

# **ФИЗИКА**

## **ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА**

*Методические указания к практическим занятиям  
для студентов специализации 11.05.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2021**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра общей и технической физики

# ФИЗИКА

## ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

*Методические указания к практическим занятиям  
для студентов специализации 11.05.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2021

УДК 530.10 (073)

**ФИЗИКА. Волновая и квантовая оптика:** Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *Е.С. Ломакина*. СПб, 2021. 51 с.

Методические указания имеют своей целью разбор типовых задач по разделу «Оптика». Содержится теоретическая часть, правила оформления, примеры решения задач и задачи для самостоятельного решения.

Предназначено для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Научный редактор проф. *А.С. Мустафаев*

Рецензент проф. *П.П. Серегин* (РГПУ им. А.И. Герцена, факультет физики, кафедра физической электроники)

□ Санкт-Петербургский  
горный университет 2021 г.

## Введение

Современное учение о свете – оптика – представляет собой один из важнейших разделов физики. Несмотря на свою многовековую историю, оптика и сегодня испытывает интенсивное развитие, обогащаясь открытиями новых явлений и технологий. Основная цель данных методических указаний – помощь студентам в изучении разделов курса Волновой и квантовой оптики, в выполнении расчетно-графических и контрольных работ. Типовые задачи, решения и степень их трудности подбирались так, чтобы студенты могли уяснить сущность физических законов, уточнить область их применения, понять и объяснить смысл физических явлений. Представленный материал в большинстве своем дает лишь направление мышления и мотивирует студентов к проведению дальнейшего самостоятельного анализа. Каждый человек, желающий стать настоящим профессионалом, должен иметь хотя бы одну ключевую компетенцию – дисциплину, которую бы он глубоко и всесторонне изучил. Пусть для вас это будет физика, а критерием усвоения явится не пересказ общеизвестных примеров или повторение стандартных экспериментов, а умение применять полученные фундаментальные знания для решения научно-технических задач, с которыми ни разу не сталкивались раньше!

### *1. Свет как электромагнитная волна. Электромагнитные волны*

Если по какому-либо проводнику протекает переменный электрический ток, то вокруг проводника возникает электромагнитное поле. Каждая точка поля характеризуется определенными значениями модулей напряженности электрического и магнитного полей, которые связаны между собой и синхронно изменяются со временем. Изменение напряженности магнитного поля  $H$  в некоторой точке пространства приводит к появлению вихревого электрического поля  $E$  и наоборот.

Так электромагнитное поле распространяется в пространстве, образуя электромагнитную волну. Эта волна может быть представлена в виде двух синусоид, лежащих во взаимно-перпендикулярных плоскостях.

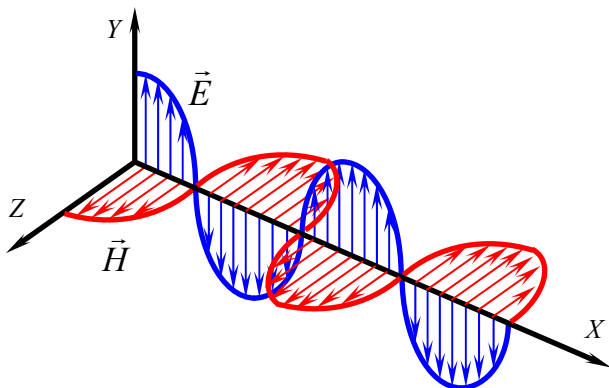


Рис.1. Электромагнитная волна

$$\begin{aligned} \vec{E}_z &= \vec{E}_{0z} \sin(\omega t - \vec{k}\vec{r}) \\ \vec{H}_y &= \vec{H}_{0y} \sin(\omega t - \vec{k}\vec{r}) \end{aligned} \quad \vec{E} \perp \vec{k}, \quad \vec{H} \perp \vec{k}, \quad (1)$$

То есть электромагнитные волны поперечны: колебания векторов напряженности  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной к вектору скорости распространения волны  $\vec{v}$ . Векторы  $\vec{v}$ ,  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  образуют правовинтовую систему.

Рисунок иллюстрирует мгновенную картину векторов напряженности электрического и магнитного полей вдоль направления распространения *плоской монохроматической волны* (волны одной строго определенной частоты) и *линейно поляризованной* (вектор  $\vec{E}$  во всех точках колеблется, оставаясь параллельным определённому направлению) *электромагнитной волны*.

Скорость электромагнитных волн в вакууме, равная по величине скорости света, с одной стороны, и поперечность электромагнитных и световых волн – с другой, привели Максвелла к заключению, что *свет представляет собой электромагнитные волны*. Дальнейшие исследования подтвердили, что не только видимый свет, но и инфракрасное и ультрафиолетовое излучение, рентгеновские и  $\gamma$  – лучи имеют электромагнитную природу и отличаются только частотой волны. Все они распространяются с одинаковой

скоростью. Опыты Герца подтвердили теорию Максвелла, из которой вытекало, что скорость распространения электромагнитной волны равна скорости света.

Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются колебаниями электрического вектора. В соответствии с этим в дальнейшем мы будем рассматривать только вектор напряженности электрического поля и уравнение для  $\vec{E}$  будем называть уравнением световой волны. Величину  $E_0$  будем называть амплитудой световой волны, а вектор  $\vec{E}$  световым вектором.

Интенсивность света  $I$  пропорциональна квадрату амплитуды световой волны  $I \sim E_0^2$ .

Фазовая скорость распространения электромагнитных волн в среде

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{n}, \quad (2)$$

где  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  - скорость распространения света в вакууме,

$n = \sqrt{\epsilon \mu}$  - показатель преломления среды.

Связь между мгновенными значениями напряженностей электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей электромагнитной волны

$$\sqrt{\epsilon \epsilon_0} E = \sqrt{\mu \mu_0} H. \quad (3)$$

Волновое уравнение электромагнитной волны

$$\Delta \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \quad \Delta \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$  оператор Лапласа.

Уравнения плоской электромагнитной волны

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi), \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi), \quad (5)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \quad \vec{E} = \vec{E}_0 \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \quad (6)$$

где  $E_0$  и  $H_0$ - соответственно амплитуды напряженности электрического и магнитного полей волны;  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$  - круговая

частота;  $k = \omega/\nu = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновое число;  $\varphi$  - начальная фаза колебаний в точке с координатой  $x = 0$ ,  $T$  – период колебаний,  $\nu$ -частота,  $\lambda$  – длина волны,  $t$  – текущее время.

Объемная плотность энергии электромагнитного поля

$$w = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}. \quad (7)$$

Вектор плотности потока электромагнитной энергии - вектор Умова – Пойнтинга  $\vec{S} = [\vec{E} \cdot \vec{H}]$ . (8)

Электромагнитные волны, встречая на своем пути тела, оказывают на них давление. Это объясняется тем, что под действием электрического поля волны, заряженные частицы вещества начинают двигаться упорядоченно и подвергаются со стороны магнитного поля волны действию силы Лоренца. Эта сила, отнесенная к единице площади поверхности, и есть давление электромагнитной волны.

