

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тульский государственный педагогический университет  
им. Л. Н. Толстого»

# **ФИЗИКА**

## **ОПТИКА**

*Учебное пособие*

**В двух частях**

**Часть 2  
ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

Издание второе,  
переработанное и дополненное

Тула  
Издательство ТГПУ им. Л. Н. Толстого  
2013

ББК 22.34я73  
Ф48

*Рецензенты:*

доктор технических наук, профессор *Ю. П. Смирнов*  
(ТулГУ);

доктор физико-математических наук, профессор *В. А. Панин*  
(ТГПУ им. Л. Н. Толстого)

**Физика. Оптика:** Учеб. пособие: В 2 ч. Ч. 2. Волновая оптика /  
Ф48 Авт.-сост. А. В. Парамонов, Л. В. Никольская, И. А. Клепинина,  
А. В. Ермолов.— Изд. второе, перераб. и доп.— Тула: Изд-во Тул.  
гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого, 2013.— 109 с.

ISBN 978-5-87954-790-0 (ч. 2)  
ISBN 978-5-87954-788-7

Пособие содержит теоретический материал, освещающий основные вопросы волновой оптики (волновая природа света, интерференция, дифракция, дисперсия), и задачи, сопровождаемые подробным решением.

Издание предназначено студентам естественнонаучных специальностей университетов, для которых физика является профилирующим предметом.

**ББК 22.34я73**

ISBN 978-5-87954-790-0 (ч. 2)  
ISBN 978-5-87954-788-7

© Авторы-составители А. В. Парамонов,  
Л. В. Никольская, И. А. Клепинина,  
А. В. Ермолов, 2013

© ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

Глава I. Волновая оптика.....	4
§ 1. Интерференция света.....	4
1.1. Принцип Гюйгенса.....	4
1.2. Когерентность.....	5
1.3. Интерференция света.....	6
1.4. Методы наблюдения интерференции.....	8
1.5. Расчет интерференционной картины от двух щелей.....	10
1.6. Полосы равного наклона.....	11
1.7. Полосы равной толщины.....	14
1.8. Кольца Ньютона.....	15
1.9. Просветление оптики.....	16
1.10. Интерферометры.....	17
§ 2. Дифракция света.....	18
2.1. Принцип Гюйгенса-Френеля.....	18
2.2. Зоны Френеля.....	18
2.3. Дифракция в сходящихся лучах (Дифракция Френеля).....	20
2.4. Спираль Корню.....	22
2.5. Дифракция в параллельных лучах (Дифракция Фраунгофера).....	24
2.6. Дифракция Фраунгофера на дифракционной решетке.....	26
2.7. Дифракция на пространственной решетке.....	29
2.8. Разрешающая способность спектрального прибора.....	30
2.9. Разрешающая способность дифракционной решетки.....	31
§ 3. Голография.....	32
§ 4. Взаимодействие электромагнитных волн с веществом.....	35
4.1. Дисперсия света.....	35
4.2. Электронная теория дисперсии.....	37
Глава II. Решение задач.....	40
Литература.....	109

# ГЛАВА I. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## § 1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

### 1.1. Принцип Гюйгенса

Волновая теория света основывается на принципе Гюйгенса: каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени.

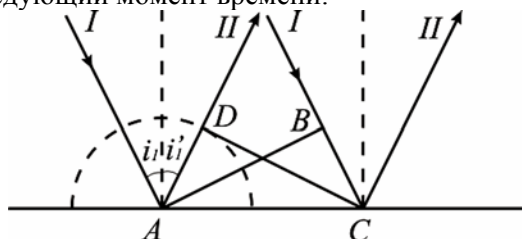


Рис. 1

Законы отражения и преломления света легко выводятся, используя принцип Гюйгенса.

Пусть на границу раздела двух сред падает плоская волна (плоскость волны –  $AB$ ) (рис. 1), распространяющаяся вдоль направления  $I$ . Пока фронт проходит расстояние  $BC$  (за время  $t$ ), фронт вторичных волн из точки  $A$  проходит расстояние  $AD$ .

При отражении:  $\angle ABC = \angle ADC$ , следовательно  $i_1' = i_1$ .

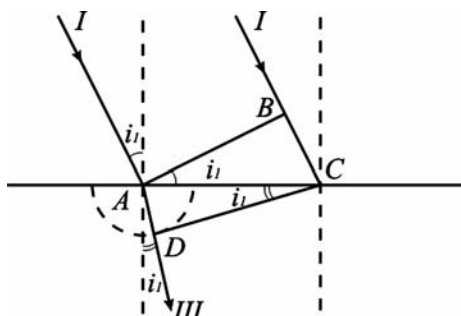


Рис. 2

При преломлении (рис.2): за время  $t$  фронт падающей волны проходит расстояние  $BC = v_1 t$ , а фронт преломленной –  $AD = v_1 t$ .

