delta = 2(k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$;

в) $\Delta = (2k + 1) \cdot \pi$.

1.13. Какой из приведенных видов электромагнитного излучения имеет наибольшую длину волны:

- а) ультрафиолетовые лучи;
- б) инфракрасные лучи;
- в) гамма лучи.

1.14. Голография это:

- а) запись амплитудных значений излучения, исходящего от предмета;
- б) полная запись амплитуд и фаз излучения, исходящего от предмета;
- в) запись значений фаз излучения, исходящего от предмета.

1.15. Голограмма это:

- а) интерференционная картина, возникающая на фотопленке путем наложения двух когерентных пучков света: опорного пучка и волнового поля, исходящего от предмета;
- б) объёмное изображение предмета;
- в) плоское изображение предмета.

Таблица 5

Верные ответы на тестовые задания

<i>Номера тестовых заданий</i>	<i>Верные ответы</i>
1.1	в
1.2	б
1.3	а
1.4	в
1.5	а
1.6	б
1.7	а
1.8	в
1.9	а
1.10	в
1.11	в
1.12	а
1.13	б
1.14	б
1.15	а

ТЕМА 2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

2.1. Основные понятия и определения

Дифракцией называется явление отклонения света от его прямолинейного распространения, в результате чего световые волны могут попадать в область геометрической тени.

Дифракция наблюдается при прохождении света через малые отверстия, огибая непрозрачные препятствия. Это явление является *общим для всех волновых процессов*, но для света имеет особенности, поскольку длины световых волн λ намного меньше размеров d реальных преград или отверстий. Поэтому наблюдать дифракцию можно только на достаточно больших расстояниях l от преграды ($l \geq d^2/\lambda$) или когда размеры препятствий соизмеримы с длиной волны.

Между интерференцией и дифракцией нет существенного физического расхождения. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате суперпозиции волн. По историческим причинам перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, отходящее от определенного числа дискретных когерентных источников, принято называть *интерференцией волн*. Перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн от когерентных источников, расположенных непрерывно, принято называть *дифракцией волн*.

Различают два вида дифракции. Если источник света S и точка наблюдения P расположены от препятствия настолько далеко, что лучи, падающие на препятствие, и лучи, идущие в точку P , образуют практически параллельные пучки, то говорят о *дифракции в параллельных лучах* (рис. 2.1) или о *дифракции Фраунгофера*. Дифракцию в сходящихся лучах называют *дифракцией Френеля*. Дифракцию Фраунгофера можно наблюдать, поместив за источником света S и перед точкой наблюдения P линзу так, чтобы точки S и P оказались в фокальной плоскости соответствующей линзы (рис. 2.1).

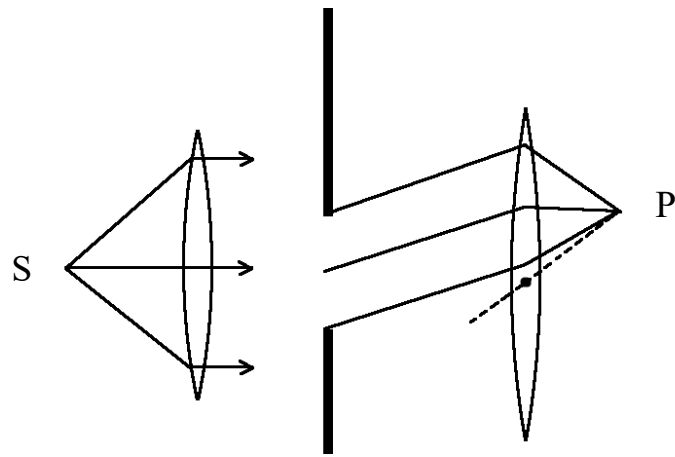


Рис. 2.1 Дифракция в параллельных лучах

2.2. Принцип Гюйгенса - Френеля

Объяснить явление дифракции сумел французский физик Френель, который наполнил принцип Гюйгенса физическим смыслом, дополнив его идеей *интерференции вторичных световых волн*. Если принцип Гюйгенса является чисто геометрическим (он не рассматривает вопрос об интенсивности распространяющихся вторичных световых волн), то *принцип Гюйгенса-Френеля* утверждает, что *все вторичные сферические световые волны являются когерентными и способны интерферировать*.

Таким образом, для определения результирующей интенсивности света в некоторой точке пространства (в том числе и в области геометрической тени), нужно найти результат суперпозиции всех вторичных сферических световых волн от каждой точки волнового фронта, проходящего через отверстие или огибающего препятствие. Френель исключил возможность возникновения обратных вторичных волн и предположил, что если между источником света и точкой наблюдения расположен непрозрачный экран с отверстием, то на поверхности экрана амплитуда вторичных волн равна нулю, а в отверстии – такая же, как и при отсутствии экрана. Учет амплитуд и фаз вторичных световых сферических волн позволяет в каждом конкретном случае определить интенсивность результирующей волны в любой точке пространства, т.е.

определить закономерности распространения света как в случае свободного распространения световых волн (прямолинейное распространение света), так и в случае наличия преград на пути (дифракция света). Дополненный таким способом принцип Гюйгенса получил название *принципа Гюйгенса - Френеля*. Расчет интерференционной картины от вторичных волн довольно сложный и сводится к интегрированию. Результирующее колебание представляет суперпозицию колебаний, взятых для всей волновой поверхности (рис. 2.2).

В соответствии с *принципом Гюйгенса - Френеля* каждый элемент волновой поверхности S (рис. 2.2) служит источником вторичной сферической волны, амплитуда которой пропорциональна величине элемента dS .

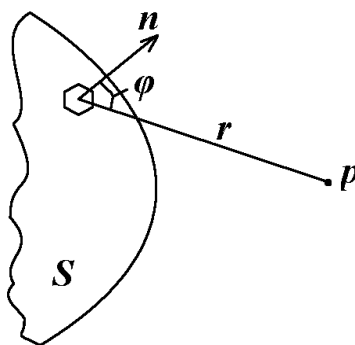


Рис. 2.2 Принцип Гюйгенса – Френеля

Амплитуда сферической волны убывает с расстоянием r от источника по закону $1/r$. Следовательно, от каждого участка dS волновой поверхности в точку P , лежащей перед этой поверхностью, приходит колебание:

$$dE = K \frac{\alpha_0 dS}{r} \cos(\omega t - kr + \alpha_0). \quad (2.1)$$

В этом выражении $(\omega t - kr + \alpha_0)$ – фаза колебания, k – волновое число, r – расстояние от элемента поверхности до точки наблюдения, величина α_0 определяется амплитудой светового колебания в том месте, где находится ds . Коэффициент k зависит от угла φ между нормалью n к площадке d и направлением от d к точке P . При $\varphi=0$ этот коэффициент максимален, при $\varphi=\pi/2$

он обращается в нуль. Результирующее колебание в точке Р представляет собой суперпозицию колебаний, взятых для всей волновой поверхности S:

$$E = \int_S K(\varphi) \frac{\alpha_0}{r} \cos(\omega t - kr + \alpha_0) dS. \quad (2.2)$$

Основные положения принципа Гюйгенса – Френеля:

1. Каждая точка открытого фронта волны является точечным источником вторичных сферических волн, огибающая которых дает положение фронта волны в следующий момент времени (принцип Гюйгенса).

2. Все вторичные сферические световые волны являются когерентными и способными интерферировать.

3. От равных по площади участков dS волновой поверхности в точку Р, лежащей перед этой поверхностью, приходят колебания, равные по интенсивности.

4. Максимальная интенсивность в направлении внешней нормали n к площадке dS .

Вычисления по вышеприведенной формуле в общем случае очень трудны. Однако, как показал Френель, в случаях, отличающихся симметрией, нахождение амплитуды результирующего колебания может быть осуществлено простым алгебраическим или геометрическим складыванием. Он предложил метод расчета, получивший название – *метод зон Френеля*.

2.3. Метод зон Френеля. Прямолинейность распространения света

Чтобы понять суть метода, разработанного Френелем, определим амплитуду светового колебания, нарушаемого в точке Р сферической волной, распространяемой в изотропной однородной среде из точечного источника S (рис. 2.3). Волновые поверхности такой волны симметричны относительно прямой SP. Воспользовавшись этим, разобьем изображенную на рисунке

волновую поверхность на кольцевые зоны, построенные так, что расстояния от краев каждой зоны к точке Р отличаются на $\lambda/2$ (λ – длина волны в той среде, где распространяется волна). Кольцевые поверхности, имеющие такие свойства, называются зонами Френеля. Из рисунка 2.3 видно, что расстояние b_m от внешнего края m -й зоны к точке Р равно:

$$b_m = b + m \frac{\lambda}{2}, \quad (2.3)$$

b – расстояние от вершины волновой поверхности к точке Р.

Колебания, приходящие в точку Р от аналогичных точек двух соседних зон, находятся в противофазе. Поэтому и результирующие колебания, создаваемые каждой из зон в целом, будут для соседних зон отличаться по фазе на π . То есть, *если в открытом фронте волны укладывается четное число зон Френеля – в точке наблюдения будет минимум; если же в открытом фронте волны укладывается нечетное число зон Френеля – в точке наблюдения будет максимум.*

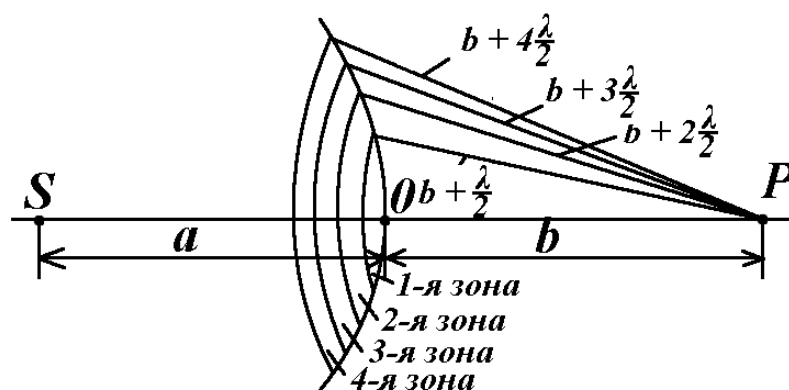


Рис. 2.3 Метод зон Френеля

Вычислим площади зон. Внешняя граница m -й зоны выделяет на волновой поверхности сферический сегмент высоты hm (рис. 2.4). Обозначим

площадь этого сегмента через S_m . Тогда площадь m -й зоны можно представить в виде:

$$\Delta S_m = S_m - S_{m-1}, \quad (2.4)$$

где S_{m-1} – площадь сферического сегмента, выделенного внешней границей $(m-1)$ -й зоны. Из рис. 2.4 видно, что:

$$r_m^2 = a^2 - (a - h_m)^2 = \left(b + m \frac{\lambda}{2}\right)^2 - (b + h_m)^2, \quad (2.5)$$

где a – радиус волновой поверхности, r_m – радиус внешней границы m -й зоны.