### Примеры решения задач

**Задача 1.** Определите отношение плотностей потока излучения электромагнитных волн при одинаковой амплитуде колебаний электрического тока в вибраторе, если частоты колебаний 1 МГц и 10 МГц.

**Решение.** Плотностью потока электромагнитного излучения называют отношение электромагнитной энергии  $\Delta W$ , проходящей за время  $\Delta t$  через перпендикулярную лучам поверхность площадью  $S$ , к произведению площади  $S$  на время  $\Delta t$ . Также эту величину называют интенсивностью волны. Интенсивность прямо пропорциональна четвёртой степени её частоты  $I \sim \omega^4$ . Следовательно, при увеличении

частоты колебаний в 10 раз, интенсивность, а, значит, и плотность потока излучения увеличится в 10000 раз.

**Задача 2.** В вакууме вдоль оси  $X$  распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны равна 10 В/м. Определить амплитуду напряженности магнитного поля волны.

Дано	Решение
$E_0 = 10$ В/м $\epsilon = 1$ $\mu = 1$	$\sqrt{\epsilon\epsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H$ , $E = E_0 \cos(\omega t - kx)$ , $H = H_0 \cos(\omega t - kx)$ . При $\epsilon = 1$ и $\mu = 1$ $\sqrt{\epsilon_0} E_0 = \sqrt{\mu_0} H_0$ , $H_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_0$
$H_0 - ?$	Ответ: $H_0 = 26,5$ мА/м.

### Задачи для самостоятельного решения

1. Мощные лазеры используются в экспериментах по термоядерному синтезу для сжатия газовой плазмы под действием сил давления излучения. При высокой концентрации электронов плазма практически полностью отражает падающее на нее излучение. Предположим, что излучение лазера, генерирующего импульс с пиковой мощностью  $P = 1,5 \cdot 10^3$  МВт, сфокусировано на площадке  $1 \text{ мм}^2$  плазменного слоя. Найдите давление, действующее на плазму.

2. В однородной изотропной немагнитной среде с диэлектрической проницаемостью равной 3 распространяется плоская электромагнитная волна. Амплитуда напряженности электрического поля волны 10 В/м. Найти амплитуду напряженности магнитного поля и фазовую скорость волны.

3. Плоская электромагнитная волна распространяется в вакууме. Амплитуда напряженности электрического поля волны 50 мВ/м. Найти амплитуду напряженности магнитного поля и среднее за период колебаний значение плотности потока энергии.



4. На какой частоте суда передают сигнал бедствия *SOS*, если по международному соглашению длина радиоволны должна быть 600 м?

5. Радиосигнал, посланный на Луну, отразился и был принят на Земле через 2,5 с после посылки. Такой же сигнал, посланный на Венеру, был принят через 2,5 мин. Определить расстояние от Земли до Луны и от Земли до Венеры во время локации.

6. Радиолокатор обнаружил в море подводную лодку, отраженный сигнал от которой дошел до него за 36 мкс. Учитывая, что диэлектрическая проницаемость воды 81, определить расстояние от локатора до подводной лодки.

7. В вакууме вдоль оси  $X$  распространяется плоская электромагнитная волна и падает по нормали на поверхность тела, полностью ее поглощающего. Амплитуда напряженности магнитного поля волны равна 0,15 А/м. Определить давление, оказываемое волной на тело. Воспользуйтесь результатом теоремы Максвелла о том, что если тело полностью поглощает падающую на него энергию, то давление численно равно среднему значению объемной плотности энергии в падающей электромагнитной волне.

## ***2. Интерференция света***

Интерференция заключается в перераспределении энергии волн в пространстве при их наложении, в результате чего в разных точках пространства наблюдается усиление или ослабление интенсивности результирующей волны. Интерферирующие волны должны быть когерентными, т.е. волнами, имеющими одинаковые частоты и постоянную разность фаз в пространстве. К задачам на интерференцию света относятся задачи о наложении волн от двух точечных источников. В этом случае необходимо определить оптическую разность хода двух световых волн от источников до точки наблюдения.

Фазовая скорость света в среде

$$v = \frac{c}{n}, \quad (9)$$

где  $c$  - скорость распространения света в вакууме;  $n$  - абсолютный показатель преломления среды.

Оптическая длина пути

$$L = ns, \quad (10)$$

где  $s$  - геометрическая длина пути световой волны в среде;  $n$  - показатель преломления этой среды.

Оптическая разность хода двух световых волн

$$\Delta = L_2 - L_1, \quad (11)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  - соответственно оптические длины путей, пройденных волнами.

Временная когерентность некогерентных волн – когерентность колебаний, совершающихся в одной и той же точке пространства, но в разные моменты времени.

Время когерентности некогерентной волны:

$$t_{\text{коз}} = \frac{\pi}{\Delta\omega} = \frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda}, \quad (12)$$

где  $\Delta\omega$  - ширина спектра циклических частот,  $\lambda$  - длина световой волны,  $\Delta\lambda$  - ширина спектра длин волн в источнике света.

Длина когерентности (длина гармонического цуга, соответствующего рассматриваемой некогерентной волне)

$$l_{\text{коз}} = ct_{\text{коз}} = \frac{\pi c}{\Delta\omega} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (13)$$

Пространственная когерентность некогерентных волн - когерентность колебаний, совершающихся в один и тот же момент времени в различных точках плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Длина пространственной когерентности (радиус когерентности):

$$\rho_k = \frac{\lambda}{\varphi} = \frac{\lambda r}{D}, \quad (14)$$

где  $\varphi = \frac{D}{r}$  - угловой размер источника света,  $D$ - линейный размер источника света,  $r$ - расстояние до источника,  $\lambda$  - длина волны источника света.

Размер пространственной когерентности  $S_k$  - площадь круга радиуса  $\rho_k$

$$S_k = \pi \frac{\lambda^2}{\varphi^2} = \pi \frac{\lambda^2 r^2}{D^2}. \quad (15)$$

Объем когерентности  $V_k$  – объем цилиндра с основанием  $S_k$  и образующей, равной длине гармонического цуга (длине временной когерентности)  $l_k$

$$V_k = S_k \cdot l_k = \frac{\pi \lambda^2}{\varphi^2} \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda} = \frac{\pi \lambda^2 r^2}{D^2} \frac{\pi c}{\Delta \omega} = \frac{\pi \lambda^4 r^2}{D^2 \Delta \lambda}. \quad (16)$$

Разность фаз двух когерентных волн

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta, \quad (17)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме;  $\Delta$  - оптическая разность хода двух световых волн.

Условие интерференционных максимумов

$$\Delta = \pm m \lambda_0,$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме.

Условие интерференционных минимумов

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}, \quad (18)$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме.

Ширина интерференционной полосы

$$b = \frac{l}{d} \lambda_0, \quad (19)$$

где  $d$  - расстояние между двумя когерентными источниками, находящимися на расстоянии  $l$  от экрана ( $l \gg d$ ).

