

# ОБЩАЯ ФИЗИКА

## ОПТИКА

СПРАВОЧНЫЕ

МАТЕРИАЛЫ



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Мозырский государственный педагогический университет  
имени И. П. Шамякина»

## ОБЩАЯ ФИЗИКА. ОПТИКА

Справочные материалы

МГПУ им. И. П. Шамякина

Мозырь  
МГПУ им. И. П. Шамякина  
2017

УДК 535(076)  
ББК 22.34я73  
О-28

Составители:

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики и математики учреждения образования «Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина»

**Г. В. Кулак;**

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и математики учреждения образования «Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина»

**Т. В. Николаенко**

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры товароведения УО «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации»

*Г. С. Митюрин;*

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» УО «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого»

*П. А. Хило*

**Общая физика. Оптика** : справочные материалы / сост. Г. В. Кулак, О-28 Т. В. Николаенко. – Мозырь : МГПУ им. И. П. Шамякина, 2017. – 32 с. ISBN 978-985-477-631-6.

Материал разработан в соответствии с программой по общей физике и предназначен для организации научно-методической подготовки студентов специальностей: 1-31 04 08 03 Компьютерная физика. Компьютерное моделирование физических процессов, 1-08 01 01-05 Профессиональное обучение (строительство). Рекомендуется студентам дневной и заочной форм получения высшего образования.

**УДК 535(076)**  
**ББК 22.34я73**

**ISBN 978-985-477-631-6**

© Кулак Г. В., Николаенко Т. В.,  
составление, 2017

© УО МГПУ им. И. П. Шамякина, 2017

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
Свойства электромагнитных волн.....	5
Фотометрия .....	7
Оптические свойства линзы .....	9
Оптические устройства.....	10
Интерференция света .....	12
Многолучевая интерференция .....	15
Дифракция света.....	16
Дифракционная решётка .....	18
Поляризация оптических волн в кристаллах и изотропных телах .....	19
Дисперсия света.....	20
Интенсивность излучения нагретых тел.....	21
Фотоэлектрический эффект .....	22
Полуклассическая модель атома Резерфорда – Бора .....	23
Оптика движущихся сред.....	25
Преобразования Галилея и Лоренца .....	26
Список рекомендуемой литературы.....	27
Перечень вопросов для подготовки к экзамену по оптике .....	28
Предметный указатель.....	31

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Общая физика» играет большую роль в жизни современного общества при формировании социально значимых ориентаций человека, обеспечивая гармонизацию отношений человека с окружающим миром.

Важное место при изучении курса общей физики отводится формированию у студентов навыков, необходимых для решения физических задач.

Раздел «Оптика» дисциплины «Общая физика» изучается после изучения раздела «Электричество и магнетизм», поэтому вначале изучается волновая оптика на основе уравнений Максвелла. Это позволяет студентам воспроизвести основные характеристики волновых и колебательных процессов, а затем перейти к осознанному изучению волновой оптики. Далее изучается квантовая оптика. Изучение данного раздела физики, как и физики в целом, должно способствовать формированию у студентов естественнонаучной картины мира и изучению более специальных современных физических дисциплин.

Целью раздела «Оптика» является изучение многочисленных оптических явлений, возникающих при взаимодействии света с веществом, выявление фундаментальных свойств волновых и квантовых особенностей проявления света, установление связей между различными разделами физики. В результате изучения дисциплины студенты должны знать:

- основные термины, понятия, процессы, явления и закономерности изучаемого раздела физики;
- понимать смысл оптических понятий и явлений, основных законов и положений, геометрической, волновой и квантовой оптики;
- роль оптики в развитии современной техники и технологии производственных процессов;
- единицы измерения и размерности физических величин, появляющихся в разделе «Оптика».

Реализации поставленной цели могут послужить разработанные справочные материалы «Общая физика. Оптика», которые содержат основные теоретические сведения по разделу «Оптика», включающие определения физических величин, единицы их измерения, основные законы оптики, физические формулы, являющиеся математическим выражением физических закономерностей. Для лучшего восприятия и запоминания материала выводы всех законов и закономерностей проиллюстрированы соответствующими рисунками. Для эффективной реализации самостоятельной работы студентов по подготовке к занятиям по разделу «Оптика» представлен список рекомендуемой литературы.

## СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Основные положения теории электромагнитных волн Дж. Максвелла:

1. Переменное вихревое электрическое поле порождает переменное вихревое магнитное поле, силовые линии которого наматываются на силовые линии электрического поля (закон Ампера).

2. Переменное вихревое магнитное поле порождает переменное вихревое электрическое поле, силовые линии которого наматываются на силовые линии магнитного поля (закон Фарадея).

3. Источником электрического поля является электрический заряд (закон Кулона).

4. В природе отсутствуют магнитные заряды, то есть источником магнитного поля является движущийся электрический заряд (электрический ток).

Волновые уравнения для процесса распространения электромагнитной волны:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2},$$

Простейшим и важнейшим решением волновых уравнений являются периодические функции типа  $\cos \phi$  или  $\sin \phi$ , где  $\phi$  – фаза волны, то есть

$$E = E_m \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{v} \right) \right], \quad H = H_m \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{v} \right) \right]$$

где  $v = 1/\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}$  – фазовая скорость распространения электромагнитной волны;

$E_m$  и  $H_m$  – амплитуды электромагнитной волны.

Основные величины, характеризующие световую волну, то есть

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu} = \frac{2\pi v}{\omega},$$

где  $\lambda$  – длина световой волны;

$T$  – период световой волны;

$k = \frac{\omega}{v}$  – волновое число электромагнитной волны.

Очевидны соотношения между ними вида:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad \lambda = \frac{2\pi}{k}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

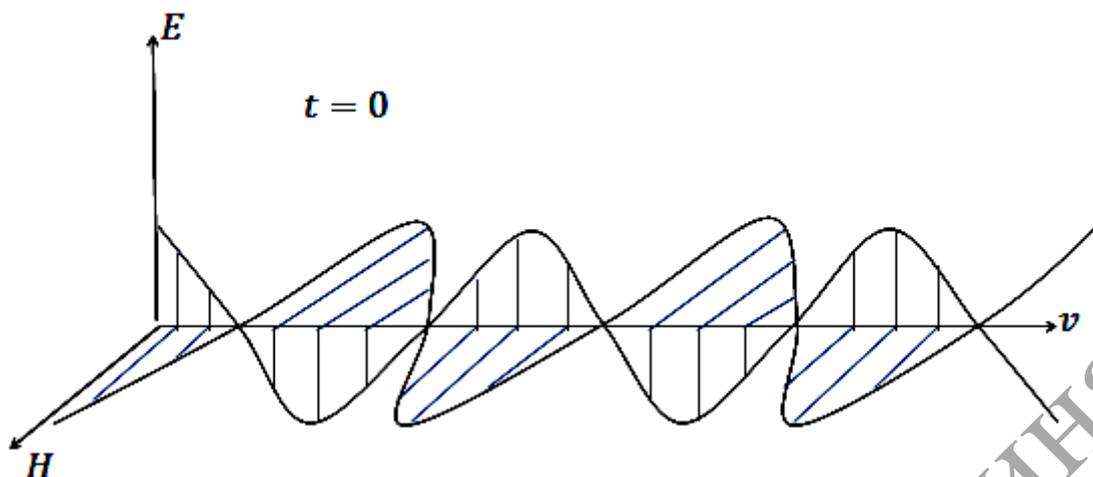


Рисунок 1. – Схематическое расположение векторов  $E$ ,  $H$  и  $v$

Уравнение непрерывности для электромагнитного излучения имеет вид:

$$\frac{dW_{эм}}{dt} = -\frac{dS}{dz},$$

где

$$W_{эм} = W_э + W_м = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E_m^2 + \frac{1}{2} \mu \mu_0 H_m^2, S = EH.$$