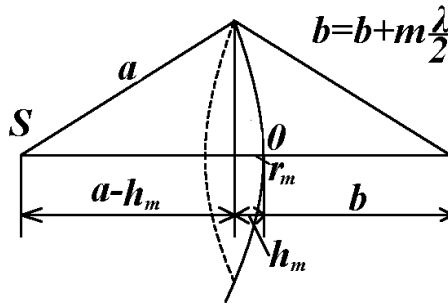


Рис. 2.4 Вычисление площади зон Френеля

Возведя скобки в квадрат, получим:

$$r_m^2 = 2ah_m - h_m^2 = bm\lambda + m^2(\lambda/2)^2 - 2bh_m - h_m^2. \quad (2.6)$$

Откуда:

$$h_m = \frac{bm\lambda + m^2(\lambda/2)^2}{2(a+b)}. \quad (2.7)$$

Ограничившись рассмотрением не слишком больших m , так как λ^2 мало, можно упростить это выражение:

$$h_m = \frac{bm\lambda}{2(a+b)}. \quad (2.8)$$

Площадь сферического сегмента равна $S=2\pi R/h$, где R – радиус сферы, h – высота сегмента.

Следовательно,

$$S_m = 2\pi ah_m = \frac{\pi ab}{a+b} m\lambda, \quad (2.9)$$

а площадь m -й зоны будет:

$$S_m = S_m - S_{m-1} = \frac{\pi ab\lambda}{a+b}. \quad (2.10)$$

Полученное выражение не зависит от m . Это значит, что при не больших m площади зон Френеля приблизительно одинаковы.

Из вышеприведенных уравнений можно найти радиусы зон. При не больших m высота сегмента $h_m \ll a$, поэтому можно считать, что $2r_m = 2ah_m$. Подставив значение для h_m , получим выражение для радиуса внешней границы m -й зоны:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m\lambda}. \quad (2.11)$$

Следовательно, площади зон Френеля приблизительно одинаковы. Расстояние от краев зон к точке Р медленно растет с номером зоны. Угол φ

между нормалью к элементам зоны и направлением на точку Р также растет с ростом m . Все это приводит к тому, что амплитуда A_m колебания, создаваемого m -й зоной в точке Р, монотонно убывает с ростом m .

Таким образом, амплитуды колебаний, создаваемых в точке Р зонами Френеля, образуют монотонно убывающую последовательность:

$$A_1 > A_2 > A_3 > \dots > A_{m-1} > A_m > A_{m+1} > \dots$$

Фазы колебаний, создаваемых соседними зонами, отличаются на π . Поэтому амплитуда A результирующего колебания в точке Р может быть представлена в виде: $A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots$

В это выражение все амплитуды от нечетных зон входят с одним знаком, а от четных зон – с другим. Перепишем его в виде:

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots \quad (2.12)$$

В результате монотонного убывания A_m можно приблизительно считать, что:

$$A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2}. \quad (2.13)$$

Тогда выражения в скобках будут равняться нулю, и формула амплитуды A результирующего колебания в точке Р упрощается таким образом:

$$A = \frac{A_1}{2}. \quad (2.14)$$

В соответствии с этой формулой амплитуда колебаний, создаваемых в некоторой точке Р всей сферической волновой поверхностью, равна половине амплитуды, создаваемой одной лишь центральной зоной. *Так как размер зоны очень мал, то можно считать, что свет распространяется прямолинейно.*

Если на пути волны поставить непрозрачный экран с отверстием, оставляемым открытой только центральную зону Френеля, амплитуда в точке Р будет равна A_1 т.е. в два раза превзойдет амплитуду колебаний от всей волновой поверхности. Соответственно интенсивность света в точке Р будет в этом случае в четыре раза больше, чем при отсутствии препятствий между точками S и Р.

Дифракция Френеля – это дифракция сферических световых волн (в сходящихся лучах), наблюдаемая на конечном расстоянии от препятствия – малого круглого отверстия или малого круглого диска (рис. 2.5). Дифракционная картина представляет собой чередующиеся светлые и темные кольца, центры которых находятся в центре препятствия. Будет ли в центре светлое или темное пятно при дифракции на отверстии зависит от диаметра отверстия. При дифракции на диске в центре всегда наблюдается максимум (*пятно Пуассона*).

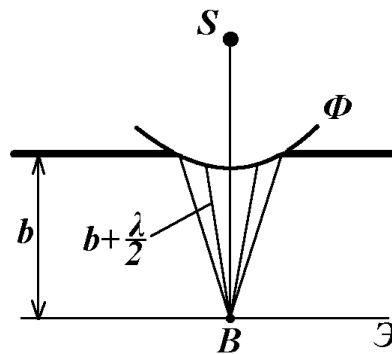


Рис. 2.5 Дифракция от малого круглого отверстия

2.4. Дифракция Фраунгофера (в параллельных лучах). Дифракция на щели. Дифракция на дифракционной решетке

Дифракция Фраунгофера – это дифракция плоских световых волн, когда и источник света, и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию. Практически для ее наблюдения нужно точечный источник света поместить в фокусе собирающей линзы, а дифракционную

картину наблюдать в фокальной плоскости другой собирающей линзы, установленной за препятствием (рис. 2.1).

Дифракция на щели. При дифракции на щели (рис. 2.6) плоская световая волна падает нормально плоскости щели шириной $MN=a$. Параллельные пучки лучей, выходящие из нее в произвольном направлении под углом φ (угол дифракции), собираются линзой в точке B . Разность хода световых волн от крайних точек волнового фронта равна $\Delta=a \cdot \sin\varphi$. Условие *дифракционного максимума* в наблюдении B (если на разности хода укладывается *нечетное число* зон Френеля) имеет вид:

$$a \cdot \sin(\varphi) = \pm(2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (2.15)$$

где $k=1, 2, 3, \dots$ – порядок максимумов.

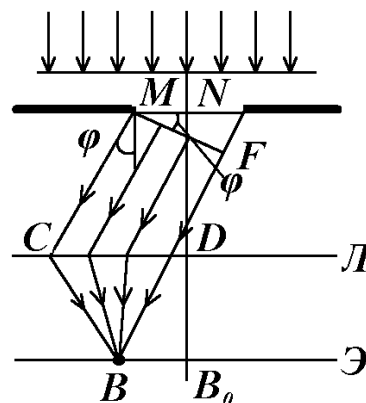


Рис. 2.6 Дифракция на щели

График зависимости интенсивности света от угла показан на рис. 2.7.

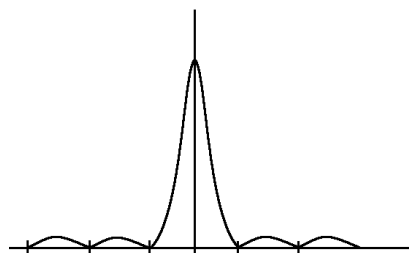


Рис. 2.7 График зависимости интенсивности света от угла

При $m=0$ наибольший из максимумов по интенсивности. Между минимумами расположены меньшие (в сравнении с $m=0$) максимумы.

Дифракция на дифракционной решетке.

Дифракционной решеткой называется совокупность большого числа одинаковых щелей, расположенных друг от друга на одинаковом расстоянии. Расстояние между соседними щелями d (суммарная ширина щели a и непрозрачного промежутка b) называется *постоянной* (или *периодом*) *дифракционной решетки* $d=a+b$ (рис. 2.8).

Дифракционные решетки бывают прозрачные и отражательные. Прозрачные решетки изготавливаются из стеклянных или кварцевых пластинок, на поверхность которых с помощью специальной машины наносится алмазным резцом ряд параллельных штрихов. Промежутки между штрихами служат щелями. Отражательные решетки – наносятся алмазным резцом на поверхность металлического зеркала. Свет падает на отражательные решетки под углом. Это позволяет наблюдать спектр при отражении света. Существуют вогнутые отражательные решетки, которые сами (без линзы) фокусируют дифракционные спектры. Лучшие решетки имеют до 1200 штрихов на 1 мм.

Рассмотрим дифракцию на решетке (рис. 2.8). Расположим параллельно решетке собирающую линзу, в фокальной плоскости которой поставим экран. Выясним характер дифракционной картины, получаемой на экране при падении на решетку плоской световой волны (для простоты будем считать, что волна падает на решетку нормально). Каждая из щелей даст на экране картину, описываемую кривой, изображенной на рис. 2.8.

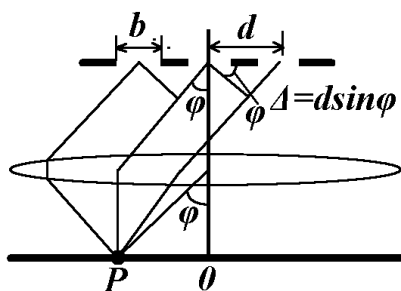


Рис. 2.8 Дифракция на дифракционной решетке

Картины от всех щелей придут на то же место экрана (независимо от положения щели, центральный максимум лежит против центра линзы).

Таким образом, дифракционная картина на решетке является результатом взаимной интерференции световых волн, идущих от всех щелей, то есть осуществляется многолучевая интерференция когерентных пучков света, идущих от всех щелей. Из рис. 2.8 видно, что разность хода световых волн от соответствующих точек волновых фронтов, попадающих на соседние щели, равна $\Delta = d \cdot \sin \varphi$. При углах дифракции, удовлетворяющих условию $d \cdot \sin \varphi = \pm k \cdot \lambda$, соответствующие вторичные световые волны будут накладываться в одинаковых фазах и давать *главные максимумы* интенсивности. Число k дает порядок главного максимума. Максимум нулевого порядка только один, максимумов 1-го, 2-го и так далее порядков по два (с одной и другой стороны от максимума нулевого порядка).

Если решетка содержит N штрихов, то между каждыми двумя из N главных максимумов находятся $(N-1)$ дополнительных минимума, а также $(N-2)$ дополнительных максимума, интенсивность которых ничтожно мала по сравнению с главными максимумами.

Чем больше N , тем больше световой энергии проходит через решетку, тем больше минимумов образуется между соседними главными максимумами, поэтому максимумы будут более интенсивными и более острыми (рис. 2.9).

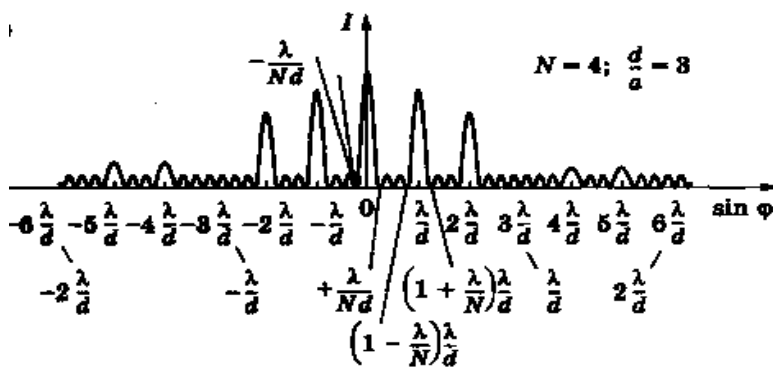


Рис. 2.9 Дифракция на дифракционной решетке

Положение главных максимумов зависит от длины волны. Поэтому при пропускании через решетки белого света все максимумы, кроме центрального, раскладываются в спектр, фиолетовый конец которого обращен к центру дифракционной картины, красный – наружу.