## Опыт Юнга

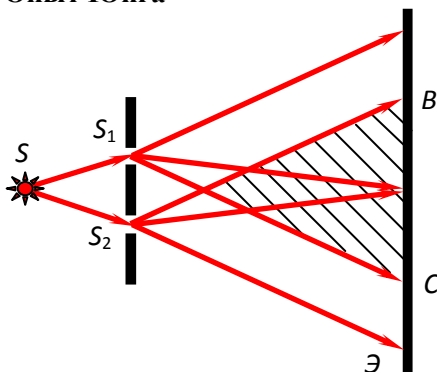


Рис.2. Опыт Юнга

Во всех экспериментальных методах получения когерентных волн возникает как бы два когерентных источника, наложение волн от которых и приводит к интерференции. Проведем расчет интерференционной картины на примере опыта Юнга. В этом опыте свет от реального источника  $S$  попадает на первый экран с двумя малыми цилиндрическими отверстиями. Эти отверстия становятся вторичными источниками сферических световых волн. Так как они возникли от одного источника, то они будут когерентны между собой. Попадая на второй экран, эти волны будут взаимодействовать друг с другом и давать интерференционную картину.

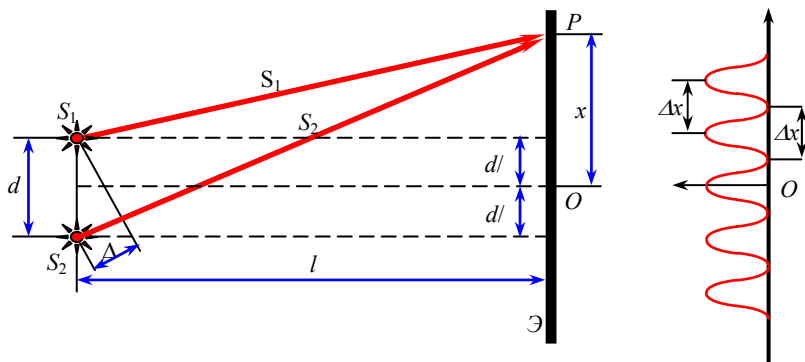


Рис.3. Интерференционная картина на примере опыта Юнга

Результат интерференции в некоторой точке  $P$  будет зависеть от разности хода  $\Delta$ . Найдем её

$$\Delta = r_2 - r_1$$

$$r_1^2 = l^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2; \quad r_2^2 = l^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 \quad (20)$$

$$r_2^2 - r_1^2 = \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 = 2xd$$

$$r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_2 + r_1} \quad (21)$$

Обычно для получения отчетливой интерференционной картины должно быть:  $d \ll l$  и  $x \ll l$ .

При этих условиях  $r_2 + r_1 \approx 2l$  (22)

$$\Delta = r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_2 + r_1} = \frac{2xd}{2l} = \frac{xd}{l} \quad (23)$$

Таким образом, оптическая разность хода волн, приходящих в точку  $M$ , равна

$$\Delta = \frac{xd}{l} \quad (24)$$

Накладывая на эту разность хода условие максимума или минимума при интерференции, получим координаты светлых полос ( $x_{\max}$ ) и темных полос ( $x_{\min}$ ) на экране.

$$\Delta = \pm \frac{\lambda}{2} \cdot 2k \quad \pm \frac{\lambda}{2} \cdot 2k = \frac{xd}{l}; \quad x_{\max} = \pm k \frac{1}{d} \lambda \quad (k=0,1,2,\dots), \quad (25)$$

$$\Delta = \pm \frac{\lambda}{2} (2k+1); \quad \pm \frac{\lambda}{2} (2k+1) = \frac{xd}{l}; \quad x_{\min} = \pm (2k+1) \frac{1}{d} \frac{\lambda}{2} \quad (26)$$

Расстояние между соседними минимумами или максимумами

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{l}{d} \lambda \quad (27)$$

При  $d \approx l$ ,  $\Delta x \approx \lambda$ , т.е. десятые доли микрона, и, следовательно, интерференционная картина неразличима. Поэтому, чтобы она была отчетливой, нужно, чтобы  $d \ll l$ .

Координаты максимумов (и минимумов) зависят от длины волны. Только в центре картины ( $x=0$ ,  $k=0$ ) совпадут максимумы всех длин волн. В других местах максимумы для различных длин волн сдвинуты относительно друг друга. Это приводит к смазыванию интерференционной картины при наблюдении ее в белом свете.

Но даже в монохроматическом свете отчетливая интерференционная картина наблюдается только при очень малых размерах источника (толщине светящейся нити или ширине щели). Это объясняется тем, что каждая точка источника дает на экране свою интерференционную картину, которая может не совпадать с картинами от других.

Условия максимумов и минимумов при интерференции света, отраженного от верхней и нижней поверхностей тонкой плоскопараллельной пленки, находящейся в воздухе ( $n_0 = 1$ ),

$$2dn \cos r \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0, \quad (28)$$

$$2dn \cos r \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} = (2m+1)\frac{\lambda_0}{2},$$

где  $d$  - толщина пленки;  $n$  - ее показатель преломления;  $i$  - угол падения;  $r$  - угол преломления;  $m = 0, 1, 2, \dots$ . Слагаемое  $\pm \frac{\lambda_0}{2}$  обусловлено возможной потерей полуволны при отражении света от границы с оптически более плотной средой.

Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете (или темных в проходящем свете)

$$r_m = \sqrt{(2m+1)\frac{\lambda_0 R}{2n}}, \quad (29)$$

где  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  - номер кольца;  $R$  - радиус кривизны линзы;  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме,  $n$  - показатель преломления среды между линзой и стеклянной пластинкой.

Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете (или светлых в проходящем свете)

$$r_m^* = \sqrt{\frac{m\lambda_0 R}{n}}, \quad (30)$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$  - номер кольца;  $R$  - радиус кривизны линзы;  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме,  $n$  - показатель преломления среды между линзой и стеклянной пластинкой.

Для «просветленной оптики» интерферирующие лучи гасят друг друга в отраженном свете при условии

$$n = \sqrt{n_c}, \quad nd = (2m + 1)\frac{\lambda_0}{4}, \quad (31)$$

где  $n_c$  - показатель преломления стекла;  $n$  - показатель преломления пленки;  $nd$  - оптическая толщина пленки;  $m = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме.

### Интерферометры

Интерферометры – очень чувствительные оптические приборы, позволяющие определять незначительные изменения показателя преломления прозрачных тел (газов, жидких и твердых тел) в зависимости от давления, температуры, примесей и т. д. Применение интерферометров многообразно. Они применяются для определения величины показателя преломления новых материалов, если толщина пленки известна, или для измерения толщины пленки с известной величиной показателя преломления. Ошибка измерения при этом может не превышать  $\sim 10^{-7}$  м. Интерферометры применяются также для изучения качества изготовления оптических деталей, измерения углов, исследования быстропротекающих процессов, происходящих в воздухе, обтекающем летательные аппараты, и т. д. Применяя интерферометр, Майкельсон впервые провел сравнение международного эталона метра с длиной стандартной световой волны. С помощью интерферометров исследовалось также распространение света в движущихся телах, что привело к фундаментальным изменениям представлений о пространстве и времени.