Интенсивность электромагнитной волны:

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0}{\mu \mu_0}} E_m^2.$$

**Уравнения Максвелла:**

$$\text{rot} \vec{H} \equiv [\vec{\nabla} \vec{H}] = \epsilon \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} + \vec{j} \quad (\text{закон Ампера}),$$

$$\text{rot} \vec{E} \equiv [\vec{\nabla} \vec{E}] = -\mu \mu_0 \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{закон Фарадея}),$$

$$\text{div} \vec{D} \equiv [\vec{\nabla} \vec{D}] = \rho = \frac{q}{v} \quad (\text{закон Кулона}),$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad - \text{отсутствие магнитных зарядов.}$$

## ФОТОМЕТРИЯ

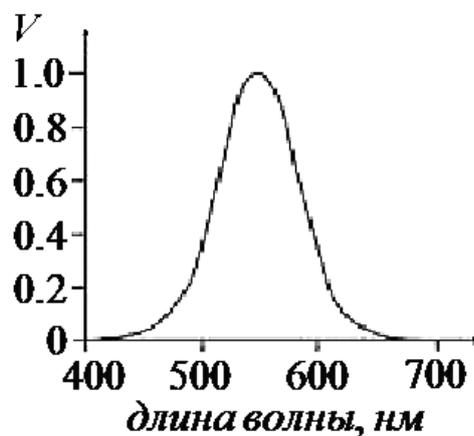


Рисунок 2. – Кривая «видности» или относительной спектральной чувствительности

Световой поток, вызывающий одинаковые зрительные ощущения для различных длин волн, удовлетворяет соотношению

$$d\Phi = V(\lambda_1)d\Phi_{\text{э}}(\lambda_1) = V(\lambda_2)d\Phi_{\text{э}}(\lambda_2) = \dots \quad [\Phi] = \text{лм (люмен)}$$

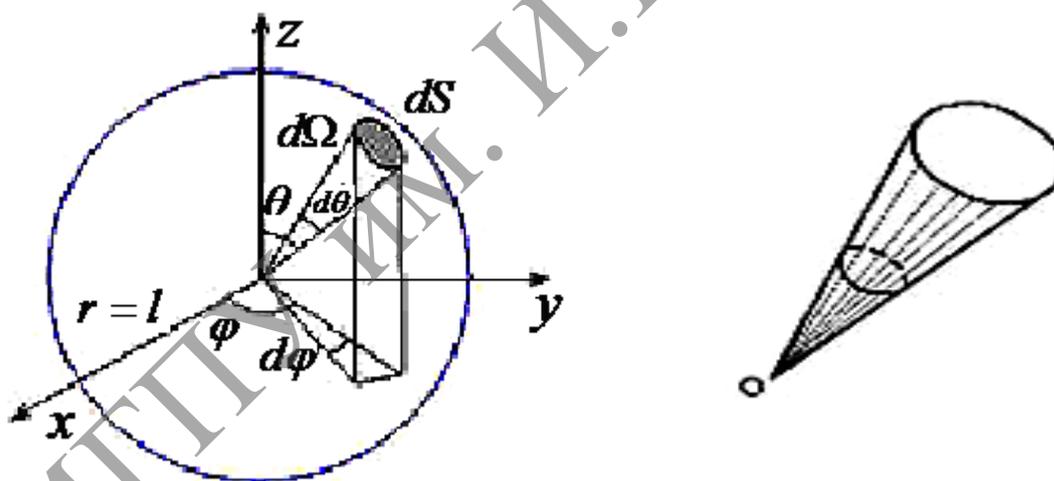


Рисунок 3. – Схема вычисления телесного угла

Если расстояние от точечного источника до центра площадки равно  $r$ , а угол между центральным лучом и нормалью  $\vec{n}$  к площадке  $\alpha$ , то телесный угол равен:

$$d\Omega = \frac{dS \cos \alpha}{r^2}, \quad [\Omega] = \text{ср.}$$

$$\Omega_{\text{полн}} = \frac{S}{r^2} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ – полный телесный угол.}$$

$$\text{Сила света: } I = \frac{d\Phi}{d\Omega}, [I] = \text{кд}.$$

$$\text{Освещенность: } E = \frac{d\Phi}{dS}, [E] = \text{лк}.$$

Связь освещённости и силы света точечного источника:

$$d\Phi = Id\Omega = I \frac{dS \cos \alpha}{r^2}, E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}.$$

$$\text{Светимость: } R = \frac{d\Phi_{\text{исп}}}{dS}, [R] = \frac{\text{лм}}{\text{м}^2}.$$

$$\text{Яркость: } B = \frac{I}{\Delta S \cos \Theta}, [B] = \frac{\text{кд}}{\text{м}^2}.$$

Светимость прямо пропорциональна яркости ламбертовского источника

$$R = B \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \Theta \cos \Theta d\Theta = \pi B.$$

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИНЗЫ

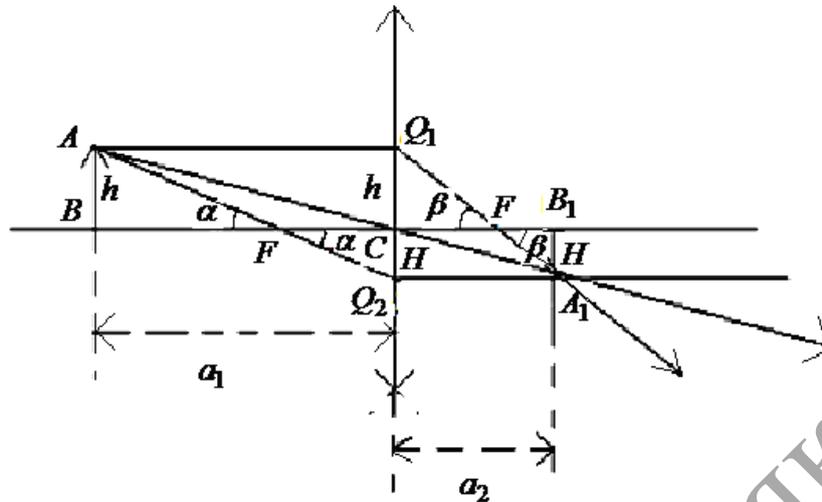


Рисунок 4. – Построение изображений в тонкой линзе

Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \left(\frac{n}{n_0} - 1\right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \quad \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f},$$

где  $a_1$  – положение предмета;

$a_2$  – положение изображения;

$R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны сферических поверхностей;

$n_0$  – показатель преломления окружающей линзу среды;

$n$  – показатель преломления материала линзы;

$f$  – фокусное расстояние линзы.

Оптическая сила линзы:  $D = \frac{1}{f}$ ,  $[D] = \frac{1}{[f]} = \frac{1}{м} = \text{дптр}$ .

Увеличением линзы:  $\Gamma_l = \frac{H}{h}$ ,

где  $H$  – размер изображения;

$h$  – размер предмета.

Правило знаков при использовании формулы тонкой линзы:

- 1)  $a_1 > 0$ ,  $a_2 > 0$  – если изображение действительное;
- 2)  $a_1 > 0$ ,  $a_2 < 0$  – если изображение мнимое;
- 3)  $R_{1,2} > 0$  – если сферическая поверхность выпуклая,  
 $R_{1,2} < 0$  – если сферическая поверхность вогнутая;
- 4) для плоских поверхностей  $R_{1,2} \rightarrow \infty$ .

ОПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

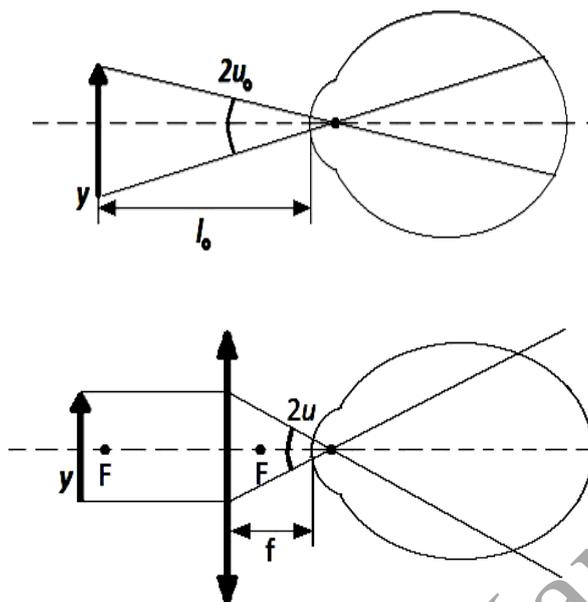


Рисунок 5. – Схематическое представление хода лучей в лупе

Увеличение лупы:

$$\Gamma_{\text{лупы}} = \frac{2u}{2u_0} = \frac{l_0}{f},$$

где  $l_0 = 25 \text{ см}$  – расстояние наилучшего зрения для нормального глаза;  
 $f$  – фокусное расстояние лупы.

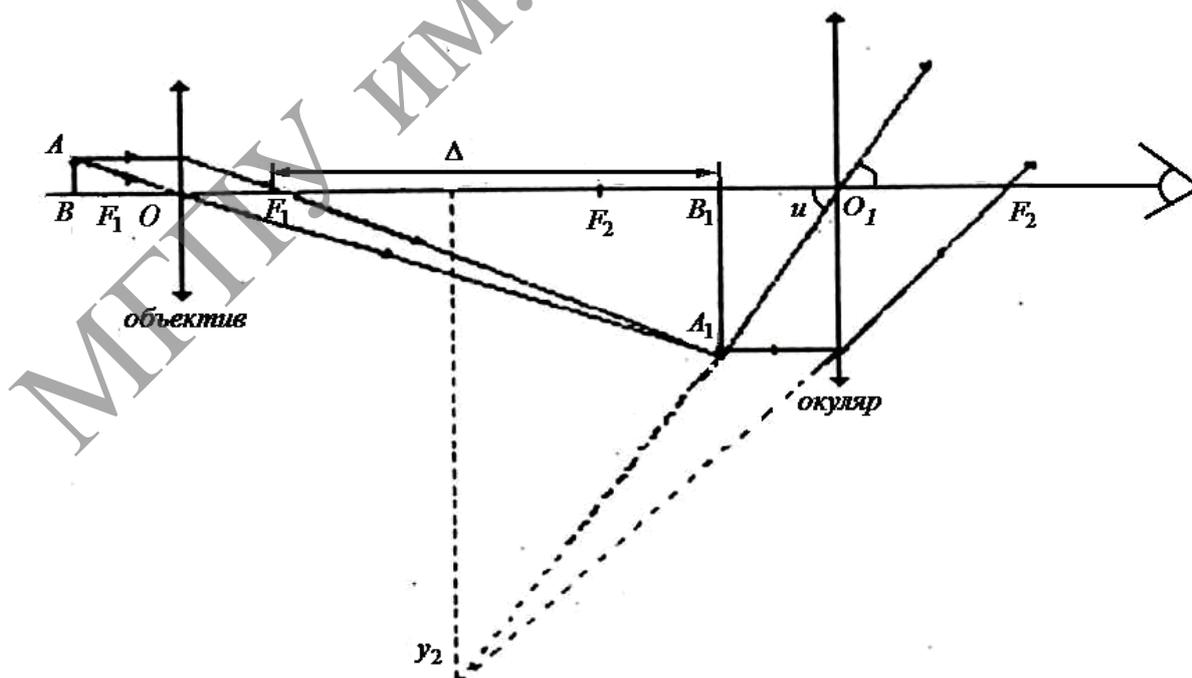


Рисунок 6. – Ход лучей в микроскопе

Увеличение микроскопа

$$\Gamma_M = \frac{u}{u_0} = \frac{l_0 \Delta}{f_{ок} f_{об}},$$

где  $f_{об}$  – фокусное расстояние объектива;  
 $f_{ок}$  – фокусное расстояние окуляра;  
 $\Delta \gg f_{ок}, f_{об}$  – оптический интервал.

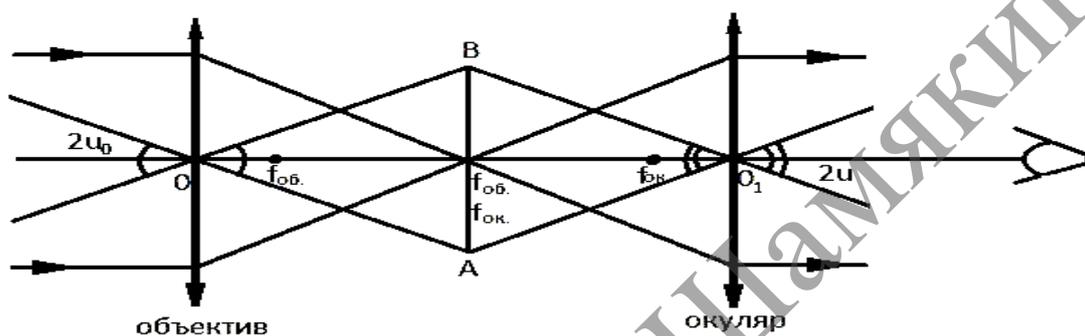
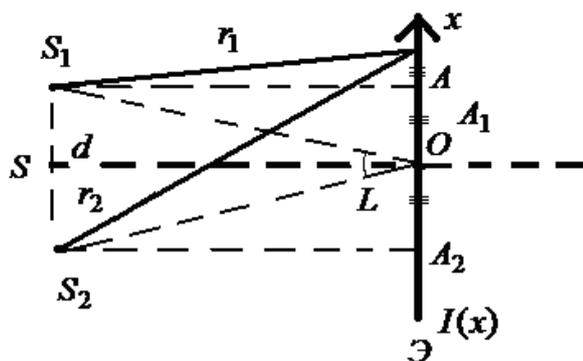


Рисунок 7. – Схема хода лучей в телескопе

Увеличение телескопа:

$$\Gamma_T = \frac{2u}{2u_0} = \frac{f_{об}}{f_{ок}}, \frac{D_{об}}{f_{об}} = \frac{D_{ок}}{f_{ок}}; \frac{f_{об}}{f_{ок}} = \frac{D_{об}}{D_{ок}}, \Gamma_T = \frac{D_{об}}{D_{ок}} > 1.$$

## ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА



$$|S_1S_2| = d, |SO| = D, |OA| = x, r_{1,2} = |S_{1,2}A|$$

Рисунок 8. – Схема опыта по наблюдению интерференции света

Оптической разностью хода двух волн называется величина  $\Delta S = n(r_2 - r_1)$ .