Таким образом, дифракционная решетка является спектральным прибором, применяющимся для исследования спектрального состава светового излучения – его монохроматических компонентов и их интенсивностей.

2.5. Разрешающая способность оптических приборов

Разрешающая способность оптических приборов с круглым отверстием.

На круглом отверстии объектива (микроскопа, фотоаппарата) будет наблюдаться дифракция. Каждая точка объекта будет отображаться в виде светлого пятна (максимум) окруженного дифракционными максимумами и минимумами. Если две точки объекта расположены близко друг к другу, то их изображения могут перекрываться, и они делаются неразличимыми.

Два объекта считаются различимыми, если дифракционный максимум от одного объекта попадает на минимум другого.

Разрешающая способность оптических приборов с круглым отверстием определяется по формуле:

$$R = \frac{D}{1,22\lambda}, \quad (2.16)$$

где λ – длина волны, D – диаметр объектива, R – разрешающая способность.

Разрешающая способность дифракционной решетки определяется соотношением:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = k \cdot N, \quad (2.17)$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн двух близких спектральных линий, еще разрешаемых (воспринимаемых раздельно) решеткой, N – общее количество щелей решетки, k – порядок дифракционного спектра. Очевидно, что чем больше N , тем более близкие длины волн могут быть разрешены.

2.6. Дифракция рентгеновских лучей

Для наблюдения дифракционной картины рентгеновских волн необходима *соизмеримость* постоянной решетки с длиной волны падающего излучения. Пространственные образования, в которых элементы структуры подобны по форме, имеющие геометрически правильное и периодически повторяющееся расположение, называются *пространственными решетками*. Подобные пространственные образования должны иметь периодичность по трем направлениям. Для наблюдения дифракции рентгеновского излучения $\lambda \approx (10^{-8} \div 10^{-12})$ м могут быть использованы кристаллы, расстояния между атомами в которых $d \approx 10^{-10}$ м. Рассмотрим дифракции рентгеновских лучей. Пучок монохроматического рентгеновского излучения падает на поверхность кристалла под *углом скольжения* θ (между падающим лучом и кристаллографической плоскостью) и возбуждает атомы кристаллической решетки соседних атомных плоскостей, становясь источниками вторичных когерентных волн, интерферирующих между собой (рис. 2.10). Результат интерференции волн определяется их разностью хода $\Delta = 2d \cdot \sin \theta$.

Дифракционные максимумы наблюдаются в тех направлениях, в которых все отраженные атомными плоскостями волны находятся в *одинаковой фазе*. Такие направления определяются *формулой Вульфа-Брэггов*:

$$2d \cdot \sin \theta = k \cdot \lambda, \quad (2.18)$$

где d – межплоскостное расстояние, k – порядок спектра.

Эта формула лежит в основе двух важнейших методов физических исследований, таких как: рентгеноструктурный анализ и рентгеноспектральный анализ.

Рентгеноструктурный анализ – это когда по известному значению длины волны λ монохроматического излучения и измеренным значениям θ и k вычисляют межатомное расстояние d в неизвестной кристаллической структуре в трех взаимно перпендикулярных направлениях и по ним определяют структуру кристалла. *Рентгеноспектральный анализ* – когда по известному значению межплоскостного расстояния d и измеренным значениям θ и k вычисляют длину волны λ неизвестного рентгеновского излучения.

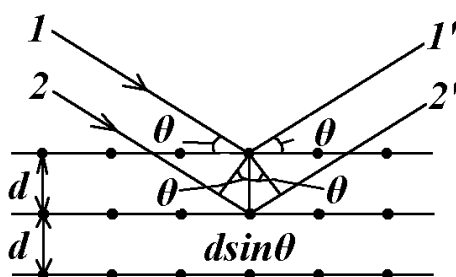


Рис. 2.10 Дифракция рентгеновских лучей

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение дифракции света.
2. Что называется дифракцией Фраунгофера и дифракцией Френеля?
4. Что называется зоной Френеля?
5. Сформулируйте принцип Гюйгенса – Френеля.
6. Что называется дифракционной решёткой?
7. Сформулируйте условия главных максимумов при дифракции на решётке.
8. Дайте определение дифракции рентгеновских лучей.
9. Сформулируйте формулу Вульфа–Брэггов.
10. Что называется разрешающей способностью оптических приборов?
11. По какой формуле определяется разрешающая способность дифракционной решетки?

Практическая часть

Примеры решения задач

Пример 1.

Вычислите углы, отвечающие дифракционным максимумам первого и второго порядков для света с длинами волн $4 \cdot 10^{-7}$ м и $7 \cdot 10^{-7}$ м, если дифракционные решетки содержат 10000 штрихов на $1 \cdot 10^{-2}$ м.

Решение.

Так как решетка содержит 10^6 штрих/м, то расстояние между штрихами равно $d = 1,0 \cdot 10^{-6}$ м.

Максимумы первого порядка ($m=1$) для света с длинами волн $4 \cdot 10^{-7}$ м и $7 \cdot 10^{-7}$ м наблюдаются под углами:

$$\sin \theta_1 = \frac{m \cdot \lambda}{d} = \frac{1 \cdot (4,0 \cdot 10^{-7})}{1,0 \cdot 10^{-6}} = 0,400; \quad \sin \theta_2 = 0,700$$

Тогда: $\theta_1 = 23,6^\circ$, аналогично $\theta_2 = 44,0^\circ$.

Максимумы второго порядка наблюдаются под углами:

$$\sin \theta_1 = \frac{m \cdot \lambda}{d} = \frac{2 \cdot (4,0 \cdot 10^{-7})}{1,0 \cdot 10^{-6}} = 0,800$$

Аналогично $\sin \theta_2 = 1,400$, тогда $\theta_1 = 53,6^\circ$, максимум второго порядка при $\lambda = 7 \cdot 10^{-7}$ м не существует, потому что $\sin \theta$ не может быть больше единицы. Максимумы более высокого порядка также не возникают.

Ответ: максимумы первого порядка наблюдаются под углами: $\theta_1 = 23,6^\circ$, $\theta_2 = 44,0^\circ$. Максимум второго порядка под углом $53,6^\circ$ при длине волны $4 \cdot 10^{-7}$ м.

Пример 2.

Белый свет с длинами волн от $4 \cdot 10^{-7}$ м до $7 \cdot 10^{-7}$ м падает на дифракционную решетку с 400000 штрих/м. Покажите, что фиолетовый максимум в спектре третьего порядка перекрывается с красным в спектре второго порядка.

Решение.

Постоянная решетки $d=1/4 \cdot 10^5=2,50 \cdot 10^{-6}$ м. Фиолетовый максимум в спектре третьего порядка наблюдается под углом θ и определяется соотношением:

$$\sin \theta = \frac{m \cdot \lambda}{d} = \frac{3 \cdot (4,0 \cdot 10^{-7})}{2,5 \cdot 10^{-6}} = 0,480$$

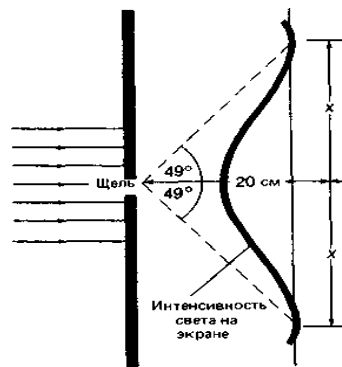
Красный максимум в спектре второго порядка наблюдается под углом:

$$\sin \theta_1 = \frac{m \cdot \lambda}{d} = \frac{2 \cdot (7,5 \cdot 10^{-7})}{2,5 \cdot 10^{-6}} = 0,600$$

то есть, под большим углом. Таким образом, спектры перекрываются.

Пример 3.

Свет с длиной волны 750 нм проходит через щель шириной $D=1,0 \cdot 10^{-3}$ мм. Какова ширина центрального максимума: а) в градусах и б) в сантиметрах на экране, который находится на расстоянии $L=20$ см от щели?



Решение.

а) Первый минимум расположен при условии:

$$\sin \theta = \frac{m \cdot \lambda}{d} = \frac{1 \cdot (7,5 \cdot 10^{-7})}{10^{-6}} = 0,75$$

То есть, при $\theta=49^\circ$. Это угол между центральным максимумом и первым минимумом. Угол, под которым виден весь центральный максимум, – от первого минимума сверху на рисунке к первому минимуму снизу – вдвое больше найденного угла, то есть представляет 98° .

б) Ширина центрального максимума равна $2x$, где $x=Ltg\theta$; поэтому $2x=2$. Таким образом, освещена значительная часть экрана. Освещенность, как правило, будет не очень яркую, потому что количество света, проходящего через узкую щель, небольшое и распределяется по большой площади.

Ответ: а) 98° ; б) освещена значительная часть экрана.

Пример 4.

Дифракционная картина наблюдается на расстоянии 4 м от точечного источника монохроматического света ($\lambda=5\cdot 10^{-7}$ м). Посредине между экраном и источником света помещена диафрагма с круглым отверстием. При каком радиусе отверстия центр дифракционных колец, наблюдаемых на экране, будет наиболее темным?

Решение.

Пусть отверстие диафрагмы пропускает k зон Френеля.

Тогда радиус k -той зоны есть одновременно радиус отверстия, равный:

$$r_k = \sqrt{k \frac{ad\lambda}{a+d}}$$

Наименьшая освещенность центра колец, наблюдаемых на экране соответствует двум зонам ($k=2$).

Так как диафрагма с круглым отверстием помещена посредине между экраном и источником света, то $a=d=2$ м.

Тогда:

$$r_k = \sqrt{2 \frac{2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 10^{-7}}{4}} = 10^{-3} \text{ м.}$$

Ответ: 10^{-3} м.

Задания для самостоятельного решения

2.1. На дифракционную решетку, содержащую 400 штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ($\lambda=7\cdot 10^{-7}$ м). Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. Определить угол дифракции, отвечающий последнему максимуму.

2.2. На диафрагму с круглым отверстием диаметром $d=4$ мм падает нормально параллельный пучок лучей монохроматического света ($\lambda=5\cdot 10^{-7}$ м). На экране, расположенном на расстоянии $L=1$ м от диафрагмы, наблюдается дифракционная картина. Темное или светлое пятно находится в центре дифракционной картины?

2.3. На щель шириной $a=2\cdot 10^{-5}$ м падает нормально параллельный пучок монохроматического света с длиной волны $\lambda=5\cdot 10^{-7}$ м. Найти ширину первого дифракционного максимума на экране, расположенном от щели на расстоянии $L=1$ м.