Существует много различных конструкций интерферометров. Для определения показателя преломления часто используется

*интерферометр Жамена* (интерференционный рефрактометр). *A* и *B* – толстые одинаковые плоскопараллельные пластины.

Если пластины строго параллельны друг другу, то все поле равномерно окрашено. При небольшом отклонении от параллельности между лучами 1 и 2 возникает разность хода, и наблюдаются интерференционные полосы.

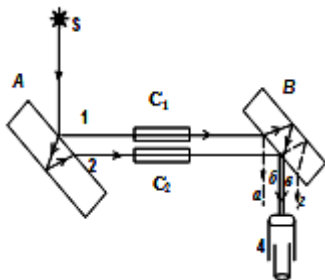


Рис.4. Интерферометр Жамена (интерференционный рефрактометр)

$$\Delta_1 = k_1 \lambda, \quad C_1 \text{ и } C_2 - \text{кюветы с газом.} \quad (32)$$

Если в кюветах одинаковый газ, то наблюдается некоторая интерференционная картина. Если в одну кювету поместить газ с известным показателем преломления  $n_1$ , а в другую – с неизвестным показателем преломления  $n_2$ , то между лучами 1 и 2 возникнет дополнительная разность хода  $\Delta = (n_2 - n_1) \cdot l$  и интерференционная картина сместится на  $k$  полос.

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \Delta_1 + (n_2 - n_1) \cdot l = k_2 \cdot \lambda \\ \Delta_2 - \Delta_1 &= (n_2 - n_1) \cdot l = (k_2 - k_1) \cdot \lambda \\ n_2 - n_1 &= \frac{(k_2 - k_1) \cdot \lambda}{l}, \quad k_2 - k_1 = k \end{aligned} \quad (33)$$

$$n_2 = n_1 + \frac{k \cdot \lambda}{l}.$$

При  $l = 5$  см,  $\lambda = 0,5$  мк =  $5 \cdot 10^{-5}$  см смещению полос на  $k = 0,1$  их ширины, что еще можно достаточно точно зарегистрировать, соответствует ничтожное изменение разности  $n_2 - n_1$



$$n_2 - n_1 = \frac{0,1 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{5} = 10^{-6}. \quad (34)$$

Таким образом, с помощью интерферометра можно измерять показатели преломления газов с точностью до  $10^{-6}$ .

Основу *интерферометра Линника* определения качества обработки поверхностей составляют две стеклянные пластины  $p_1$  и  $p_2$  и два зеркала, одним из которых служит исследуемая поверхность. Нижняя поверхность первой пластины представляет собой полупрозрачное зеркало, на котором происходит разделение лучей: часть света (луч 1) отражается вверх, отражается от исследуемой поверхности и после отражения от нижнего зеркала 3" направляется в окуляр (на рисунке не показан), через который и наблюдается интерференционная картина. После прохождения пластины  $p_1$  луч 2 направляется к зеркалу 3, отражается от него, затем от полупрозрачного зеркала и вместе с лучем 1 направляется к наблюдателю. Луч 1 после отражения от полупрозрачного зеркала и на обратном пути дважды проходит через пластину  $p_1$ , "набирая" тем самым некоторую "лишнюю" разность хода. Для ее компенсации служит пластина  $p_2$ , изготовленная из того же материала, что и первая. Разумеется, эту "лишнюю разность хода" можно было бы легко скомпенсировать простым перемещением зеркала, если бы не было дисперсии, зависимости коэффициента преломления от длины волны  $n(l)$ . Применение компенсирующей пластины  $p_1$  позволяет осуществить такую компенсацию сразу для всех длин волн. Почему образуется интерференционная картина и как она выглядит помогает понять укрупненный фрагмент рисунка слева вверху. Реальный луч 2 и его отражение от зеркала 3 можно заменить лучем 2' и его "отражением" от изображения зеркала 3 в полупрозрачном зеркале – 3'. Это изображение и исследуемая поверхность образуют клин, пластину изменяющейся толщины. Через окуляр наблюдаются интерференционные линии равной толщины – прямые, направленные перпендикулярно плоскости рисунка. И эти линии видны искривленными, если исследуемая поверхность не вполне плоская. При "идеально" плоской поверхности это прямые линии. Если исследуемая поверхность обработана некачественно, волна 1 уже не будет плоской, интерференционная картина исказится. Такой интерферо-

метр позволяет обнаружить весьма небольшие неровности на исследуемой поверхности – порядка долей длины волны.

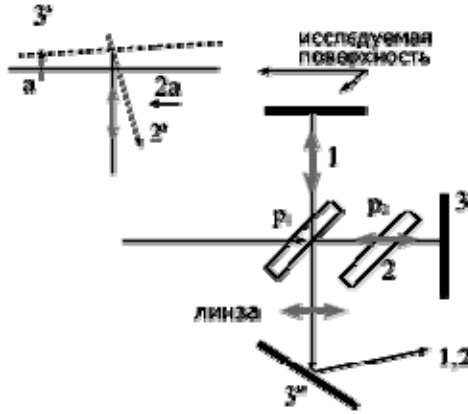
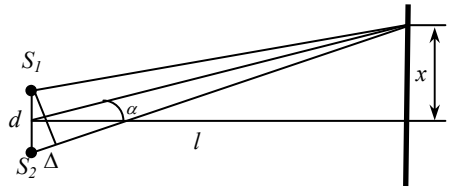


Рис.5. Интерферометр Линника

### Примеры решения задач

1. В опыте Юнга расстояние от щелей до экрана равно 3 м. Определить угловое расстояние между соседними светлыми полосами, если третья светлая полоса на экране отстоит от центра интерференционной картины на расстоянии 4,5 мм.

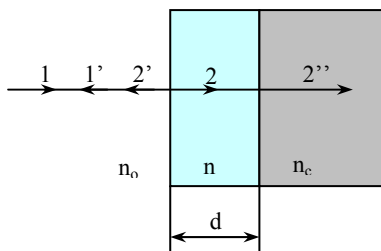


Дано	Решение
$l = 3 \text{ м}$ $m = 3$ $x = 4.5 \text{ мм}$ $= 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$\Delta_{\max} = \pm m\lambda, \quad \Delta_{\max} = \frac{xd}{l}, \quad m\lambda = \frac{xd}{l} \quad (m = 0, 1, 2, 3 \dots),$ $\alpha \approx \text{tg}\alpha = \frac{x}{l} = \frac{m\lambda}{d},$ $\Delta\alpha = \frac{m\lambda}{d} - \frac{(m-1)\lambda}{d} = \frac{\lambda}{d} = \frac{x}{ml}$
$\Delta\alpha - ?$	Ответ: $\Delta\alpha = 5 \cdot 10^{-4} \text{ рад}.$

2. Если в опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей поместить перпендикулярно этому лучу тонкую стеклянную пластинку ( $n = 1,5$ ), то центральная светлая полоса смещается в положение, первоначально занимаемое пятой светлой полосой. Длина волны  $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ . Определить толщину пластинки.