1) Условие интерференционного максимума:

Геометрическая разность хода кратна четному числу полуволин:

$$\Delta r = m\lambda = 2m \frac{\lambda}{2}.$$

2) Условие интерференционного минимума:

Геометрическая разность хода кратна нечетному числу полуволин

$$\Delta r = \lambda \left(m + \frac{1}{2}\right) = \frac{\lambda}{2} (2m + 1).$$

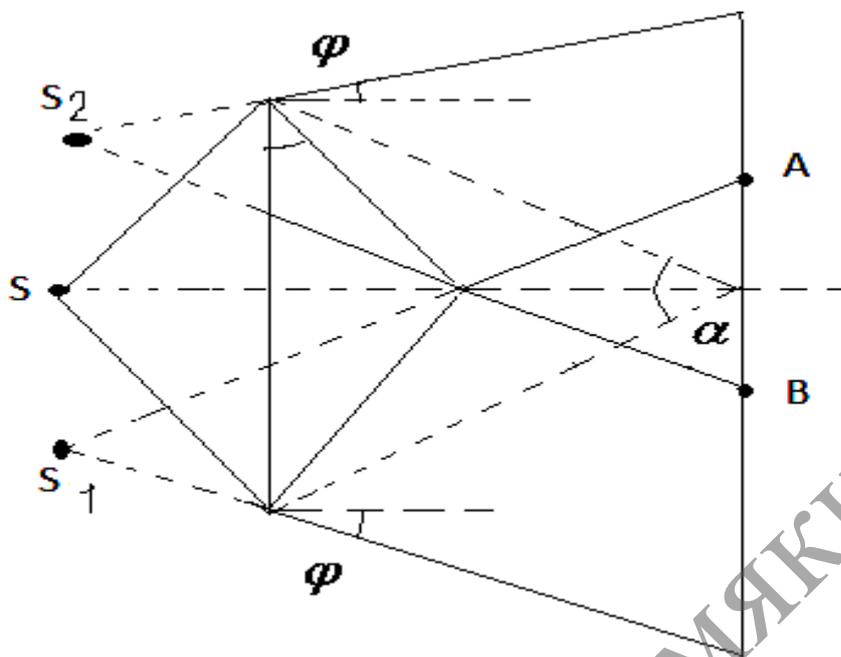
## Интерференционный опыт Френеля с бипризмой

Расстояние между интерференционными полосами

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\alpha} = \frac{\lambda(a+b)}{2a(n-1)\theta}.$$

Число интерференционных полос в области пересечения световых пучков от мнимых источников  $S_1$  и  $S_2$ :

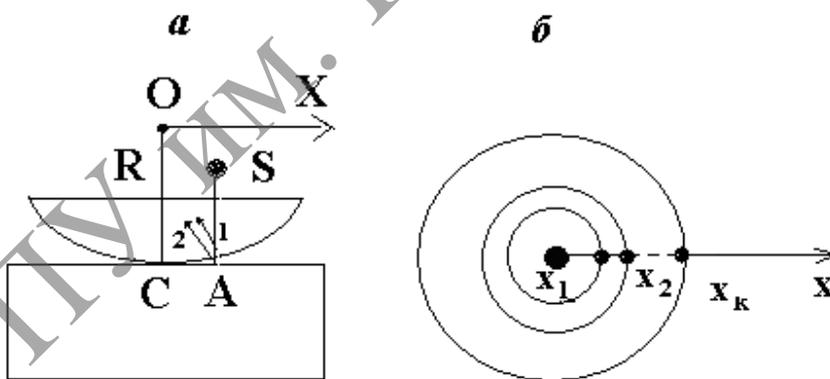
$$N = \frac{|AB|}{\Delta x} = \frac{2b(n-1)\theta}{\Delta x}.$$



AB – область интерференции, S – действительный источник,  
 $S_{1,2}$  – мнимые источники

Рисунок 9. – Схема интерференционного опыта «бипризма Френеля»

### Интерференционный опыт Ньютона



а – элементы схемы ( $S$  – источник,  $R$  – радиус кривизны сферической поверхности, ( $x = |CA|$ ) – расстояние до точки А падения луча),

б – кольца Ньютона и их радиусы

Рисунок 10. – Схема опыта Ньютона по интерференции света

1. Радиусы светлых колец определяются из условия максимума интерференции:

$$\Delta r = \frac{x^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = 2m\left(\frac{\lambda}{2}\right), x_m = \sqrt{\frac{\lambda R}{2}(2m-1)}, m=1,2,3,\dots$$

2. Радиусы тёмных колец определяются из условия минимума интерференции:

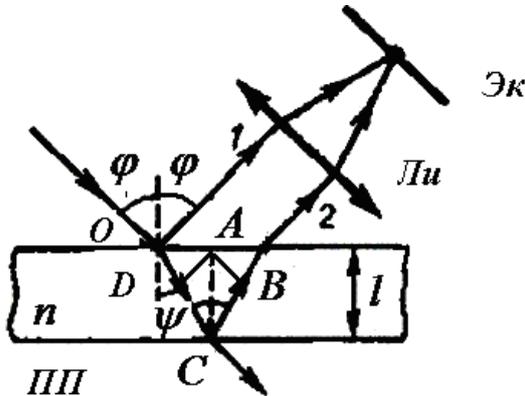
$$\Delta r = \frac{x^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = (2m+1)\frac{\lambda}{2} = m\lambda + \frac{\lambda}{2}, x_m = \sqrt{Rm\lambda}, m=0,1,2,3,\dots$$

В центре интерференционной картины колец Ньютона в отражённом свете наблюдается тёмное пятно ( $x_0 = 0$ ).

При наблюдении интерференции света для колец Ньютона в проходящем свете условия минимума и максимума интерференции меняются местами, то есть светлое кольцо заменяется на тёмное и, наоборот, тёмное на светлое.

## МНОГОЛУЧЕВАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Разность хода:



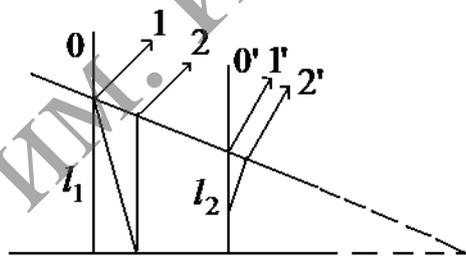
$\triangle ABC$  и  $\triangle ACD$  – являются  
прямоугольными;  $|AC| = l$ ,  
ПП – плоскопараллельная пластинка,  
Л<sub>и</sub> – линза, Эк – экран  
**Рисунок 11. – Схема опыта  
по многолучевой интерференции  
в плоскопараллельной пластинке**

$\Delta r' = |BC| + |CD| = 2|BC| = 2l \cos \psi$ ,  
где  $l$  – толщина пластинки;  
 $\psi$  – угол преломления луча на  
верхней грани пластинки.

Разность хода  $\Delta r$  с учетом  
сдвига фаз на  $\pi$  при отражении в  
точке О дается соотношением:

$$\Delta r = 2l \cos \psi - \frac{\lambda}{2}.$$

Угол преломления  $\psi$   
определяется из закона Снеллиуса:  
 $n_0 \sin \phi = n \sin \psi$ , где  $n_0$  – показатель  
преломления окружающей пластинку  
среды,  $n$  – показатель преломления  
материала пластинки



**Рисунок 12. – Схема опыта по многолучевой интерференции  
на «клине». Полосы равной толщины**

Разности хода лучей (1, 2) и (1', 2') удовлетворяют соотношениям:

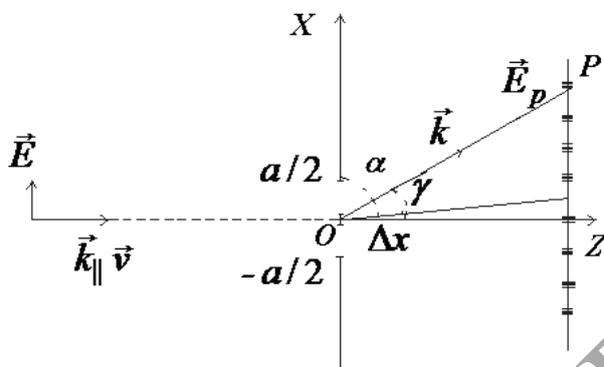
$$\Delta r_{1,2} = 2l_{1,2} - \frac{\lambda}{2},$$

где  $l_{1,2}$  – толщина пластинки в различных местах клина.

## ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

В основе теории дифракции лежат несколько основных положений:

1. Каждая точка следа, до которой дошло волновое возмущение, является источником вторичных волн (принцип Гюйгенса).
2. Вторичные световые волны интерферируют между собой с учетом их фаз и амплитуд. Учет фаз, амплитуд и поляризации позволяет рассчитать дифракционное поле за препятствием определенной формы.
3. Амплитуды дифрагированных волн стремятся к нулю при стремлении расстояния от источника к бесконечности ( $r \rightarrow \infty$ ).