2.4. С помощью дифракционной решетки с периодом $d=2\cdot 10^{-5}$ м нужно разрешить дублет натрия $\lambda=5,89\cdot 10^{-7}$ м и $\lambda=5,69\cdot 10^{-7}$ м в спектре второго порядка. При какой наименьшей длине решетки это возможно?

2.5. На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок белого света. Спектры третьего и четвертого порядка частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре четвертого порядка накладывается граница ($\lambda=7,8\cdot 10^{-7}$ м) спектра третьего порядка?

2.6. На дифракционную решетку, содержащую 600 штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ($\lambda=6,5\cdot 10^{-7}$ м). Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. Определить угол дифракции, отвечающий последнему максимуму.

2.7. На дифракционную решетку падает нормально параллельный пучок белого света. Спектры третьего и четвертого порядка частично накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре четвертого порядка накладывается граница ($\lambda=7,8\cdot 10^{-7}$ м) спектра третьего порядка?

2.8. На грань кристалла кухонной соли падает параллельный пучок рентгеновских волн. Расстояние между атомными плоскостями равно 290 пм. Под углом 75° к атомной плоскости наблюдается дифракционный максимум первого порядка. Определить длину волны рентгеновского излучения.

2.9. На грань кристалла кухонной соли падает параллельный пучок рентгеновских волн. Расстояние между атомными плоскостями равно 300 пм. Под углом 60° к атомной плоскости наблюдается дифракционный максимум первого порядка. Определить длину волны рентгеновского излучения.

2.10. На диафрагму с круглым отверстием диаметром $d=4$ мм падает нормально параллельный пучок лучей монохроматического света ($\lambda=5\cdot 10^{-7}$ м). На экране, расположенном на 1 м от диафрагмы, наблюдается дифракционная картина. Темное или светлое пятно находится в центре дифракционной картины?

2.11. На дифракционную решетку падает свет с длиной волны $\lambda=0,59$ мкм. Найти период решетки d , если угол между двумя спектрами первого порядка $2\varphi=13,6^\circ$.

2.12. На дифракционную решетку, имеющей $N=430$ штрихов на отрезке длиной $l=1$ мм, падает пучок света от натриевой лампы с длиной волны $\lambda=0,589$ мкм. Определить максимальный порядок спектра k_{\max} , соответствующий углу дифракции $\varphi_{\max}=90^\circ$.

2.13. Дифракционная решетка имеет $N=50$ штрихов на отрезке длиной $l=1$ мм. На решетку падает свет с длиной волны $\lambda=400$ нм. Определить синус угла дифракции φ , под которым образуется максимум второго порядка.

2.14. Дифракционная решетка имеет период $d=0,016$ мм. Линия спектра второго порядка расположена на расстоянии $l=14,2$ см от средней линии, а расстояние от решетки до экрана $L=1,5$ м. Определите длину волны света λ (для малого угла φ считать $\sin\varphi\approx\text{tg}\varphi=l/L$).

2.15. Какой порядок дифракционного максимума k наблюдается на экране от дифракционной решетки с периодом $d=0,02$ мм под углом $\varphi=6,8^\circ$, если длина волны падающего света $\lambda=473$ нм?

2.16. На дифракционную решетку падает свет с длиной волны $\lambda=0,43$ мкм. Найти период решетки d , если угол между двумя спектрами первого порядка $2\varphi=12^\circ$.

2.17. Сколько штрихов N на отрезке длиной $l=1$ мм имеет дифракционная решетка, если зеленая линия ртути с длиной волны $\lambda=546$ нм в спектре первого порядка наблюдается под углом $\varphi=19,8^\circ$? ($N=1/d$, где d – период решетки).

2.18. На пластину со щелью, ширина которой, $a=0,05$ мм, нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda=0,7$ мкм. Определите угол φ отклонения света, соответствующий первому дифракционному максимуму.

2.19. Определите длину волны λ рентгеновского излучения в пучке, который при отражении от поверхности кристалла каменной соли, имеющей постоянную решетки $d=281$ пм, дает первый дифракционный максимум под углом скольжения $\theta=14^\circ$.

2.20. Определить угол дифракции φ для спектра второго порядка света натрия с длиной волны $\lambda=0,589$ мкм, если на отрезок длиной $l=1$ мм дифракционной решетки приходится $N=50$ штрихов.

Таблица 1

Пределные углы (α_0) полного внутреннего отражения света

Вещество	α_0 , град	Вещество	α_0 , град
Алмаз	24	Глицерин	43
Бензин	45	Спирт	47
Вода	49	Стекло	30–42

Таблица 2

Длины волн видимой части спектра (λ)

Цвет	Границы, м	Цвет	Границы, м
Фиолетовый	$(38 - 45) \cdot 10^{-8}$	Желто-зеленый	$(55,0 - 57,5) \cdot 10^{-8}$
Синий	$(45 - 48) \cdot 10^{-8}$	Желтый	$(57,5 - 58,5) \cdot 10^{-8}$
Голубой	$(48 - 51) \cdot 10^{-8}$	Оранжевый	$(58,5 - 62,0) \cdot 10^{-8}$
Зеленый	$(51 - 55) \cdot 10^{-8}$	Красный	$(62,0 - 76,0) \cdot 10^{-8}$

Таблица 3

Показатели преломления (n)

Вещество	n	Вещество	n
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Воздух	1,00	Спирт	1,36
Вода	1,33	Стекло	1,5 – 1,9
Лед	1,31	Сероуглерод	1,63
Кварц	1,54	Каменная соль	1,54

Таблица 4

Основные физические постоянные (округлённые значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Числовое значение
Ускорение свободного падения	g	9,81 м/с ²
Универсальная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль К)
Число Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Электрическая постоянная	ε_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Элементарный заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж с
Масса покоя протона	m_n	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг

Контрольная часть: тестовые задания

2.1. Выберите правильное определение дифракции света:

а) дифракция – зависимость скорости распространения волны от частоты или длины волны $V=f(\nu)=\varphi(\lambda)$. Как результат – разложение сложного излучения на его составные части по частотам или длинам волн;

б) дифракция – явление отклонения света от его прямолинейного распространения, в результате чего световые волны могут попадать в область геометрической тени;

в) дифракция – наложение световых волн, в результате которого возникает *интерференционная картина* – чередующиеся светлые и темные области (*максимумы и минимумы* интенсивности света).

2.2 Дифракцией Фраунгофера называется:

а) дифракция в параллельных лучах;

б) дифракция в сходящихся лучах;

в) дифракция в расходящихся лучах.

2.3. Зоной Френеля называется:

а) область пространственной когерентности волн;

б) часть волновой поверхности с разницей хода лучей от ее краев к точке наблюдения кратной длине волны;

в) часть волновой поверхности с разницей хода лучей от ее краев к точке наблюдения равной половине длины волны.

2.4. В соответствии с принципом Гюйгенса каждая точка открытого фронта волны служит источником:

а) вторичных монохроматических волн;

б) вторичных сферических когерентных волн;

в) вторичных плоских волн.

2.5. Выберите формулу условия дифракционных минимумов от одной щели и поясните все входящие величины:

а) $a \cdot \sin \varphi = k\lambda; k = 0,1,2,\dots;$

б) $a \cdot \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

в) $2d \cdot \sin \theta = k\lambda; k = 0, 1, 2, \dots$

2.6. Выберите формулу условия дифракционных максимумов от одной щели и поясните все входящие величины:

а) $a \cdot \sin \varphi = k\lambda; k = 0, 1, 2, \dots;$

б) $a \cdot \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

в) $2d \cdot \sin \theta = k\lambda; k = 0, 1, 2, \dots$

2.7. Выберите формулу условия главных максимумов дифракционной решётки и поясните все входящие величины:

а) $d \cdot \sin \varphi = k\lambda; k = 0, 1, 2, \dots;$

б) $a \cdot \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

в) $2d \cdot \sin \theta = k\lambda; k = 0, 1, 2, \dots$

2.8. Выберите формулу Вульфа–Брэггов для дифракции рентгеновских лучей и поясните все входящие величины:

а) $d \cdot \sin \varphi = k\lambda; k = 0, 1, 2, \dots;$

б) $a \cdot \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}; k = 0, 1, 2, \dots;$

в) $2d \cdot \sin \theta = k\lambda; k = 0, 1, 2, \dots$

2.9. Дифракцией Френеля называется:

а) дифракция в параллельных лучах;

б) дифракция в сходящихся лучах;

в) дифракция в расходящихся лучах.

2.10. Выберите формулу разрешающей способности оптических приборов с круглым отверстием и поясните все входящие величины:

а) $R = \frac{D}{1,22\lambda};$

$$\text{б) } \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = k \cdot N ;$$

$$\text{в) } R = \frac{D}{\lambda}.$$

2.11. Выберите формулу разрешающей способности дифракционной решетки и поясните все входящие величины:

$$\text{а) } R = \frac{D}{1,22\lambda} ;$$

$$\text{б) } \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = k \cdot N ;$$

$$\text{в) } R = \frac{D}{\lambda}.$$

2.12. Дифракционная решетка это:

а) совокупность большого числа одинаковых щелей, отдаленных друг от друга на одинаковом расстоянии;

б) совокупность большого числа одинаковых щелей, отдаленных друг от друга на одинаковом расстоянии равном длине волны;

в) совокупность большого числа одинаковых щелей, отдаленных друг от друга на одинаковом расстоянии равном длине волны.

2.13. Постоянная дифракционной решетки это:

а) ширина щели a ;

б) суммарная ширина щели a и непрозрачного промежутка b ;

в) ширина непрозрачного промежутка.

2.14. Какие положения принципа Гюйгенса – Френеля верны:

а) каждая точка открытого фронта волны является точечным источником вторичных сферических волн, огибающая которых дает положение фронта волны в следующий момент времени (принцип Гюйгенса).

б) все вторичные сферические световые волны являются когерентными и способными интерферировать;

в) от равных по площади участков dS волновой поверхности в точку Р, лежащей перед этой поверхностью, приходят колебания равные по интенсивности. Максимальная интенсивность в направлении внешней нормали n к площадке dS .

Таблица 5

Верные ответы на тестовые задания

<i>Номера тестовых заданий</i>	<i>Верные ответы</i>
2.1	б
2.2	б
2.3	в
2.4	б
2.5	а
2.6	б
2.7	а
2.8	в
2.9	б
2.10	в
2.11	а
2.12	а
2.13	б
2.14	в

ТЕМА 3. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА. АБСОРБЦИЯ СВЕТА

3.1. Понятия нормальной и аномальной дисперсии

В отношении электромагнитных волн термин «дисперсия» понимают в смысле спектрального разложения сложного излучения на его составные части по частотам или длинам волн. Причиной этого является зависимость скорости распространения волны от частоты или длины волны $V=f(\nu)=\varphi(\lambda)$. А поскольку $V=c/n$, то и показатель преломления среды также оказывается зависящим от частоты или длины волны. И эта зависимость также называется *дисперсией*. Следствием дисперсии является разложение пучка белого света на монохроматические составляющие при его прохождении через стеклянную призму, а образующуюся при этом цветную полоску называли *сплошным спектром*. Впервые это явление открыто Ньютоном в 1672 году. Если рассмотреть падение светового луча на боковую грань трехгранной стеклянной призмы с преломляющим углом при ее вершине θ , то нетрудно показать, что угол отклонения лучей призмой определяется по формуле:

$$\psi = \theta(n - 1). \quad (3.1)$$

А поскольку n является функцией длины волны, то лучи разных длин волн после прохождения призмы окажутся отклоненными на разные углы (рис. 3.1). Поэтому пучок белого света и разлагается в спектр, причем максимально отклоняется свет фиолетового цвета, т.к. $\psi \sim n \sim 1/\lambda$. Количественной мерой дисперсии является величина $D=dn/d\lambda$.