Дано	Решение
$n = 1,5$ $m = 5$ $\lambda = 0,5 \text{ мкм} =$ $= 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	$\Delta = n \cdot d - d = d(n - 1)$ $\Delta = m\lambda, \quad m\lambda = d(n - 1), \quad d = \frac{m\lambda}{n - 1}$
$d - ?$	Ответ: $d = 5 \text{ мкм}$

3. Для уменьшения потерь света из-за отражения от поверхности стекла осуществляют «просветление оптики»: на свободную поверхность линз наносят тонкую пленку с показателем преломления  $n = \sqrt{n_c}$ .



В этом случае амплитуды отраженных лучей 1', 2' от обеих поверхностей такой пленки одинаковы. Определить толщину  $d$  слоя, при которой отражение для света с длиной волны  $\lambda$  от стекла в направлении нормали минимально.

Дано	Решение
$n = \sqrt{n_c}$ $\lambda$	$\Delta = 2 dn, \quad \text{усл. min} : \Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$ $2 dn = (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$ $d = \frac{(2m + 1)\lambda}{4n} = \frac{(2m + 1)\lambda}{4\sqrt{n_c}}.$

$d - ?$	Ответ: $d = \frac{(2m+1)\lambda}{4\sqrt{n_c}}$ ( $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ ).
---------	---

### Задачи для самостоятельного решения

1. В опыте Юнга щели  $S_1$  и  $S_2$  освещались монохроматическим светом с длиной волны 600 нм, расстояние между щелями 2 мм, расстояние от них до экрана 3 м. Найти расстояние от 3-го и 4-го максимумов до центра экрана. Доказать, что расстояния между соседними максимумами постоянны. Экран параллелен линии  $S_1S_2$ .

2. Два когерентных источника света, полученных с помощью бипризмы Френеля, находятся на расстоянии  $d = 0,1$  мм друг от друга. На экране, параллельном отрезку  $d$ , наблюдается интерференционная картина, причем 5-ый максимум отстоит от центра экрана на 5 мм. Найти расстояние между экраном и линией, соединяющей источники, если

3. На пути света поставлена стеклянная пластина толщиной  $d = 1$  мм так, что угол падения луча равен  $30^\circ$ . На сколько изменится оптическая длина пути луча?

4. Плоская монохроматическая волна падает на диафрагму с двумя узкими щелями, расстояние между которыми 3 мм. На экране, который расположен на расстоянии 1 м от диафрагмы, наблюдают интерференционные полосы. На какое расстояние и в какую сторону сместятся полосы, если одну из щелей перекрыть стеклянной пластинкой 8 мкм?

5. Два луча приходят в точку наблюдения от двух когерентных источников с разностью хода  $\Delta = 6$  мкм. Максимум или минимум освещенности будет наблюдаться в данной точке? Какова разность фаз между колебаниями, пришедшими в точку наблюдения? Длина волны света  $6 \cdot 10^{-7}$  м.

6. Кольца Ньютона образуются между плоским стеклом и линзой с радиусом кривизны 12,1 м. Монохроматический свет падает нормально. Диаметр второго светлого кольца в отраженном свете

равен 6,6 мм. Найти длину волны падающего света. Вывести расчетную формулу.

7. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плоско-выпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны 0,6 мкм равен 0,82 мм. Радиус кривизны линзы 0,5 м.

8. Плосковыпуклая линза с фокусным расстоянием  $F = 1$  м лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого кольца Ньютона в отраженном свете равен 1,1 мм. Определить длину световой волны.

9. Спектр натрия состоит из двух линий длиной 589 нм и 589,59 нм. Какое по счету темное кольцо Ньютона, соответствующее одной из этих линий, совпадает со следующим по счету темным кольцом, соответствующим другой линии, если наблюдение ведется в отраженном свете?

10. В установке для наблюдения колец Ньютона находится бензол ( $n = 1,33$ ). Показатель преломления линзы и пластинки равен 1,6. Радиус кривизны линзы 2 м. Определить радиус третьего светлого кольца при наблюдении в отраженном свете с длиной волны 600 нм.

11. На мыльную пленку с показателем преломления  $n = 1,33$  падает белый свет. При какой наименьшей толщине пленки она будет окрашена в желтый цвет с длиной волны  $6 \cdot 10^{-5}$  см.

12. Мыльная пленка толщиной 0,5 мкм освещается белым светом под углом падения  $30^\circ$ . Каким цветом будет окрашена пленка в отраженных лучах, если для пленки  $n = 1,33$ .

13. На тонкую пленку нормально к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Отраженный от нее свет максимально усилен вследствие интерференции. Определить минимальную толщину  $d_{min}$  пленки, если показатель преломления материала пленки равен 1,4.

14. Мыльная пленка толщиной 0,3 мкм освещается белым светом под углом падения  $0^\circ$  и рассматривается в отраженных лучах. Каким цветом будет при этом окрашена пленка, если показатель преломления пленки  $n = 1,33$ ?

15. На тонкую глицериновую пленку толщиной  $d = 1,5$  мкм нормально к ее поверхности падает белый свет. Определить длины волн лучей видимого участка, которые будут ослаблены в результате интерференции.

16. Ширина десяти колец Ньютона, отсчитываемых вдали от центра, составляет 0,8 мм. Ширина следующих 10 колец 0,5 мм. Определить радиус кривизны линзы, если наблюдение ведется в отраженном свете. Длина волны падающего излучения 0,6 мкм.

17. Плосковыпуклая линза с оптической силой  $D = 2$  дптр выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Радиус  $r_4$  четвертого темного кольца Ньютона в проходящем свете равен 0,7 мм. Определите длину световой волны

18. Расстояние между четвертым и двадцать пятым темными кольцами Ньютона равно 9 мм. Радиус кривизны линзы 15 см. Найти длину волны света, падающего нормально на установку. Наблюдение производится в отраженном свете.

19. В шахтном интерферометре длина камер 110 мм. При заполнении камеры шахтным воздухом интерференционная картина сдвинулась на 11 полос. Найти показатель преломления шахтного воздуха, если показатель преломления чистого воздуха 1,000292, длина волны  $6 \cdot 10^{-7}$  м. Сделать чертеж.

20. Фронт волны желтого света ( $\lambda = 600$  нм) прошел в стекле за некоторое время путь, равный 10 мм. Каков его оптический путь и длина волны в стекле ( $n = 1,5$ )?

21. На пути одного из лучей интерферометра Жамена поместили трубку длиной 12 см, из которой выкачан воздух. При заполнении трубки хлором интерференционная картина сместилась на 154 полосы. Длина волны монохроматического света в этом опыте 600 нм. Найти показатель преломления хлора. Какой толщины кварцевую пластинку с показателем преломления  $n_{кв} = 1,54$  необходимо ввести на пути второго луча, чтобы разность хода лучей снова стала равной нулю?

22. В опыте с интерферометром Майкельсона для смещения интерференционной картины на 500 полос потребовалось переместить одно из зеркал на расстояние 0,161 мм. Найти длину волны падающего света.

### 3. Дифракция света

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от прямолинейного распространения. Дифракция, в частности, приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

Если на пути параллельного светового пучка расположено круглое препятствие (круглый диск, шарик или круглое отверстие в непрозрачном экране), то на экране, расположенном на достаточно большом расстоянии от препятствия, появляется дифракционная картина – система чередующихся светлых и темных колец. Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных дифракционных полос.