Условие минимума при дифракции на узкой щели и тонкой нити:

$$a \sin \varphi_m = \lambda m,$$

где  $a$  — ширина щели, или толщина нити;  
 $\lambda$  — длина волны;  
 $\varphi_m$  — угол дифракции.

Приближенно угловое расположение максимума при дифракции на узкой щели и тонкой нити может быть найдено как среднее арифметическое от углов соседних дифракционных минимумов.

$$E = E_0 \exp i(\omega t - kz),$$

$$k_x = k \cos \alpha = k \sin \varphi, k_z = k \cos \varphi, \gamma = \varphi$$

Рисунок 13. – Дифракция плоской световой волны на узкой щели

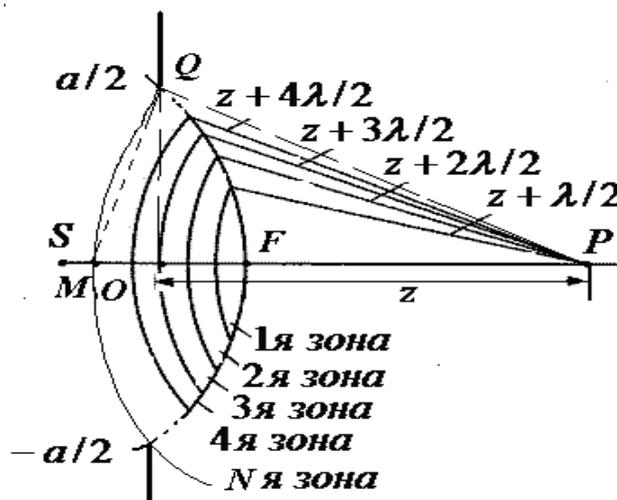


Рисунок 14. – Метод зон Френеля ( $|SO|=z_0$ ,  $|PO|=z$ ,  $|OQ|=R_N$ )

Радиус зоны Френеля и число зон Френеля, которые наблюдаются из точки  $P$ , находится из соотношений:

$$R_N = \sqrt{\lambda N \frac{zz_0}{(z+z_0)}}, \quad N = \frac{|MF|}{\lambda/2} = \frac{a^2}{4\lambda} \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{z_0} \right),$$

где  $N=1, 2, 3, \dots$  – номер зоны.

МГТУ им. И.П.Шамякина

## ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЁТКА

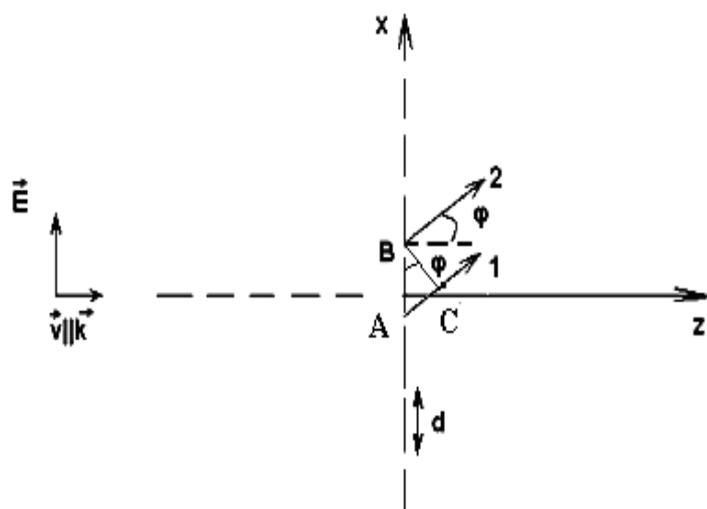


Рисунок 15. – Схема дифракции света на пропускающей дифракционной решетке

Период дифракционной решётки ( $d$ ) – это расстояние, охватываемое затемненной и свободной областью решётки, то есть  $d=a+b$ .

Разность хода волн, идущих от соседних щелей (в пределах периода решётки) определяется соотношением:

$$\Delta r = |AC| = d \sin \varphi.$$

Разность фаз этих волн  $\Delta \phi = k \Delta r$ .

Формула дифракционной решётки:

$$d \sin \varphi_m = \lambda m.$$

Направления на дифракционные минимумы находим из соотношения:

$$d \sin \varphi_{mp} = \left(m + \frac{p}{N}\right) \lambda,$$

где  $p=1, 2, \dots, N-1$ .

Ширина спектра, который может быть наблюдаем без наложения соседних спектров с помощью дифракционной решетки, дается соотношением:

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda}{m}.$$

Разрешающая способность дифракционной решетки дается соотношением:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = mN.$$

Разрешающая способность дифракционной решетки определяется полным числом штрихов решетки и порядком дифракционного максимума.

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В КРИСТАЛЛАХ И ИЗОТРОПНЫХ ТЕЛАХ

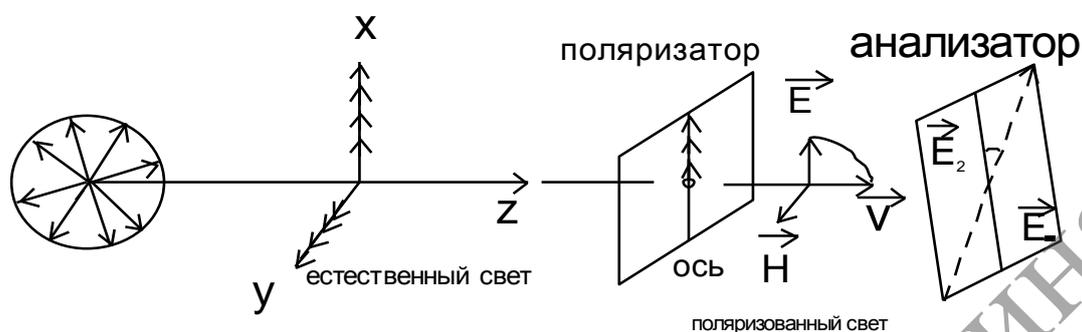


Рисунок 16. – Схема получения поляризованного света

Вывод закона Малюса

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0, \quad I_2 = I_1 \cos^2 \alpha.$$

Закон Малюса для естественного света

$$I_2 = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha.$$

Степенью поляризации света  $P$  называется величина, определяемая соотношением:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\max}$  – максимальная интенсивность света при вращении поляризатора, плоскость которого перпендикулярна оптическому лучу;

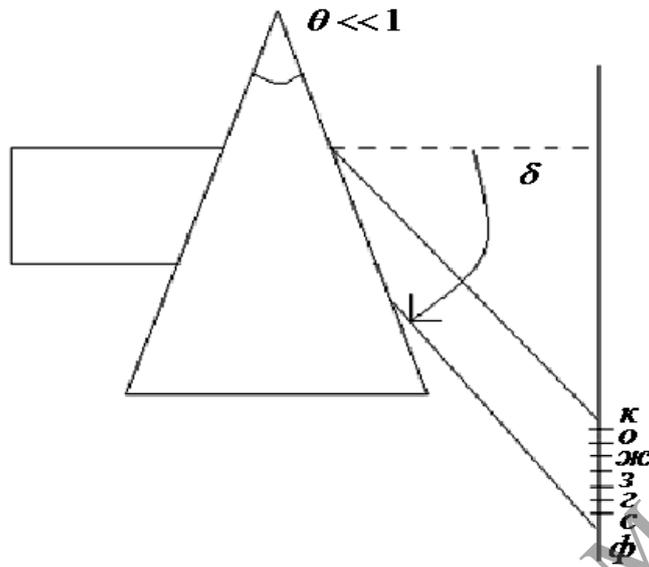
$I_{\min}$  – минимальная интенсивность света.