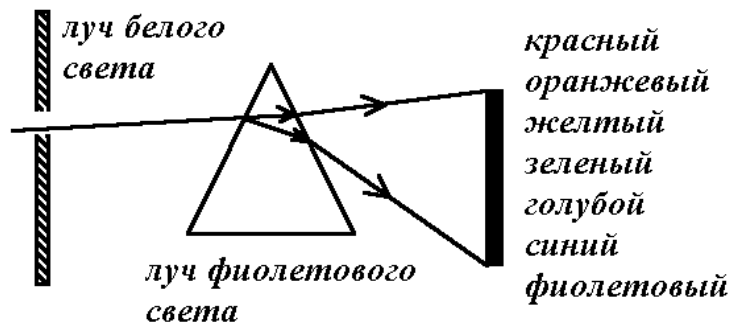


Рис. 3.1 Дисперсия света

Она показывает быстроту изменения показателя преломления n с изменением длины волны λ . Если $D > 0$, т.е. n увеличивается с уменьшением λ – такая дисперсия называется *нормальной*. Если же $D < 0$, т.е. n уменьшается с увеличением λ , такая дисперсия называется *аномальной*. Она наблюдается вблизи полос поглощения вещества. Зависимость $n(\lambda)$ имеет сложный характер. Согласно классической электронной теории, дисперсия света является результатом взаимодействия электромагнитной волны с заряженными частицами вещества, совершающими вынужденные колебания в переменном электромагнитном поле волны. Можно показать, что зависимость показателя преломления вещества от частоты колебаний электромагнитного поля ω определяется соотношением:

$$n^2 = 1 + \frac{A}{(\omega^2 - \omega_0^2)}, \quad (3.2)$$

где A – некая постоянная, зависящая от концентрации атомов среды, ω_0 – собственная частота колебаний электронов среды.

Зависимость показателя преломления от длины волны представлена на рисунке 3.2, где $\lambda_0 = 2\pi c / \omega_0$.

На участке AB (рис. 3.2) $D < 0$. Этот участок соответствует увеличению длины волны от 0 до λ_0 , а показатель преломления при этом убывает (это область *нормальной дисперсии*). На участке BC $D > 0$, т.е. с увеличением длины волны происходит возрастание показателя преломления.

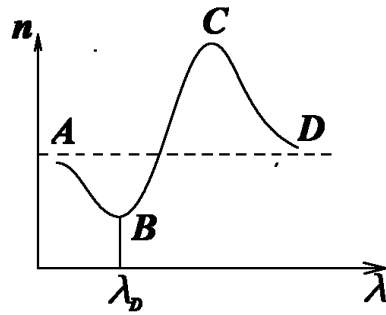


Рис. 3.2 Зависимость показателя преломления от длины волны

Это область *аномальной дисперсии*, объясняемой явлением *резонанса*: это явление наступает, когда частота внешнего электромагнитного поля ω равна частоте собственных колебаний ω электронов среды. Наконец, на участке *CD* снова $D < 0$ – область *нормальной дисперсии*: при увеличении длины волны от λ_0 до ∞ показатель преломления убывает до 1.

3.2. Абсорбция света

Явление уменьшения энергии световой волны при ее распространении в веществе вследствие ее преобразования в другие виды энергии называется *адсорбцией (поглощением) света*. В результате поглощения, интенсивность света при прохождении через вещество убывает, что описывается *законом Бугера-Ламберта*:

$$I = I_0 \cdot e^{-kx}, \quad (3.3)$$

где I_0 и I – интенсивности световой волны на входе и на выходе слоя поглощающего вещества толщиной x , k – коэффициент поглощения вещества, зависящий от длины волны падающего света, химической природы и состояния поглощающего вещества.

Если вещество находится в *атомарном состоянии*, то коэффициент поглощения k отличен от нуля в очень узких диапазонах длин волн

($\sim 10^{-12} \div 10^{-1}$ м), соответствующих резонансным частотам колебаний электронов внутри атомов. Поэтому одноатомные газы и пары металлов имеют *линейчатые спектры поглощения*. Если вещество находится в *молекулярном состоянии*, то коэффициент поглощения k отличен от нуля в более широких диапазонах длин волн ($\sim 10^{-10} \div 10^{-7}$ м). Молекулярные спектры определяются колебаниями атомов в молекулах и имеют вид полос поглощения (*полосатые спектры*). У *диэлектриков* наблюдается селективное поглощение в определенных интервалах длин волн, когда коэффициент поглощения k резко возрастает, и наблюдаются сравнительно широкие полосы. Поглощение света имеет *сплошной спектр* и обусловлено явлением резонанса при вынужденных колебаниях электронов в атомах и молекулах диэлектрика. В *металлах* свободные электроны движутся под действием электрического поля световой волны, поэтому в металлах возникают быстропеременные токи, сопровождающиеся выделением джоулевой теплоты. Энергия световой волны уменьшается, превращаясь во внутреннюю энергию металлов, которые по этой причине являются *непрозрачными для света*.

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение дисперсии света.
2. Как можно наблюдать дисперсию?
3. Дайте определение нормальной дисперсии света.
4. Дайте определение аномальной дисперсии света.
5. При каком условии наблюдается аномальная дисперсия света?
6. В чем суть электронной теории дисперсии света?
7. В чем состоит и где используется спектральный анализ?
8. Какие методы спектрального анализа знаете?
9. Как понимаете механизм прохождения света через вещество?
10. Запишите закон поглощения света (закон Бугера-Ламберта).
11. Объясните явление резонанса.

Практическая часть

Примеры решения задач

Пример 1.

Определить угловую дисперсию дифракционной решётки для $\lambda=589 \cdot 10^{-9}$ м в спектре первого порядка. Постоянная решётки $d=2,5 \cdot 10^{-6}$ м.

Решение.

$$\text{Угловая дисперсия дифракционной решётки: } D = \frac{d\varphi}{d\lambda}, \quad (1)$$

Условие максимума на решётке определяется по формуле:

$$d \sin \theta = k\lambda, \quad (2)$$

Дифференцируя уравнение (2) получим: $d \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi = k \cdot d\lambda$, откуда:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi}, \text{ тогда } D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi}.$$

Используя уравнение (2) получим: $\sin \varphi = \frac{k\lambda}{d} = \frac{589 \cdot 10^{-9}}{25 \cdot 10^{-7}} 0,236$, а $\varphi = 13^\circ 38'$.

Из таблиц $\cos \varphi = 0,972$. Тогда: $D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi} = 1/2,5 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 10^{-5}$ (1/м).

Ответ: угловая дисперсия дифракционной решётки $4 \cdot 10^{-5}$ 1/м.

Пример 2.

В сколько раз уменьшится интенсивность света I_0 , прошедшего через слой поглощающего вещества толщиной $x=1,2$ см, если коэффициент поглощения этого вещества равен $k=0,28$ см⁻¹?

Решение.

Интенсивность света при прохождении через вещество убывает, что описывается законом Бугера-Ламберта: $I = I_0 \cdot e^{-kx}$.

Используя закон Бугера-Ламберта получим: $\frac{I_0}{I} = e^{kx}$, $\ln \frac{I_0}{I} = kx$.

Откуда: $\ln \frac{I_0}{I} = 0,28 \cdot 1,2 = 0,56$, $\frac{I_0}{I} = e^{0,56}$.

Ответ: интенсивность уменьшилась в $e^{0,56}$.

Задания для самостоятельного решения

3.1 На прозрачную трехгранную призму с углом при вершине $\theta=20^\circ$ падает луч света перпендикулярно к грани. Определите показатель преломления вещества призмы n , если угол между падающим лучом и лучом, выходящим из призмы $\varphi=15^\circ$.

3.2. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, прошедшего через слой поглощающего вещества толщиной $x=1,2$ см, если коэффициент поглощения этого вещества составляет $k=0,28$ см⁻¹?

3.3. Свет какого цвета из видимого диапазона меньше всех других отклоняется призмой спектроскопа? Поясните.

3.4. На прозрачную трехгранную призму с углом при вершине $\theta=15^\circ$ падает луч света перпендикулярно к грани. Определить показатель преломления вещества призмы n , если угол между падающим лучом и лучом, который выходит из призмы равен $\varphi=10^\circ$.

3.5. Свет какого цвета из видимого диапазона больше всех других отклоняется призмой спектроскопа? Поясните.

3.6. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, прошедшего через слой поглощающего вещества толщиной $x=2,8$ см, если коэффициент поглощения этого вещества $k=0,16$ см⁻¹?

3.7. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, прошедшего через слой поглощающего вещества толщиной $x=7$ см, если коэффициент поглощения этого вещества $k=0,146$ см⁻¹?

3.8. Определите коэффициент поглощения прозрачного вещества k , слой которого толщиной $x=4,2$ см, уменьшает интенсивность прошедшего через него света в 5,6 раза.

3.9. Монохроматический луч падает нормально на боковую поверхность призмы и выходит из нее отклоненным на угол $\varphi=25^\circ$. Показатель преломления материала призмы для этого луча $n=1,7$. Определите преломляющий угол призмы θ при ее вершине.

3.10. В сколько раз уменьшится интенсивность света, прошедшего через слой поглощающего вещества толщиной $x=9$ см, если коэффициент поглощения этого вещества $k=0,3 \frac{1}{\text{см}}$?