Из соотношения  $AC = \frac{BC}{\sin i_1} = \frac{AD}{\sin i_2}$  следует

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} n_{21}.$$

## 1.2. Когерентность

Когерентностью называется согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов.

Монохроматические волны – неограниченные в пространстве волны одной определенной и постоянной частоты – являются когерентными.

Так как реальные источники не дают строго монохроматического света, то волны, излучаемые любыми независимыми источниками света, всегда не когерентны. В источнике свет излучается атомами, каждый из которых испускает свет лишь в течение времени  $\approx 10^{-8}$  с. Только в течение этого времени волны, испускаемые атомом имеют постоянные амплитуду и фазу колебаний.

Немонохроматический свет можно представить в виде совокупности сменяющих друг друга коротких гармонических импульсов излучаемых атомами – волновых цугов.

Средняя продолжительность одного цуга  $\tau_{\text{ког}}$  называется временем когерентности.

Если волна распространяется в однородной среде, то фаза колебаний в определенной точке пространства сохраняется только в течение времени когерентности. За это время волна распространяется в вакууме на расстояние  $l_{\text{ког}} = c \cdot \tau_{\text{ког}}$ , называемое длиной когерентности (или длиной цуга). Поэтому наблюдение интерференции света возможно лишь при оптических разностях хода, меньших длины когерентности для используемого источника света.

Временная когерентность – это, определяемая степенью монохроматичности волн, когерентность колебаний, которые совер-

шаются в одной и той же точке пространства. Временная когерентность существует до тех пор, пока разброс фаз в волне в данной точке не достигнет  $\pi$ .

Длина когерентности – расстояние, на которое перемещается волна за время когерентности.

В плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучка волн, случайные изменения разности фаз между двумя точками увеличивается с увеличением расстояния между ними.

Пространственная когерентность – когерентность колебаний в один и тот же момент времени, но в разных точках такой плоскости – теряется, если разброс фаз в этих точках достигает  $\pi$ .

Длина пространственной когерентности (радиус когерентности):

$$r_{\text{ког}} \sim \frac{\lambda}{\Delta\varphi}.$$

Источники должны быть пространственно когерентными, чтобы возможно было наблюдать интерференцию излучаемых ими световых волн.

### 1.3. Интерференция света

Интерференция света – сложение в пространстве двух или нескольких когерентных световых волн, при котором в разных его точках получается устойчивое во времени усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.

Пусть в данной точке  $M$  две монохроматические волны с циклической частотой  $\omega$  возбуждают два колебания, причем до точки  $M$  одна волна прошла в среде с показателем преломления  $n_1$  путь  $s_1$  с фазовой скоростью  $v_1$ , а вторая – в среде  $n_2$  путь  $s_2$  с фазовой скоростью  $v_2$ :

$$x_1 = A_1 \cos \omega \left( t - \frac{s_1}{v_1} \right),$$

$$x_2 = A_2 \cos \omega \left( t - \frac{s_2}{v_2} \right).$$

Амплитуда результирующего колебания:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \delta.$$

Интенсивность результирующей волны ( $I \sim A^2$ ):

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \delta.$$

Разность фаз  $\delta$  колебаний, возбуждаемых в точке  $M$ , равна

$$\begin{aligned} \delta &= \omega \left( \frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \omega \left( \frac{s_2}{c/n_2} - \frac{s_1}{c/n_1} \right) = \\ &= \frac{\omega}{c} (s_2 n_2 - s_1 n_1) = \frac{2\pi\nu}{c} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta. \end{aligned}$$

(Использовали:  $v = \frac{c}{n}$ ;  $\omega = 2\pi\nu$ ;  $\frac{c}{v} = \lambda_0$  — длина волны

в вакууме).

Произведение геометрической длины пути  $s$  световой волны в данной среде на показатель преломления этой среды  $n$  называется оптической длиной пути  $L = s \cdot n$ .

Разность  $\Delta = L_2 - L_1 = s_2 n_2 - s_1 n_1$  оптических длин проходимых волнами путей называется оптической разностью хода.

Условие интерференционного максимума.

Если оптическая разность хода  $\Delta$  равна целому числу длин волн в вакууме (четному числу полуволен)

$$\Delta = \pm m \lambda_0 = \pm 2m \frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

то  $\delta = \pm 2m\pi$  и колебания, возбуждаемые в точке  $M$ , будут происходить в одинаковой фазе.

Условие интерференционного минимума.

Если оптическая разность хода  $\Delta$  равна нечетному числу полуволен

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

то  $\delta = \pm(2m+1)\pi$  и колебания, возбуждаемые в точке  $M$ , будут происходить в противофазе.

Когерентные пучки при их наложении на экране дают интерференционную картину, ширина которой называется полем интерференции.

#### 1.4. Методы наблюдения интерференции

До изобретения лазеров, во всех приборах когерентные световые пучки получали разделением волны, излучаемой одним источником, на две части, которые после прохождения разных оптических путей накладывали друг на друга и наблюдали интерференционную картину.