Для естественного света  $I_{\max} = I_{\min}$ , следовательно, степень поляризации  $P=0$ .

Для полностью поляризованного света:  $I_{\max} = 0$  и  $I_{\min} \neq 0$ ,  $P=-1$ ; если  $I_{\max} \neq 0$ ,  $I_{\min} = 0$ , то  $P=1$ .

Для частично поляризованного света  $I_{\max} \neq I_{\min}$ , поэтому  $P < 1$ .

## ДИСПЕРСИЯ СВЕТА



$\theta$  – преломляющий угол призмы,  $\delta$  – отклоняющий угол призмы  
 Рисунок 17. – Схема разложения пучка «белого» света в спектр

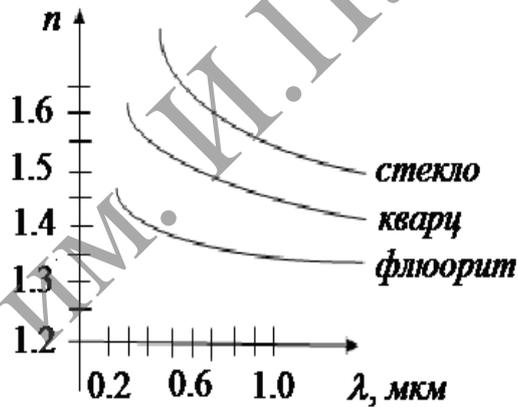


Рисунок 18. – Зависимости показателей преломления от длины волны света для стекла, кварца и флюорита

Закон Бугера, дающий интенсивность света на выходной грани вещества  $z=h$ , то есть

$$I(h) = I_0 e^{-\alpha h},$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего света;  
 $\alpha$  – коэффициент поглощения света.

## ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ НАГРЕТЫХ ТЕЛ

Закон Стефана – Больцмана

$$I = \int_0^{\infty} \frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2} \frac{1}{\frac{\hbar\omega}{e^{k_B T}} - 1} d\omega = \sigma T^4,$$

где  $\sigma = \frac{\pi^2 k_B^4}{60c^3 \hbar^3} \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 К^4}$ .

Закон смещения Вина для излучения абсолютно черного тела:

$$\frac{\omega_m}{T} = b' = \frac{k_B \cdot 4,96}{\hbar} = 6,52 \cdot 10^{11} \frac{Гц}{К}.$$

Интенсивность излучения «серого» тела с поглотительной способностью  $a_{\omega, T}$ , слабо зависящей от частоты света  $\omega$ , дается соотношением:

$$I \approx a_{\omega, T} \sigma T^4.$$

Полная внутренняя энергия одного моля вещества:

$$U_{\mu} = 3N_A W_{oc} = \frac{3N_A \hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{k_B T}} - 1}.$$

При низких температурах  $(\hbar\omega/k_B T) \ll 1$ , получаем:

$$U_{\mu} \approx 3N_A \hbar\omega e^{-\frac{\hbar\omega}{k_B T}}.$$

Молярную теплоемкость при низких температурах находим из соотношения:

$$C_{V\mu} = \left( \frac{\partial U_{\mu}}{\partial T} \right)_V = 3N_A k_B \left( \frac{\hbar\omega}{k_B T} \right)^2 e^{-\frac{\hbar\omega}{k_B T}}.$$

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

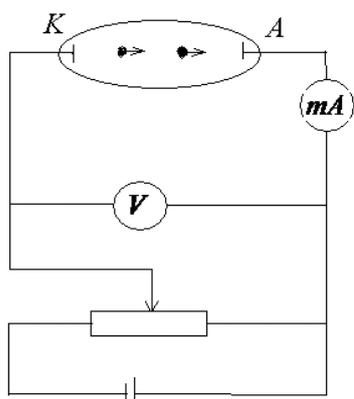
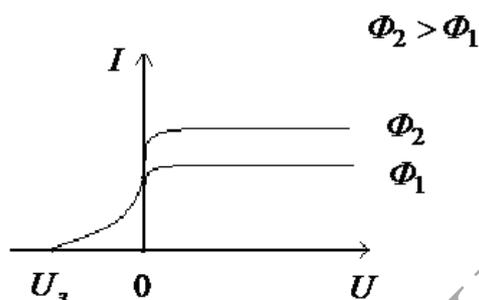


Рисунок 19. – Схема опыта по наблюдению фотоэффекта

Первый закон фотоэффекта:  
– причиной возникновения фототока в анодной цепи являются электроны, вырванные из поверхности металла; величина тока насыщения определяется величиной светового потока  $\Phi_0$ , упавшего на поверхность металла

$$\Phi_0 \sim I = \frac{N_{кв} \hbar \omega}{St},$$

где  $N_{кв}$  – число квантов, достигших катода;  
 $S$  – эффективная площадь катода;  
 $t$  – время облучения светом;  
 $I$  – интенсивность излучения.



$U_3$  – запирающее напряжение  
Рисунок 20. – Вольт-амперная характеристика фотоэлемента

Второй закон фотоэффекта:  
– скорость фотоэлектронов не зависит от величины светового потока, а определяется лишь частотой падающего света  $\omega$ .

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$\hbar \omega = A + \frac{m v^2}{2},$$

где  $A$  – работа выхода электрона из поверхности металла;  
 $m$  – масса фотоэлектрона;  
 $v$  – скорость фотоэлектрона.

Максимальную скорость фотоэлектронов можно определить, измеряя напряжение запираения  $U_3$  фотоэлемента. Запирающее обратное напряжение вычисляется по формуле

$$\frac{m v_{\max}^2}{2} = e U_3,$$

тогда максимальная скорость фотоэлектронов  $v_{\max} = \sqrt{2eU_3/m}$ .

## ПОЛУКЛАССИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА – БОРА

Первое положение в теории Бора: момент импульса вращающегося электрона кратен целому числу постоянных Планка, то есть

$$M = m\upsilon R = n\hbar,$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ .

Второе положение: центробежная сила инерции уравновешивается силой кулоновского притяжения электрона к ядру, то есть

$$\frac{m\upsilon^2}{R} = \frac{e^2 Z}{4\pi\epsilon_0 R^2},$$

где  $Z$  – зарядовое число.

Третье положение: полная энергия электрона складывается из его кинетической и потенциальной энергии, то есть

$$W = \frac{m\upsilon^2}{2} - \frac{e^2 Z}{4\pi\epsilon_0 R} = -\frac{e^2 Z}{8\pi\epsilon_0 R}.$$

Радиус орбиты

$$R_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2 Z} n^2,$$

то есть  $R_n \sim n^2$ .

Скорость электрона на орбите:

$$\upsilon_n = \frac{e^2 Z}{4\pi\epsilon_0 \hbar n},$$

Энергия электрона на каждой из боровских орбит

$$W_n = -\frac{me^4 Z^2}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 n^2}.$$

Бор сформулировал постулаты, которые показывают особенности излучения и поглощения света атомом вещества:

1. Электрон в атоме движется на стационарных орбитах, энергия на которых остается неизменной. При этом атом не излучает и не поглощает энергии в виде излучения.

2. Атом излучает или поглощает свет при переходе на другую стационарную орбиту. При этом частота излучения определяется из соотношения:

$$\hbar\omega_{nn'} = (W_n - W_{n'}).$$

Частота  $\omega_{nn'}$  и длина волны  $\lambda_{nn'}$  излучения атома:

$$\omega_{nn'} = \frac{me^4 Z^2}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^3} \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

$$\omega_{nn'} = \frac{2\pi c}{\lambda_{nn'}},$$

$$\frac{c}{\lambda_{nn'}} = \frac{me^4 Z^2 c}{64\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3} \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = cZ^2 R' \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

$$R' = \frac{me^4}{64\pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3 c},$$

$$\frac{1}{\lambda_{nn'}} = Z^2 R' \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $R' = 1,09 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга.