Показатели преломления (n)

<i>Вещество</i>	n	<i>Вещество</i>	n
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Воздух	1,00	Спирт	1,36
Вода	1,33	Стекло	1,5 – 1,9
Лед	1,31	Сероуглерод	1,63
Кварц	1,54	Каменная соль	1,54

Предельные углы (α_0) полного внутреннего отражения света

<i>Вещество</i>	α_0 , град	<i>Вещество</i>	α_0 , град
Алмаз	24	Глицерин	43
Бензин	45	Спирт	47
Вода	49	стекло	30 – 42

Длины волн видимой части спектра (λ)

<i>Цвет</i>	<i>Границы, м</i>	<i>Цвет</i>	<i>Границы, м</i>
Фиолетовый	$(38 - 45) \cdot 10^{-8}$	Желто-зеленый	$(55,0 - 57,5) \cdot 10^{-8}$
Синий	$(45 - 48) \cdot 10^{-8}$	Желтый	$(57,5 - 58,5) \cdot 10^{-8}$
Голубой	$(48 - 51) \cdot 10^{-8}$	Оранжевый	$(58,5 - 62,0) \cdot 10^{-8}$
Зеленый	$(51 - 55) \cdot 10^{-8}$	Красный	$(62,0 - 76,0) \cdot 10^{-8}$

Основные физические постоянные (округлённые значения)

<i>Физическая постоянная</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Числовое значение</i>
Ускорение свободного падения	g	9,81 м/с ²
Универсальная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль К)
Число Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Электрическая постоянная	ε_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Элементарный заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж с
Масса покоя протона	m_n	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг

Контрольная часть: тестовые задания

3.1. Выберите правильное определение дисперсии света:

а) дисперсия – зависимость скорости распространения волны от частоты или длины волны $V=f(\nu)=\varphi(\lambda)$. Как результат – разложение сложного излучения на его составные части по частотам или длинам волн;

б) дисперсия – явление отклонения света от его прямолинейного распространения, в результате чего световые волны могут попадать в область геометрической тени;

в) дисперсия – наложение световых волн, в результате которого возникает интерференционная картина – чередующиеся светлые и темные области (максимумы и минимумы интенсивности света).

3.2. Выберите правильное определение нормальной дисперсии света:

а) нормальной называется дисперсия, когда с ростом частоты света растет показатель преломления среды;

б) нормальной называется дисперсия, когда с ростом частоты света уменьшается показатель преломления среды;

в) нормальной называется дисперсия, когда с ростом длины волны света растет показатель преломления среды.

3.3. Выберите правильное определение аномальной дисперсии света:

а) аномальной называется дисперсия, когда с ростом частоты света растет показатель преломления среды;

б) аномальной называется дисперсия, когда с ростом частоты света падает показатель преломления среды;

в) аномальной называется дисперсия, когда с ростом длины волны света уменьшается показатель преломления среды.

3.4. Свет какого цвета из видимого диапазона менее всего среди других отклоняется призмой спектроскопа:

а) красного ($\lambda \sim 700$ нм);

б) фиолетового ($\lambda \sim 400$ нм);

в) синего ($\lambda \sim 450$ нм).

3.5. Свет какого цвета из видимого диапазона более всего среди других отклоняется призмой спектроскопа:

а) красного ($\lambda \sim 700$ нм);

б) фиолетового ($\lambda \sim 400$ нм);

в) синего ($\lambda \sim 450$ нм).

3.6. На каком физическом явлении основана работа спектроскопа:

а) на явлении дифракции света;

б) на явлении интерференции света;

в) на явлении дисперсии света.

3.7. В чем состоит спектральный анализ:

а) по спектру излучения определяют температуру тела;

б) по спектру излучения (или поглощения) определяют какие элементы таблицы Менделеева входят в состав исследуемого тела;

в) все вышеуказанное верно.

3.8. Выберите формулу зависимости показателя преломления от длины волны:

а) $n^2 = 1 + \frac{A}{\omega^2 - \omega_0^2}$;

б) $I = I_0 \cdot e^{-kx}$;

в) $n = \frac{c}{v}$.

3.9. Выберите формулу закона Бугера-Ламберта:

а) $n^2 = 1 + \frac{A}{\omega^2 - \omega_0^2}$;

б) $I = I_0 \cdot e^{-kx}$;

в) $n = \frac{c}{v}$.

3.10. Какие методы спектрального анализа знаете:

а) по спектру излучения определяют химический состав тела;

- б) по спектру поглощения определяют химический состав тела;
в) все вышеуказанное верно.

Таблица 5

Верные ответы на тестовые задания

<i>Номера тестовых заданий</i>	<i>Верные ответы</i>
3.1	а
3.2	а
3.3	б
3.4	а
3.5	б
3.6	б
3.7	в
3.8	а
3.9	б
3.10	в

ТЕМА 4. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

4.1. Естественный и поляризованный свет

Свет – это поток электромагнитных волн. Эти волны поперечные, т.е. векторы E и H испытывают колебания в плоскостях, перпендикулярных световому лучу (рис. 4.1). Плоскость, в которой колеблется вектор E (его называют *световым вектором*), называется *плоскостью поляризации* (рис. 4.1, плоскость A), плоскость в которой колеблется вектор H – *плоскостью колебаний* (плоскость B).

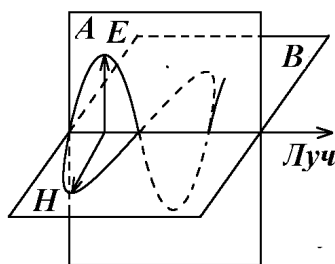


Рис. 4.1 Волна поляризованного света

Свет, в котором плоскости колебаний светового вектора равновероятны, называется естественным.

Свет, в котором плоскости колебаний светового вектора каким-либо образом упорядочены, называется частично поляризованным.

Свет, в котором световой вектор колеблется только в одном направлении, называется линейно поляризованным или плоско-поляризованным. Существует несколько способов получения плоско-поляризованного света:

- 1) при *отражении и преломлении* света на границе прозрачных изотропных диэлектриков;
- 2) при прохождении света через *оптически анизотропные среды*.

4.2. Поляризация при отражении света на границе прозрачных изотропных диэлектриков. Закон Брюстера

Если естественный свет падает на отражающую поверхность диэлектрика (стекла, слюды и др.) под углом, отличным от нуля, то *отраженный и преломленный лучи* оказываются *частично поляризованными*. При этом в отраженном луче преобладают колебания вектора E перпендикулярные плоскости падения, а в преломленном луче – колебания вектора E лежащие в плоскости падения. *Степень поляризации зависит от угла падения*. Шотландский физик *Брюстер* установил, что при падении естественного света на границу прозрачных изотропных диэлектриков под углом i_B , отраженный луч будет *полностью поляризован*, а преломленный – *максимально поляризован* (рис. 4.2). В законе Брюстера $n_{21} = n_2/n_1$ – относительный показатель преломления второй среды относительно первой. Можно показать, что при падении естественного света под углом Брюстера, отраженный и преломленный лучи *взаимно перпендикулярны*.

$$\operatorname{tg}(i_B) = n_{21}. \quad (4.1)$$

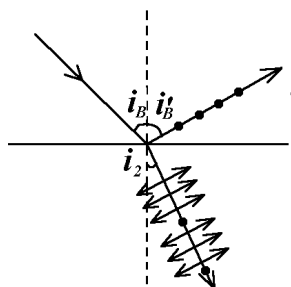


Рис. 4.2 Поляризация света при отражении от диэлектрика

4.3. Поляризация при прохождении света через оптически анизотропные среды

Вещества называются *оптически анизотропными*, если их физические свойства различны в разных направлениях. Направления в оптически

анизотропных кристаллах, вдоль которых скорость распространения света не зависит от ориентации светового вектора E , называются *оптическими осями* кристалла (MN на рис. 4.3). Кристаллы с одной оптической осью называются *одноосными*, с двумя – *двухосными*. Плоскость, проходящая через направление луча света и оптическую ось кристалла, называется *главной плоскостью* кристалла. Способность анизотропных веществ расщеплять падающий световой луч на два луча, распространяющихся в разных направлениях, с различной скоростью и поляризованных во *взаимно перпендикулярных* плоскостях называют явлением *двойного лучепреломления* (рис. 4.3). При падении узкого светового пучка на кристалл, из него выходят два пространственно разделенных луча, параллельных друг другу: *обыкновенный* (o) и *необыкновенный* (e).

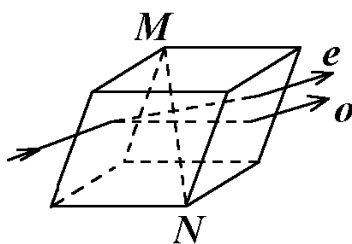


Рис. 4.3 Двойное лучепреломление

Даже при нормальном падении первичного пучка на кристалл, преломленный пучок все равно делится на две части: обыкновенный луч (o) является продолжением первичного пучка и *поляризован перпендикулярно главной плоскости* кристалла (рис. 4.4). (и его оптической оси), и необыкновенный (e) луч отклоняется кристаллом и *поляризован в главной плоскости* кристалла. Колебания вектора E при любом направлении обыкновенного луча перпендикулярны оптической оси, поэтому этот луч распространяется в кристалле с *одинаковой скоростью* $V_o=c/n_o=const$ во всех направлениях, то есть *волновая поверхность обыкновенного луча – сфера* (рис. 4.5а). Для необыкновенного луча угол между оптической осью кристалла и вектором E отличен от прямого и зависит от направления луча, поэтому этот

луч распространяется в кристалле по различным направлениям с *разной скоростью* $V_e=c/n_e \neq const.$

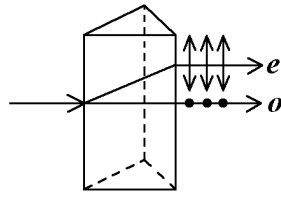


Рис. 4.4 Поляризация при двойном лучепреломлении



Рис. 4.5 Волновые поверхности поляризованного света

Вдоль оптической оси $V_0=V_e$ – скорость света имеет одинаковое значение, а наибольшее расхождение в скоростях – в направлении, перпендикулярном оптической оси, т.е. *волновая поверхность необыкновенного луча – эллипсоид* (рис. 4.5б).

4.4. Поляризаторы и анализаторы. Закон Малюса

Приборы, с помощью которых из естественного света можно получить поляризованный свет называются *поляризаторами*. Поляризаторы P – приспособления, пропускающие колебания, параллельные главной плоскости поляризатора, полностью или частично задерживают колебания, перпендикулярные ей. В качестве поляризаторов используются *среды, анизотропные в отношении колебаний светового вектора E* . Их типичными представителями являются *кристаллы, в частности турмалин, поляризационные*

призмы, поляроиды. Для обнаружения и анализа поляризованного света, используют такие же поляризаторы, которые в этом случае называются анализаторами A . Французский физик Малюс установил, что интенсивность света, прошедшего последовательно через поляризатор P и анализатор A , пропорциональна квадрату косинуса угла α между их главными плоскостями:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (4.2)$$

где I_0 – интенсивность плоско-поляризованного света, падающего на анализатор (пропорциональна квадрату амплитуды светового вектора света, прошедшего сквозь поляризатор E_0^2), I – интенсивность света, вышедшего из анализатора, $I \sim E_{\parallel}^2$ (рис. 4.6).

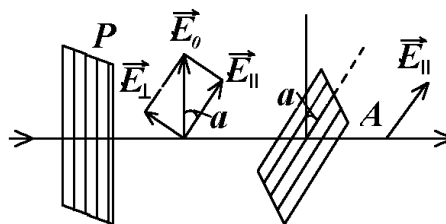


Рис. 4.6 Прохождение света через поляризатор P и анализатор A

4.5. Вращение плоскости поляризации

Некоторые твердые (кварц, сахар, киноварь и др.) и жидкие (скипидар, винная кислота, водные растворы сахара и др.) вещества обладают способностью поворачивать плоскость поляризации световой волны. Такая способность называется *оптической активностью*, а сами вещества – *оптически активными (ОАВ)*. Если между скрещенными поляризатором P и анализатором A расположить $ОАВ$ (рис. 4.7), то темное поле зрения в какой-то мере просветляется.