Радиус внешней границы  $m$ -й зоны Френеля для сферической волны

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m\lambda}, \quad (35)$$

где  $m$  - номер зоны Френеля;  $\lambda$  - длина волны;  $a$  и  $b$  - соответственно расстояния от диафрагмы с круглым отверстием до точечного источника и до экрана, на котором дифракционная картина наблюдается.

Для плоской волны:

$$r_m = \sqrt{bm\lambda}. \quad (36)$$

Условия дифракционных максимумов от одной щели, на которую свет падает нормально:

$$a \cdot \sin \varphi = \pm(2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (37)$$

и минимумов

$$a \cdot \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (38)$$

где  $a$  - ширина щели;  $\varphi$  - угол дифракции;  $m$  - порядок спектра;  $\lambda$  - длина волны.

Дифракционной решеткой называют совокупность большого числа одинаковых, отстоящих друг от друга на одно и то же расстояние, щелей. Различают прозрачные и отражающие решетки.

Отражательные: штрихи нанесены на зеркальную (металлическую) поверхность, и наблюдение ведется в отражённом свете.

Прозрачные: штрихи нанесены на прозрачную поверхность (или вырезаются в виде щелей на непрозрачном экране), наблюдение ведется в проходящем свете.

Фронт световой волны разбивается штрихами решётки на отдельные пучки когерентного света. Эти пучки претерпевают дифракцию на штрихах и интерferируют друг с другом. Так как для разных длин волн максимумы интерференции оказываются под разными углами (определяемыми разностью хода интерferирующих лучей), то белый свет раскладывается в спектр.

Один из простейших и распространённых в быту примеров отражательных дифракционных решёток – компакт-диск. На поверхности компакт-диска – дорожка в виде спирали с шагом 1,6 мкм между витками. Примерно треть ширины (0,5 мкм) этой дорожки занята углублением (это записанные данные), рассеивающим падающий на него свет, примерно две трети (1,1 мкм) – нетронутая подложка, отражающая свет. Таким образом, компакт диск – отражательная дифракционная решётка с периодом 1,6 мкм.

Постоянная (период) дифракционной решетки

$$d = a + b; \quad d = \frac{1}{N}, \quad (39)$$

где  $a$  - ширина щели решетки;  $b$  - ширина непрозрачных участков между щелями;  $N$  - число щелей, приходящихся на единицу длины дифракционной решетки.

Условия главных максимумов и дополнительных минимумов дифракционной решетки, на которую свет падает нормально:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots),$$
$$d \cdot \sin \varphi = \pm m' \frac{\lambda}{N} \quad (m' = 0, 1, 2, 3, \dots, \text{кроме } 0, N, 2N, \dots), \quad (40)$$



где  $d$  - период дифракционной решетки;  $N$  - число штрихов решетки.

Формула Вульфа-Брэггов (условие дифракционных максимумов от пространственной дифракционной решетки)

$$2d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (41)$$

где  $d$  - расстояние между атомными плоскостями кристалла;  $\theta$  - угол скольжения;  $\lambda$  - длина волны рентгеновского излучения.

Волновая природа света налагает предел на возможность различения деталей предмета или очень мелких предметов при их наблюдении с помощью микроскопа на разрешающую способность телескопа.

Разрешающая способность спектрального прибора

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda}, \quad (42)$$

где  $\Delta \lambda$  - минимальная разность длин волн двух соседних спектральных линий, при которой эти линии регистрируются раздельно.

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R_{\text{диф.реш.}} = mN, \quad (43)$$

где  $m$  – порядок спектра;  $N$  - общее число штрихов решетки.

Разрешающая способность объектива (критерий Рэлея):

$$R = \frac{1}{\alpha} = \frac{D}{1,22\lambda}, \quad (44)$$

где  $D$  - диаметр объектива;  $\alpha$  - минимальный угол между параллельными пучками света, разрешаемый объективом;  $\lambda$  - длина световой волны.

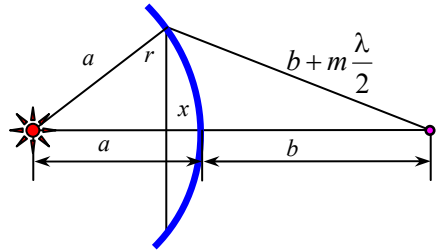
Разрешающая способность микроскопа, определяется как минимальное расстояние  $d$ , различимое с помощью микроскопа:

$$d \geq \frac{0,61\lambda}{n \sin \phi}, \quad (45)$$

где  $\phi$  - половина угла между лучами, идущими от точки на поверхности рассматриваемого предмета к краям объектива;  $n$  - показатель преломления прозрачного вещества, заполняющего пространство между предметом и объективом.

## Примеры решения задач

1. Точечный источник света ( $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ ) расположен на расстоянии  $a = 1 \text{ м}$  перед диафрагмой с круглым отверстием диаметра  $d = 2 \text{ мм}$ . Определить расстояние  $b$  от диафрагмы до точки наблюдения, если отверстие открывает три зоны Френеля.

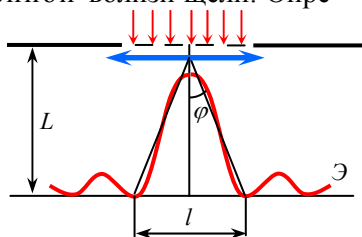


Дано	Решение
$a = 1 \text{ м}$ $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $m = 3$ $d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$r^2 = a^2 - (a-x)^2, \quad \lambda \ll a, \quad \lambda \ll b, \quad r^2 = \left(b + m \frac{\lambda}{2}\right)^2 - (b+x)^2,$ <p>так как высота зоны Френеля <math>x = \frac{bm\lambda}{2(a+b)}</math>,</p> <p>то <math>r^2 = \frac{ab}{a+b} m\lambda - \frac{b^2}{4(a+b)^2} (m\lambda)^2</math>.</p> <p>Слагаемое <math>\frac{b^2}{4(a+b)^2} (m\lambda)^2</math> пренебрежимо мало, <math>r^2 = \frac{ab}{a+b} m\lambda</math>,</p> $b = \frac{ar^2}{am\lambda - r^2},$ $r = \frac{d}{2}, \quad b = \frac{ad^2}{4am\lambda - d^2}$
$b = ?$	Ответ: $b = 2 \text{ м}$

2. Дифракция наблюдается на расстоянии  $l$  от точечного источника монохроматического света ( $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ ). Посередине между источником света и экраном находится непрозрачный диск диаметром  $5 \text{ мм}$ . Определить расстояние  $l$ , если диск закрывает только центральную зону Френеля.