На основании выше предложенной формулы можно определить различные спектральные серии, открытые ранее экспериментально.

1. Серия Лаймана:  $n' = 1, n = 2, 3, 4, \dots$   
 $\lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \dots$  (Ультрафиолетовый свет).
2. Серия Бальмера:  $n' = 2, n = 3, 4, 5, \dots$   
 $\lambda_{32}, \lambda_{42}, \lambda_{52}, \lambda_{62}, \dots$  (Видимый свет).
3. Серия Пашета:  $n' = 3, n = 4, 5, 6, \dots$   
 $\lambda_{43}, \dots$  (Ближний ИК диапазон).
4. Серия Брекета:  
 $\lambda_{54}, \dots$  (Средний ИК диапазон)
5. Серия Пфунда:  
 $\lambda_{65}, \dots$  (Дальний ИК диапазон).

ОПТИКА ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД

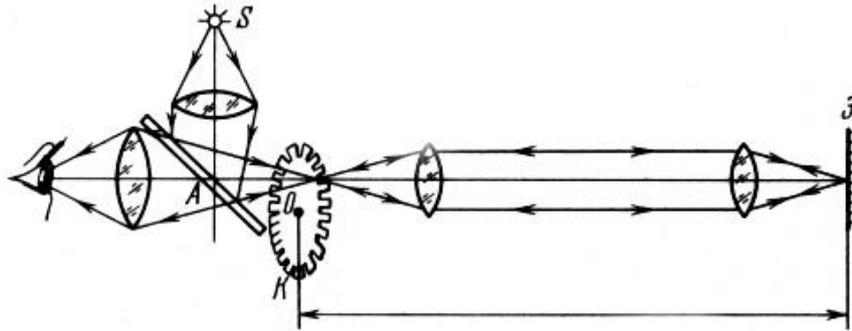


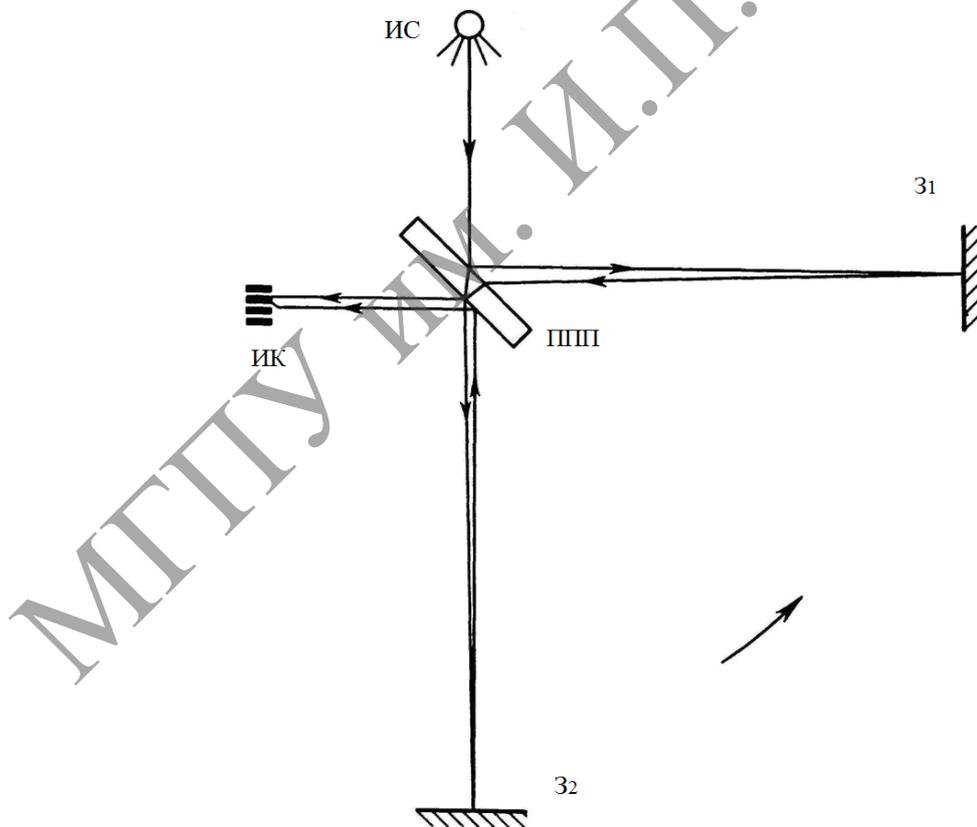
Рисунок 21. – Схема опыта Физо с зубчатым колесом

Скорость света, измеренная на опыте:

$$c = 4nvl,$$

где  $\nu$  – собственная частота вращения колеса.

В опыте Физо при расстоянии между зеркалами  $l=32$  км скорость света оказалась равной:  $c = 2998500 \pm 50$  км/с.



ИС – источник света, ППП – полупрозрачная пластинка,  $Z_{1,2}$  – зеркала,  
ИК – интерференционная картина

Рисунок 22. – Схема опыта Майкельсона – Морли

---

---

## ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАЛИЛЕЯ И ЛОРЕНЦА

Опыт Майкельсона – Морли позволил пересмотреть существующие на тот период теории по объяснению особенностей распространения света по отношению к движущимся телам, а также пересмотреть преобразования Галилея, связывающие пространственные и временные характеристики движения тел. Лоренц предложил пространственно-временные преобразования, которые явились обобщением преобразований Галилея и объясняют постоянство скорости света в различных инерциальных системах отсчета.

Преобразования Галилея имеют вид:

$$\begin{aligned}y &= y' \\z &= z' \\x &= x' + vt \\v_y &= v_{y'} \\v_z &= v_{z'} \\t &= t' \\v_x &= v_{x'} + v\end{aligned}$$

Преобразования Лоренца имеют вид:

$$\begin{aligned}y &= y' \\z &= z' \\x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\v_y &= v_{y'} \\v_z &= v_{z'} \\t &= \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\v_x &= \frac{v_{x'} + v}{1 + \frac{vv_{x'}}{c^2}}\end{aligned}$$

В соответствии с преобразованиями Галилея, если  $v_{x'} = c$ , то  $v_x = c + v_{x'}$ . Этому случаю соответствовал бы «положительный» результат опыта Майкельсона. Из преобразований Лоренца следует, что при  $v_{x'} = c$ ,  $v_x = c$ . При этом эфир отсутствует и это соответствует имеющим место отрицательным результатам опыта Майкельсона – Морли (по обнаружению эфира).

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лансберг, Г. С. Оптика / Г. С. Лансберг. – М. : Наука, 1976. – 926 с.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Оптика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1980. – 751 с.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие : в 3 т. / И. В. Савельев. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – Т. 2 : Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 406 с.
4. Ярив, А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – М. : Мир, 1987. – 616 с.
5. Королев, Ф. А. Курс физики. Оптика. Атомная и ядерная физика / Ф. А. Королев. – М. : Просвещение, 1974. – 608 с.
6. Руссо, М. Задачи по оптике / М. Руссо, Ж. П. Матье. – М. : Мир, 1976. – 414 с.
7. Климантович, Ю. Л. Квантовые генераторы света и нелинейная оптика / Ю. Л. Климантович. – М. : Просвещение, 1966. – 199 с.
8. Лебедев, В. И. Лабораторные работы по оптике / В. И. Лебедев, Н. И. Стаськов, Л. Е. Старовойтов. – Могилев : Изд-во Могилев. гос. ун-та, 2002. – 46 с.
9. Бежанова, А. И. Методические указания к лабораторным работам по оптике : в 3 ч. / А. И. Бежанова, В. Б. Вовк, Г. В. Кулак. – Мозырь : УО МГПУ им. И. П. Шамякина, 2009. – Ч. 1 : Геометрическая оптика. – 54 с.
10. Бежанова, А. И. Методические указания к лабораторным работам по оптике : в 3 ч. / А. И. Бежанова, В. Б. Вовк, Г. В. Кулак. – Мозырь : УО МГПУ им. И. П. Шамякина, 2009. – Ч. 2 : Волновая оптика. – 47 с.
11. Бежанова А. И. Методические указания к лабораторным работам по оптике : в 3 ч. / А. И. Бежанова, В. Б. Вовк, Г. В. Кулак. – Мозырь : УО МГПУ им. И. П. Шамякина, 2009. – Ч. 3 : Квантовая оптика. – 44 с.
12. Орир, Дж. Физика : в 2 т. / Дж. Орир. – М. : Мир, 1981. – 2 т.

## ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ ПО ОПТИКЕ

1. Предмет оптики. Шкала электромагнитных волн. Законы Максвелла. Вибратор Герца.
2. Волновое уравнение. Плоские электромагнитные волны. Период, частота, фаза электромагнитной волны.
3. Уравнения Максвелла в проводящей среде. Поглощение света в проводящей среде. Теорема Умова – Пойтинга.
4. Интенсивность световой волны. Фазовая и групповая скорость света. Граничные условия.
5. Отражение света от границы раздела двух сред. Закон Снеллиуса. Формулы Френеля. Закон Брюстера.
6. Явление полного внутреннего отражения.
7. Источники и приемники света. Основные энергетические и световые величины.
8. Переход от энергетических величин к световым. Кривая видности. Световые измерения (фотометрия).
9. Преломление света на сферической поверхности. Тонкие линзы. Формула линзы и сферического зеркала.
10. Теорема Аббе. Увеличение линзы. Изображение предметов с помощью линз. Оптическая система линзы.
11. Оптические схемы. Глаз как оптическая система. Принципы работы оптических приборов: лупа, микроскоп, телескоп.
12. Аберрация (погрешности) оптических систем. Дифракционная природа изображения.
13. Интерференция света. Понятие о когерентности: временная и пространственная когерентность.
14. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников. Осуществление когерентных волн в оптике.
15. Влияние размеров источника и некогерентности светового пучка на интерференционную картину.
16. Двухлучевая интерференция. Интерференционные опыты: опыт Юнга, опыт с бипризмой Френеля, опыт Ньютона.
17. Интерференция света в тонких пленках: полосы равной толщины и равного наклона. Локализация полос интерференции.
18. Многолучевая интерференция. Интерферометры. Интерферометр Фабри – Перо.
19. Разрешающая способность интерферометра. Применения интерференции.
20. Явление дифракции. Принцип Гюйгенса – Френеля.
21. Дифракция Фраунгофера на щели и прямоугольном отверстии.

22. Дифракция Фраунгофера на круглом отверстии.
23. Дифракция Френеля на прямоугольном отверстии. Волновой параметр.
24. Метод зон Френеля и его применения. Дифракция на круглом отверстии и диске. Зонные пластинки.
25. Дифракционная решетка. Дисперсионная область, угловая дисперсия и разрешающая способность дифракционной решетки.
26. Дифракция света на пространственных решетках. Метод Рэлея для дифракционных задач. Наклонное падение света на решетку.
27. Понятие о голографии. Запись и считывание голографических решеток. Свойства голографических изображений.
28. Дифракция электромагнитных волн на многомерных структурах. Дифракция рентгеновских лучей. Формулы Лауэ.
29. Формула Вульфа – Брэгга. Рентгеновская спектроскопия и рентгеноструктурный анализ.
30. Естественный и поляризованный свет. Поляризаторы и анализаторы. Закон Малюса.
31. Поляризация свет при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков. Степень поляризации света.
32. Распространение света в кристаллах. Оптическая анизотропия. Двойное лучепреломление.
33. Двуосные, одноосные и кубические кристаллы. Уравнение нормалей Френеля. Отражение света на границе кристалла.
34. Интерференция при двойном лучепреломлении. Поляризационные приборы.
35. Прохождение поляризованного света через кристаллическую пластинку, вырезанную перпендикулярно оптической оси. Пластинки  $\lambda/4$  и  $\lambda/2$ . Анализ поляризованного света.
36. Искусственная оптическая анизотропия. Фотоупругий эффект. Эффект Керра. Эффект Коттона – Мутона.
37. Вращение плоскости поляризации и эффект Фарадея.
38. Нормальная и аномальная дисперсии. Методы измерения дисперсии. Основы электронной теории дисперсии.
39. Дисперсионная формула. Излучение диполя. Коэффициент поглощения. Закон Бугера.
40. Призмные спектральные приборы. Угловая дисперсия и разрешающая способность призмы.
41. Спектры испускания и поглощения. Спектральный анализ. Светофильтры. Цвета тел.
42. Прохождение света через оптически неоднородную среду. Явление Гиндаля. Закон Рэлея.
43. Зависимость интенсивности рассеяния света от угла рассеяния. Поляризация рассеянного света.

44. Молекулярное рассеяние света. Природные оптические явления: миражи, радуга.
45. Релятивистские эффекты в оптике. Методы измерения скорости света. Опыт Физо.
46. Опыты Майкельсона. Преобразования Лоренца. Принцип относительности. Эффект Доплера в оптике.
47. Различные виды люминесценции. Тепловое равновесное излучение. Закон Кирхгофа. Формула излучения Планка.
48. Закон Стефана – Больцмана и закон смещения Вина.
49. Опыт Резерфорда. Модель атома Резерфорда – Бора. Линейчатые спектры атома водорода.
50. Законы Столетова. Квантовые свойства микрочастиц.
51. Спонтанное и индуцированное излучение света. Принципы работы лазеров.
52. Свойства лазерного излучения и применения лазеров.
53. Линейчатые, полосатые и сплошные спектры многоатомных молекул.
54. Виды люминесценции и их классификация.

**ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ**

- Волновое уравнение 5
- Дифракция света на узкой щели 16
- Закон Бугера 20
- Закон Малюса 19
- Закон смещения Вина 21
- Закон Стефана – Больцмана 21
- Законы фотоэффекта 22
- Зоны Френеля 16
- Интерференционный опыт Ньютона 13
- Интерференционный опыт Френеля 13
- Кривая видности 7
- Опыт Майкельсона – Морли 25
- Опыт Физо 25
- Освещенность 8
- Постоянная Ридберга 24
- Постулаты Бора 23
- Преобразования Галилея 26
- Преобразования Лоренца 26
- Принцип Гюйгенса 16
- Радиус боровской орбиты 23
- Радиус зоны Френеля 17
- Разрешающая способность дифракционной решетки 18
- Светимость 8
- Сила света 8
- Спектральные линии атома водорода 24
- Степень поляризации света 19
- Телесный угол 7
- Теория Бора 23
- Увеличение линзы 9
- Увеличение лупы 10
- Увеличение микроскопа 11
- Увеличение телескопа 11
- Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта 22
- Уравнения Максвелла 6
- Условие интерференционного максимума 12
- Условие интерференционного минимума 12
- Формула дифракционной решетки 18
- Формула тонкой линзы 9
- Яркость 8

*Справочное издание*

**ОБЩАЯ ФИЗИКА. ОПТИКА**

Справочные материалы

Составители:

**Кулак Геннадий Владимирович,**  
**Николаенко Татьяна Викторовна**

Корректор *Л. В. Журавская*  
Оригинал-макет *Е. В. Юницкая*

Подписано в печать 20.12.2017. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,62. Тираж 69 экз. Заказ 35.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования «Мозырский государственный  
педагогический университет имени И. П. Шамякина».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий N 1/306 от 22 апреля 2014 г.

Ул. Студенческая, 28, 247777, Мозырь, Гомельская обл. Тел. (8-0236) 32-46-29