Если A повернуть на угол φ , снова получим темное поле зрения. Это означает, что после прохождения $ОАВ$ свет остается плоско-поляризованным, но оно *поворачивает плоскость поляризации* света на угол φ .

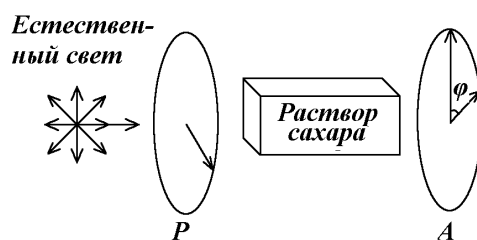


Рис. 4.7 Вращение плоскости поляризации

Оптическая активность обусловлена как строением молекул *OAB* (их асимметрией), так и особенностями расположения частиц в кристаллической решетке. Угол поворота плоскости поляризации оптически активными кристаллами и чистыми жидкостями определяется соотношением:

$$\varphi = \alpha_0 \cdot d, \quad (4.3)$$

а для активных водных растворов:

$$\varphi = \alpha_0 \cdot C \cdot d, \quad (4.4)$$

где d – толщина *OAB*, α_0 – удельное вращение – угол поворота плоскости поляризации слоем *OAB* единичной толщины (и единичной концентрации для растворов), C – массовая концентрация *OAB* в растворе.

В зависимости от направления вращения плоскости поляризации, различают *право-* и *лево- вращающие OAB*. Если смотреть навстречу лучу, то первые из них поворачивают плоскость поляризации *по часовой стрелке*, а вторые – *против нее*.

4.6. Искусственная оптическая анизотропия. Эффект Керра

Явление поворота плоскости поляризации можно наблюдать и в оптически неактивных веществах, в которых *искусственно создана оптическая анизотропия*. Если естественно изотропное вещество подвергнуть

механическому напряжению либо поместить в электрическое или магнитное поле, то вещество приобретает свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого совпадает соответственно с направлениями деформации, электрического или магнитного поля. Искусственная оптическая анизотропия прозрачных веществ под действием однородного электрического поля называется *эффектом Керра* (рис. 4.8), а под действием магнитного поля – *эффектом Фарадея*. Явление вращения плоскости поляризации *OAB* лежит в основе точного метода определения концентрации растворов *OAB*, называемого *поляризацией*.

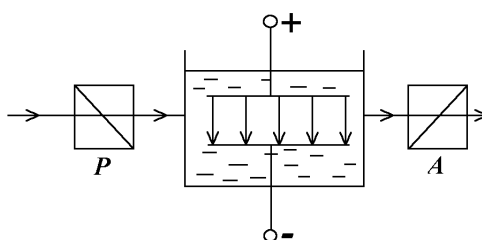


Рис. 4.8 Эффект Керра

Поляризованный свет используется в *поляризационной микроскопии* и *фотометрии* для изучения физических свойств веществ.

Контрольные вопросы:

1. Какой свет называется естественным, а какой поляризованным?
2. Дайте определение плоско-поляризованного света.
3. Какие существуют методы получения плоско-поляризованного света?
4. Запишите и сформулируйте закон Брюстера.
5. В чем состоит явление дихроизма?
6. Поясните принцип работы поляроида.
7. В чем состоит явление двойного лучепреломления
8. В чем отличие обыкновенного и необыкновенного лучей?
9. Сформулируйте и запишите закон Малюса.
10. Какие вещества называются оптически активными?
11. Объясните эффект Керра и эффект Фарадея.

Практическая часть

Примеры решения задач

Пример 1.

Неполяризованный свет проходит через два поляроида. Оптическая ось одного из них вертикальна, а ось другого образует с вертикалью угол 60° . Какая поляризация и интенсивность прошедшего света?

Решение.

Первый поляризатор исключает половину света, поэтому после него интенсивность света уменьшается наполовину: $I_1 = \frac{1}{2}I_0$. Свет, падающий на второй поляризатор, поляризован в вертикальной плоскости. После второго поляризатора интенсивность света уменьшается, в соответствии с законом Малюса,

по формуле: $I = I_0 \cos^2 60^\circ = \frac{1}{4}I_1$, $I_2 = \frac{1}{4}I_1 = \frac{1}{8}I_0$.

Ответ: интенсивность прошедшего света представляет одну восьмую от интенсивности падающего света, а плоскость его поляризации образует с вертикалью угол 60° .

Пример 2.

а) При каком угле падения θ_p солнечный свет, отраженный от поверхности озера, становится плоско поляризованным?

б) Чему равен при этом угол преломления θ_r ?

Решение.

а) Воспользуемся законом Брюстера: $\operatorname{tg} \theta_p = \frac{n_2}{n_1}$,

где $n_1=1$ – показатель преломления воздуха, $n_2=1,33$ – показатель преломления воды. Тогда $\operatorname{tg} \theta_p = 1,33$ и $\theta_p = 53,1^\circ$.

б) Когда свет, отраженный от поверхности озера становится полностью поляризованным, то угол между отраженным и преломленным лучами равен 90° . То есть, $\theta_p = 90^\circ - 53,1^\circ = 36,9^\circ$.

Ответ: солнечный свет, отраженный от поверхности озера, становится полностью плоско-поляризованным при угле падения $\theta_p=53,1^\circ$, при этом угол преломления $\theta_r=36,9^\circ$.

Пример 3.

Определить коэффициент отражения естественного света, падающего на стекло ($n=1,54$) под углом полной поляризации. Найти степень поляризации лучей, прошедших в стекло. Поглощением света пренебречь.

Решение.

Коэффициент отражения падающего света это: $k = \frac{I_1}{I_0}$, где $I_1 = I_{\perp} + I_{\parallel}$,

$$\text{причем: } I_{\perp} = 0,5I_0 \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}, \quad I_{\parallel} = 0,5I_0 \frac{\operatorname{tg}^2(i-r)}{\operatorname{tg}^2(i+r)}.$$

В общем случае, при падении луча под углом полной поляризации $\operatorname{tgi}=n=1,54$. Следовательно, $i=57^\circ$. Так как $i+r=90^\circ$, то $r=33^\circ$.

$$\text{Тогда: } I_{\perp} = 0,5I_0 \frac{\sin^2 24^\circ}{\sin^2 90^\circ} = 0,083I_0, \quad I_{\parallel} = 0,5I_0 \frac{\operatorname{tg}^2 24^\circ}{\operatorname{tg}^2 90^\circ} = 0,$$

т.е. в отраженном свете колебания только в плоскости перпендикулярной плоскости падения. При этом $k = \frac{I_1}{I_0} = \frac{0,83}{1} = 0,83$.

Таким образом, коэффициент отражения $k=0,083=8,3\%$. Следовательно, энергия колебаний, перпендикулярных плоскости падения и прошедших во вторую среду будет составлять 41,7% от общей энергии лучей, упавших на границу раздела. Энергия колебаний, лежащих в плоскости падения составляет 50%.

Степень поляризации лучей, прошедших во вторую среду будет:

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}} = \frac{0,083}{0,917} = 0,091 = 0,1\%.$$

Ответ: коэффициент отражения $k=0,083=8,3\%$, степень поляризации прошедших лучей $P=0,091=0,1\%$.

Задания для самостоятельного решения

4.1. Угол поворота плоскости поляризации желтого света натрия при прохождении через трубку с раствором сахара равен 40° . Длина трубки $l=15$ см. Удельное вращение сахара равно 10^{-2} град·м³/г·кг. Определить концентрацию раствора.

4.2. Во сколько раз ослабляется интенсивность естественного света, проходящего через два николя, плоскости поляризации которых образуют между собой угол $\alpha=45^\circ$, если в каждом из николей происходит поглощение 5% интенсивности падающего на него света, не связанное с поляризацией света.

4.3. Неполяризованный свет проходит через два поляроида. Ось одного из них вертикальна, а ось другого образует с вертикалью угол $\alpha=45^\circ$. Какая поляризация и интенсивность прошедшего света?

4.4. Во сколько раз ослабляется интенсивность естественного света, проходящего через два николя, плоскости поляризации которых образуют между собой угол $\alpha=30^\circ$, если в каждом из николей происходит поглощение 10% интенсивности падающего на него света, не связанное с поляризацией света.

4.5. Неполяризованный свет проходит через два поляроида. Ось одного из них вертикальна, а ось другого образует с вертикалью угол $\alpha=45^\circ$. Какова поляризация и интенсивность прошедшего света?

4.6. Во сколько раз ослабляется интенсивность естественного света, проходящего через два николя, плоскости поляризации которых образуют между собой угол $\alpha=60^\circ$, если в каждом из николей происходит поглощение 15% интенсивности падающего на него света, не связанное с поляризацией света.

4.7. Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора если интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор, уменьшилась в четыре раза? Поглощением света пренебречь.

4.8. Чему равен показатель преломления стекла, если при отражении от него естественного света, луч будет полностью поляризован при угле преломления 30° .

4.9. Какой угол γ с горизонтом должны образовывать солнечные лучи, чтобы при отражении от поверхности озера они стали полностью поляризованными? Показатель преломления воды $n=1,33$.

4.10. Пучок света, идущий в стеклянном сосуде с глицерином, отражается от его дна. При каком угле падения α отраженный пучок света будет полностью поляризованным? Показатели преломления глицерина $n_1=1,47$ и стекла $n_2=1,81$.

4.11. Угол падения луча на поверхность стекла $\alpha=60^\circ$, при этом отраженный пучок света оказался полностью поляризованным. Определить угол преломления луча β .

4.12. Как ослабляется световой пучок, проходящий через поляризатор и анализатор, плоскости поляризации которых составляют угол $\varphi=60^\circ$, если в каждом из них дополнительно на поглощение и рассеивание теряется по 10% энергии светового потока?

4.13. Предельный угол полного внутреннего отражения $\alpha_{пр}$ для некоторого вещества равен 45° . Определите для этого вещества угол *полной поляризации* i_B .

4.14. Световой луч отражается от дна стеклянного сосуда с налитой жидкостью. Отраженный луч оказался полностью поляризованным при падении на дно под углом $\alpha=42,6^\circ$. Определите показатель преломления жидкости n_1 , если показатель преломления стекла $n_2=1,5$.

4.15. Как изменится интенсивность света, вышедшего из анализатора, если угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора уменьшить от $\varphi_1=60^\circ$ до $\varphi_2=30^\circ$?