*1.4.1. Метод Юнга.* Свет от ярко освещенной щели  $S$  (рис. 3) падает на две щели  $S_1$  и  $S_2$ , играющие роль когерентных источников. Интерференционная картина  $BC$  наблюдается на экране  $\mathcal{E}$ .

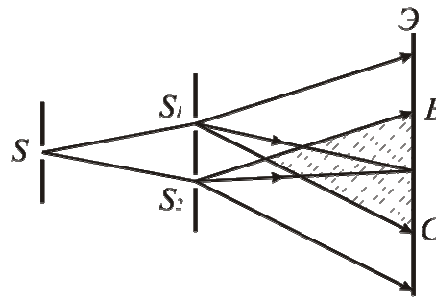


Рис. 3

*1.4.2. Зеркала Френеля.* Свет от источника  $S$  (рис.4) падает расходящимся пучком на два плоских зеркала  $A_1O$  и  $A_2O$ , расположенных под малым углом  $\varphi$ . Роль когерентных источников играют мнимые  $S_1$  и  $S_2$  изображения источника  $S$ . Интерференционная картина наблюдается на экране  $\mathcal{E}$ , защищенном от прямого попадания света заслонкой  $З$ .



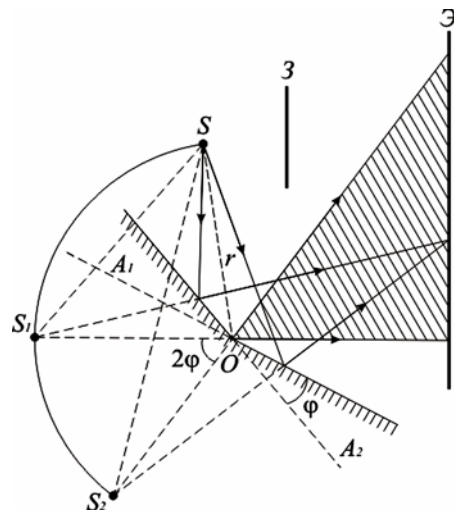


Рис. 4

Угол  $2\beta$  при вершине  $S$  между двумя лучами света, которые после отражения от зеркал  $A_1O$  и  $A_2O$ , сходящиеся в точке интерференционной картины, называется апертурой интерференции.

1.4.3 Бипризма Френеля. Свет от источника  $S$  (рис. 5) преломляется в призмах, в результате чего за бипризмой распространяются световые лучи, как бы исходящие из мнимых когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$ .

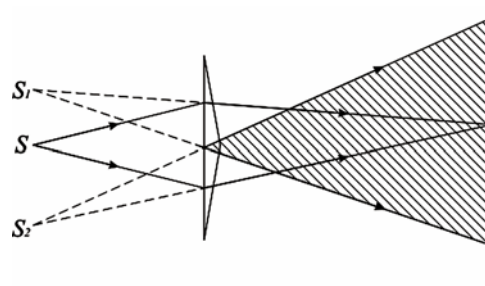


Рис. 5

1.4.4. Зеркало Ллойда. Точечный источник  $S$  (рис. 6) находится близко к поверхности плоского зеркала  $M$ . Когерентными источниками служат сам источник  $S$  и его мнимое изображение  $S_1$ .

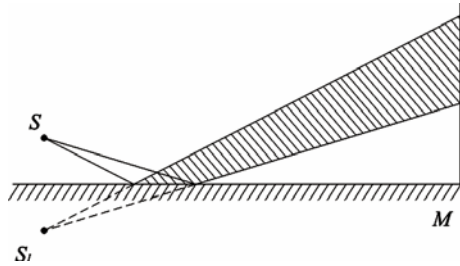


Рис. 6

### 1.5. Расчет интерференционной картины от двух щелей

Две щели  $S_1$  и  $S_2$  (рис.7) находятся на расстоянии  $d$  друг от друга и являются когерентными источниками. Экран  $\mathcal{E}$  параллелен щелям и находится от них на расстоянии  $l \gg d$ . Интенсивность в произвольной точке  $A$  определяется разностью хода  $\Delta = s_2 - s_1$ , где  $s_2^2 = l^2 + (x + d/2)^2$ ,  $s_1^2 = l^2 + (x - d/2)^2$ , откуда  $s_2^2 - s_1^2 = 2xd$  или  $\Delta = s_2 - s_1 = \frac{2xd}{s_1 + s_2}$ . Из  $l \gg d$  следует  $s_1 + s_2 \approx 2l$ , поэтому

$$\Delta = \frac{xd}{l}.$$

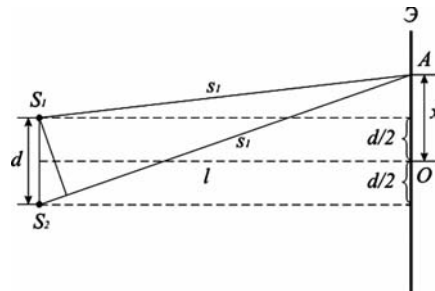


Рис. 7