Дано	Решение
$d=5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $\lambda=5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $m=1$ $a=b=l/2$	$a^2 = (a-x)^2 + r^2, \quad a^2 = a^2 + r^2 - 2ax + x^2,$ $r^2 + (b+x)^2 = \left(b + m \frac{\lambda}{2}\right)^2,$ $b + bm\lambda + \frac{(m\lambda)^2}{4} = r^2 + b^2 + x^2 + 2bx,$ $x^2 \text{ и } \frac{(m\lambda)^2}{4} \text{ пренебрежимо малы}$ $x = \frac{r^2}{2a} = \frac{d^2}{4l}, \quad bm\lambda = 2bx + r^2,$ $bm\lambda = 2b \frac{r^2}{2a}, \quad bm\lambda = 2r^2 \quad \frac{l}{2m\lambda} = \frac{d^2}{2},$ $l = \frac{d^2}{m\lambda}$
$l - ?$	Ответ: $l = 50 \text{ м}$

3. На щель шириной,  $a = 0,1 \text{ мм}$  падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 500 \text{ нм}$ . Дифракционная картина проецируется на экран, параллельный плоскости щели, с помощью линзы, расположенной вблизи щели. Определить расстояние от экрана до линзы, если расстояние  $l$  между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны центрального максимума, равно  $1 \text{ см}$ .



<i>Дано</i>	<i>Решение</i>
$a = 10^{-4} \text{ м}$ $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $m = 1$ $l = 10^{-2} \text{ м}$	$a \cdot \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots),$  $l = 2L \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad \frac{l}{2} \ll L, \quad \operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi,$  $\sin \varphi = \frac{l}{2L}, \quad a \frac{l}{2L} = m\lambda, \quad L = \frac{al}{2m\lambda}$
$L - ?$	Ответ: $L = 1 \text{ м}$

4. Дифракционная решетка длиной  $l = 5 \text{ мм}$  может разрешить в первом порядке две спектральные линии натрия ( $\lambda_1 = 589,0 \text{ нм}$  и  $\lambda_2 = 589,6 \text{ нм}$ ). Определить, под каким углом в спектре третьего порядка будет наблюдаться свет с  $\lambda_3 = 600 \text{ нм}$ , падающий на решетку нормально.

<i>Дано</i>	<i>Решение</i>
$l = 5 \text{ мм}$ $\lambda_1 = 5,890 \cdot \text{м}$ $\lambda_2 = 5,896 \cdot \text{м}$ $\lambda_3 = 6,0 \cdot \text{м}$ $m = 3$	$d \cdot \sin \varphi = m_3 \lambda_3, \quad \sin \varphi = \frac{m_3 \lambda_3}{d}, \quad d = \frac{l}{N},$  $R = m_1 N = \frac{\lambda_1}{\Delta \lambda}, \quad \Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1,$  $N = \frac{\lambda_1}{m \Delta \lambda}, \quad d = \frac{m \Delta \lambda}{\lambda_1}, \quad \sin \varphi = \frac{m_3 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_1}{m_1 \cdot l \cdot \Delta \lambda},$  $\varphi = \arcsin \frac{m_3 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_1}{m_1 \cdot l \cdot \Delta \lambda}.$
$\varphi - ?$	Ответ: $\varphi = 20^\circ 42'$

### Задачи для самостоятельного решения

1. Параллельный пучок света от монохроматического источника ( $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ ) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием диаметром  $1 \text{ мм}$ . Темным или светлым будет центр дифракционной картины на экране, находящемся на расстоянии  $0,5 \text{ м}$  от диафрагмы?

2. Дифракция наблюдается на расстоянии  $1 \text{ м}$  от точечного источника монохроматического света ( $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ ). Посередине между

источником света и экраном находится непрозрачный, круглый диск диаметром 5 мм. Определить расстояние  $l$ , если диск закрывает только центральную зону Френеля.

3. Щель шириной 0,5 мм освещается красным светом от лазера с  $\lambda = 630$  нм. На каком расстоянии от щели можно отчетливо наблюдать дифракционную картину?

4. Экран с круглым отверстием радиусом 1,5 мм расположен на расстоянии 8,6 м от точечного источника света, излучающего свет с длиной волны 0,6 мкм. На каком расстоянии от отверстия расположена точка наблюдения, если из нее видна одна первая зона Френеля? На какое расстояние надо переместить точку наблюдения, чтобы в ней образовалось темное пятно?

5. Параллельный пучок света падает нормально на круглую диафрагму радиусом 1,4 мм, расположенную на расстоянии 4 м от точки наблюдения. Что возникнет в точке наблюдения – максимум или минимум интенсивности? Длина световой волны 0,5 мкм. До какого радиуса надо расширить диафрагму, чтобы в точке наблюдения возник минимум интенсивности? Куда при этом исчезает энергия световой волны?

6. На щель шириной,  $a = 2$  мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света  $\lambda = 589$  нм. Под какими углами  $\varphi$  будут наблюдаться дифракционные минимумы света?

7. На щель шириной,  $a = 20$  мкм падает нормально параллельный пучок монохроматического света  $\lambda = 500$  нм. Найти ширину изображения щели на экране, удаленном от щели на расстояние  $l = 1$  м. (Шириной изображения щели на экране считать расстояние между двумя дифракционными минимумами первого порядка).

8. При расширении круглого отверстия от одной до двух зон Френеля освещенность в центре экрана падает почти до нуля. Как согласовать этот факт с увеличением светового потока в два раза?

9. Указать порядки главных максимумов, которые не могут наблюдаться на дифракционной решетке с периодом  $d = 9,0$  мкм и шириной одной щели  $b = 3,0$  мкм.

10. Какова интенсивность света в центре дифракционной картины от диска, если он закрывает две зоны Френеля? Интенсивность света в отсутствие препятствия равна  $I_0$ . Описать изменение

дифракционной картины при увеличении поперечных размеров диска.

11 На непрозрачную пластину с узкой щелью падает нормально плоская монохроматическая световая волна ( $\lambda = 600$  нм). Угол  $\varphi$  отклонения лучей, соответствующих второму дифракционному максимуму, равен  $20^\circ$ . Определить ширину  $a$  щели.

12 На пластину со щелью, ширина которой  $a = 0,05$  мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,7$  мкм. Определить угол  $\varphi$  отклонения лучей, соответствующих первому дифракционному максимуму.

13. Постоянная дифракционной решетки равна 5 мкм. Определите наибольший порядок спектра, общее число главных максимумов в дифракционной картине и угол дифракции в спектре четвертого порядка при нормальном падении монохроматического света с длиной волны 0,625 мкм.

14. Расстояние между атомными плоскостями кристалла кальцита равно 0,3 нм. Определите, при какой длине волны рентгеновских лучей второй дифракционный максимум будет наблюдаться при отражении лучей под углом  $60^\circ$  к поверхности кристалла.

15. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядков отчасти перекрывают друг друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница ( $\lambda = 0,4$  мкм) спектра третьего порядка?

16. Какое наименьшее число штрихов должна содержать решетка, чтобы в спектре второго порядка можно было видеть раздельно две желтые линии натрия с длиной волны  $\lambda = 589,0$  нм и  $\lambda = 589,6$  нм? Какова длина  $l$  такой решетки, если расстояние между штрихами  $b = 5$  мкм?