Таблица 1

Предельные углы (α_0) полного внутреннего отражения света

<i>Вещество</i>	<i>α_0, град</i>	<i>Вещество</i>	<i>α_0, град</i>
Алмаз	24	Глицерин	43
Бензин	45	Спирт	47
Вода	49	Стекло	30 – 42

Таблица 2

Длины волн видимой части спектра (λ)

<i>Цвет</i>	<i>Границы, м</i>	<i>Цвет</i>	<i>Границы, м</i>
Фиолетовый	$(38 - 45) \cdot 10^{-8}$	Желто-зеленый	$(55,0 - 57,5) \cdot 10^{-8}$
Синий	$(45 - 48) \cdot 10^{-8}$	Желтый	$(57,5 - 58,5) \cdot 10^{-8}$
Голубой	$(48 - 51) \cdot 10^{-8}$	Оранжевый	$(58,5 - 62,0) \cdot 10^{-8}$
Зеленый	$(51 - 55) \cdot 10^{-8}$	Красный	$(62,0 - 76,0) \cdot 10^{-8}$

Таблица 3

Показатели преломления (n)

<i>Вещество</i>	<i>n</i>	<i>Вещество</i>	<i>n</i>
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Воздух	1,00	Спирт	1,36
Вода	1,33	Стекло	1,5 – 1,9
Лед	1,31	Сероуглерод	1,63
Кварц	1,54	Каменная соль	1,54

Контрольная часть: тестовые задания

4.1. Какой свет называется естественным:

а) свет, в котором плоскости колебаний светового вектора E каким-либо образом упорядочены;

б) свет в котором колебания вектора E во всех направлениях (в плоскости перпендикулярной скорости) равновероятны;

в) свет, в котором световой вектор E колеблется только в одном направлении (в плоскости перпендикулярной скорости).

4.2. Поляризованным светом называется:

а) свет, в котором плоскости колебаний светового вектора E каким-либо образом упорядочены;

б) свет в котором колебания вектора E (его называют световым вектором) во всех направлениях равновероятны;

в) свет, в котором световой вектор E колеблется только в одном направлении (в плоскости перпендикулярной скорости).

4.3. Какой свет называется плоско-поляризованным:

а) свет, в котором плоскости колебаний светового вектора E каким-либо образом упорядочены;

б) свет в котором колебания вектора E во всех направлениях равновероятны;

в) свет, в котором световой вектор E колеблется только в одном направлении (в плоскости перпендикулярной скорости).

4.4. *Какая плоскость в поляризованной световой волне называется плоскостью поляризации:*

а) плоскость, в которой колеблется вектор E ;

б) плоскость, в которой колеблется вектор H ;

в) плоскость, проходящую через направление луча света и оптическую ось кристалла.

4.5. Дихроизмом называется:

а) явление поглощения преимущественно необыкновенного луча;

б) явление поглощения преимущественно обыкновенного луча;

в) зависимость скорости распространения лучей в кристалле от угла падения.

4.6. *Углом Брюстера называется:*

а) угол падения луча света на границу раздела двух прозрачных диэлектриков;

б) угол падения луча света на границу раздела двух прозрачных диэлектриков при котором переломленный и отраженный лучи взаимно перпендикулярны;

в) угол падения луча света на границу раздела двух прозрачных диэлектриков, при котором отраженный луч становится полностью поляризуемым.

4.7. *Выберите формулу закона Брюстера и поясните ее:*

а) $d \cdot \sin \varphi = k\lambda; k = 0,1,2\dots;$

б) $\operatorname{tg} i_0 = n_{21} = \frac{n_2}{n_1};$

в) $I = I_0 \cos^2 \alpha.$

4.8. *Выберите формулу закона Малюса и поясните ее:*

а) $d \cdot \sin \varphi = k\lambda; k = 0,1,2\dots;$

б) $\operatorname{tg} i_0 = n_{21} = \frac{n_2}{n_1};$

в) $I = I_0 \cos^2 \alpha.$

4.9. *Какое явление называют двойным лучепреломлением:*

а) это искусственная оптическая анизотропия прозрачных веществ под действием однородного электрического поля;

б) способность вещества поворачивать плоскость поляризации световой волны;

в) способность анизотропных веществ расщеплять падающий световой луч на два луча, что распространяются в разных направлениях, с различной скоростью и поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

4.10. *Что называют плоскостью главного сечения кристалла:*

- а) плоскость, в которой колеблется вектор E (световой вектор);
- б) плоскость, проходящую через направление луча света и оптическую ось кристалла;
- в) плоскость, в которой колеблется вектор H .

4.11. *Какое явление называют эффектом Керра:*

- а) способность вещества поворачивать плоскость поляризации световой волны;
- б) возникновение искусственной оптической анизотропии прозрачных веществ под действием однородного магнитного поля;
- в) возникновение искусственной оптической анизотропии прозрачных веществ под действием однородного электрического поля.

4.12. *Какое явление называют эффектом Фарадея:*

- а) возникновение искусственной оптической анизотропии прозрачных веществ под действием однородного магнитного поля;
- б) возникновение искусственной оптической анизотропии прозрачных веществ под действием однородного электрического поля;
- в) способность вещества поворачивать плоскость поляризации световой волны.

4.13. *Что называется оптической активностью вещества:*

- а) возникновение искусственной оптической анизотропии прозрачных веществ под действием однородного магнитного поля;
- б) возникновение искусственной оптической анизотропии прозрачных веществ под действием однородного электрического поля;
- в) способность вещества поворачивать плоскость поляризации световой волны.

4.14. *Какие приборы называются поляризаторами:*

- а) приборы, с помощью которых из естественного света можно получить поляризованный свет;

б) приборы, с помощью которых можно создать искусственную оптическую анизотропию прозрачных веществ;

в) приборы, способные поворачивать плоскость поляризации световой волны.

4.15. *Какая плоскость в поляризованной световой волне называется плоскостью колебаний:*

а) плоскость, в которой колеблется вектор \mathbf{E} (световой вектор);

б) плоскость, в которой колеблется вектор \mathbf{H} ;

в) плоскость, проходящую через направление луча света и оптическую ось кристалла.

4.16. *Какая плоскость в поляризованной световой волне называется плоскостью поляризации:*

а) плоскость, в которой колеблется вектор \mathbf{E} (световой вектор);

б) плоскость, в которой колеблется вектор \mathbf{H} ;

в) плоскость, проходящую через направление луча света и оптическую ось кристалла.

Таблица 5

Верные ответы на тестовые задания

<i>Номера тестовых заданий</i>	<i>Верные ответы</i>
4.1	б
4.2	а
4.3	в
4.4	а
4.5	а
4.6	в
4.7	б
4.8	в
4.9	в
4.10	б
4.11	в
4.12	а
4.13	в
4.14	а
4.15	а
4.16	б

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриева, В. Ф. Основы физики: учебное пособие для студентов вузов / В. Ф. Дмитриева, В. Л. Прокофьев. – Москва: Высшая школа, 2001. – 527 с.
2. Акимов, О. Е. Естествознание: курс лекций / О. Е. Акимов. – Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 639 с.
3. Трофимова, Т. И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 2003. – 542 с.
4. Путилов, К. А. Курс физики. Т. 3: учебное пособие для студентов вузов / К. А. Путилов, В. А. Фабрикант. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 1963. – 634 с.
5. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 4-х т. Т. 3: учебное пособие для вузов / И. В. Савельев. – Москва: Наука, 1970. – 527 с.
6. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. В 5-х т. Т. 4: учебное пособие для вузов / Д. В. Сивухин. – Москва: Физматлит, 1980. – 752 с.
7. Детлаф, А. Х. Курс физики: учебное пособие для вузов / А. Х. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва: Высшая школа, 2011. – 608 с.
8. Бондарев, Б. В. Курс общей физики. В 3-х т. Т. 2. Электромагнетизм. Оптика. Квантовая физика: учебник для бакалавров / Б. В. Бондарев. – Москва: Юрайт, 2013. – 441 с.
9. Стерхов, К. В. Курс общей физики: учебное пособие. В 3-х т. Т. 3. Оптика. Физика атомов и молекул. Физика атомного ядра и микрочастиц КПП / К. В. Стерхов. – Санкт-Петербург: Лань КПП, 2016. – 496 с.
10. Тульчинский, Г. Л. Курс общей физики. В 3-х тт. Том 2 Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: учебник / Г. Л. Тульчинский, С. В. Герасимов, Т. Е. Лохина. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 496 с.
11. Фаритов, Т. А. Курс общей физики: учебник / Т. А. Фаритов. – Санкт-Петербург: Лань П, 2016. – 656 с.
12. Фальковский, О. И. Курс общей физики: учебник / О. И. Фальковский. – Санкт-Петербург: Лань П, 2016. – 480 с.
13. Толмачев, Ю. А. Курс физики: учебное пособие / Ю. А. Толмачев, В. Ю. Дубок. – Санкт-Петербург: Лань П, 2016. – 448 с.

14. Сушков, А. Курс физики: учебник / А. Сушков. – Санкт-Петербург: Лань П, 2014. – 672 с.
15. Сулин, М. Курс физики с примерами решения задач. Часть III. Оптика. Основы атомной физики и квантовой механики. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие / М. Сулин. – Санкт-Петербург: Лань, 2015. – 336 с.
16. Стрелков, С. П. Практикум по решению задач по общему курсу физики. Колебания и волны. Оптика: учебное пособие / С. П. Стрелков. – Санкт-петербург: Лань, 2013. – 208 с.
17. Стась, Н. Ф. Курс физики: учебное пособие / Н. Ф. Стась. – Санкт-Петербург: Лань, 2012. – 608 с.
18. Кузнецов, С. И. Курс физики с примерами решения задач. Ч. 3. Оптика. Основы атомной физики и квантовой механики. Физика атомного ядра и элементарных частиц. / С. И. Кузнецов. – Санкт-Петербург: Лань, 2015. – 336 с.
19. Алешкевич, В. А. Электромагнетизм. университетский курс общей физики / В. А. Алешкевич. – Москва: Физматлит, 2014. – 404 с.
20. Коноплин, Н. А. Физика: материалы контрольной работы для студентов направления подготовки «Строительство»: учебно-методическое пособие / Н. А. Коноплин, В. Л. Прищеп. – Москва: РГАУ - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. – 248 с.
21. Васильева, О. Н. Оптика. Сборник задач: учебное пособие / О. Н. Васильева, А. В. Быков, И. В. Митин, А. М. Салецкий. – Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022 – 378 с.
22. Иродов, И. Е. Задачи по общей физике: учебное пособие / И.Е. Иродов. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006 – 416 с.

Учебное издание

Ивахненко Наталья Николаевна

Бадекин Максим Юрьевич

ФИЗИКА

Раздел ОПТИКА

Учебно-методическое пособие

Корректор *Т.Н. Куклева*

Компьютерная верстка. Оригинал-макет – *А.С. Лаврова*

Обложка – *Н.В. Савшина*

Подписано в печать __. __. 2023г. Формат 60×84^{1/16}

Усл. печ. л. 10.0 Тираж 100 экз. зак.

Издательский дом «Edit»
283097, г. Донецк, ул. Кирова 90и
Тел. +7 (949) 332 76 35
e-mail: info@edit-dn.ru