17. Расстояние между штрихами дифракционной решетки  $d = 4$  мкм. На решетку падает нормально свет с длиной волны  $\lambda = 0,58$  мкм. Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

18. Определить наибольший порядок спектра, даваемый дифракционной решеткой, имеющей 600 штрихов на 1 мм в двух случаях: а) свет падает на решетку нормально; б) свет падает на решетку под углом  $30^\circ$ . Длина волны света 580 мкм.

19. Свет с длиной волны 589 нм падает нормально на дифракционную решетку с периодом 2,5 мкм, содержащую 10000 штрихов. Найти угловую ширину дифракционного максимума второго порядка.

20. Найти наибольший порядок для желтой линии натрия  $\lambda = 589$  нм, если дифракционная решетка имеет на 1 мм 500 штрихов.

21. На дифракционную решетку, имеющую 100 штрихов на 1 мм, нормально падает параллельный пучок белого света. Определить разность углов конца первого и начала второго спектра, если длины крайних красных и крайних фиолетовых волн равны соответственно 700 и 400 мкм.

22. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядков отчасти перекрывают друг друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница ( $\lambda = 0,4$  мкм) спектра третьего порядка? Ответ:  $\lambda = 0,6$  мкм.

23. На дифракционную решетку, содержащую  $n = 100$  штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет. Зрительная труба спектрометра наведена на максимум третьего порядка. Чтобы навести трубу на другой максимум того же порядка, ее нужно повернуть на угол  $\Delta\varphi = 20^\circ$ . Определите длину волны  $\lambda$  света.

24. Оцените, на основе дифракционных соображений, может ли орел, летящий над землей на высоте 1 км, разглядеть мышонка размером в 2 см, если диаметр глаза орла составляет 10 мм.

#### **4. Поляризация света**

Поляризация волн – характеристика поперечных волн, описывающая поведение вектора колеблющейся величины в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. (В продольной волне поляризация возникнуть не может, так как направление колебаний в этом типе волн всегда совпадают с направлением распространения). Для **электромагнитных волн** поляризация – явление направленного колебания векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ .

*Линейно-поляризованный (плоско-поляризованный) свет.*

В этом свете в каждый момент времени вектор  $\vec{E}$  имеет одно определенное направление и с течением времени оно не меняется. Будем считать, что свет распространяется перпендикулярно чертежу, тогда вектор  $\vec{E}$  будет лежать в плоскости чертежа и, будет иметь одно направление. В каждом элементарном акте испускания света атомом излучается именно линейно-поляризованный свет.

*Естественный свет.* В этом свете в каждый момент времени имеются всевозможные направления вектора  $\vec{E}$  и амплитуда колебаний вектора  $\vec{E}$  во всех направлениях одинакова. Такой свет испускается обычными источниками. Он возникает вследствие излучения большого числа атомов, испускающих свет с различным направлением вектора  $\vec{E}$ .

*Частично – поляризованный свет.* В этом свете в каждый момент времени имеются всевозможные направления вектора  $\vec{E}$ , но амплитуда колебаний в разных направлениях разная.

*Циркулярно – поляризованный свет (поляризованный по кругу).* В этом свете в каждый момент времени имеется только одно определенное направление вектора  $\vec{E}$ , но с течением времени оно поворачивается, а амплитуда вектора  $\vec{E}$  остается постоянной. Таким образом, конец вектора  $\vec{E}$  с течением времени описывает окружность.

*Эллиптически – поляризованный свет.* В этом свете в каждый момент времени имеется только одно определенное направление вектора  $\vec{E}$ , но с течением времени оно поворачивается, и амплитуда вектора  $\vec{E}$  меняется. Таким образом, конец вектора  $\vec{E}$  с течением времени описывает эллипс.

Приборы, служащие для получения поляризованного света называются *поляризаторами* ( $P$ ). Аналогичные приборы, служащие для анализа поляризованного света, называются *анализаторами* ( $A$ ).

Степень поляризации света

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (46)$$



где  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  - соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

Закон Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (47)$$

где  $I$  - интенсивность плоско поляризованного света, прошедшего через анализатор и  $I_0$  падающего на анализатор;  $\alpha$  - угол между плоскостями поляризатора и анализатора.

Закон Брюстера

$$\operatorname{tg} i_b = n_{21}, \quad (48)$$

где  $i_b$  - угол падения, при котором отраженный от диэлектрика луч является плоско поляризованным;  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$  - относительный показатель преломления среды.

Оптическая разность хода для кристаллической пластинки: в четверть длины волны

$$(n_o - n_e)d = \pm(m + \frac{1}{4})\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (49)$$

в пол длины волны

$$(n_o - n_e)d = \pm(m + \frac{1}{2})\lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (50)$$

в целую длину волны

$$(n_o - n_e)d = \pm m \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (51)$$

где  $\lambda$  - длина волны;  $d$  - толщина пластинки;  $n_o - n_e$  - соответственно показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в направлении, перпендикулярном оптической оси, знак плюс соответствует отрицательным одноосным кристаллам, минус - положительным.

Угол поворота плоскости поляризации:

для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\varphi = [\alpha]d, \quad (52)$$

для оптически активных растворов

$$\varphi = [\alpha] C d, \quad (53)$$

где  $d$  - длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе;  $[\alpha]$  - удельное вращение;  $C$  - массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

### Примеры решения задач

1. Определить степень поляризации  $P$  света, который представляет собой смесь естественного света с плоско поляризованным, если интенсивность поляризованного света равна интенсивности естественного.

Дано	Решение
$I_{\text{п}} = I_{\text{ест}}$	$P = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad I_{\text{max}} = I_n + \frac{1}{2}I_{\text{ест}} = I_n + \frac{1}{2}I_n = \frac{3}{2}I_n,$ $I_{\text{min}} = \frac{1}{2}I_{\text{ест}} = \frac{1}{2}I_n, \quad P = \frac{\frac{3}{2}I_n - \frac{1}{2}I_n}{\frac{3}{2}I_n + \frac{1}{2}I_n} = \frac{I_n}{2I_n} = 0,5$
$P - ?$	Ответ: $P=0,5$

2. Предельный угол полного отражения для пучка света на границе кристалла каменной соли с воздухом равен  $40,5^\circ$ . Определить угол Брюстера при падении света из воздуха на поверхность этого кристалла.

Дано	Решение
$i_{\text{np}} = 40,5^\circ$	$\frac{\sin i_{\text{np}}}{\sin(\pi/2)} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{\sin i_{\text{np}}}, \quad \text{tgi}_B = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{\sin i_{\text{np}}},$ $i_B = \text{arctg}\left(\frac{1}{\sin i_{\text{np}}}\right)$
$i_B - ?$	Ответ: $i_B = 57^\circ$ .

3. Определить наименьшую толщину кристаллической пластинки в четверть длины волны для  $\lambda = 530 \text{ нм}$ , если для данной длины волны разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей  $n_o - n_e = 0,01$ .

Дано	Решение
$\lambda = 530$ нм $= 5,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $n_o - n_e = 0,01$ $\Delta = \lambda/4$	$(n_o - n_e)d = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{4}, (n_o - n_e)d_{\min} = \frac{\lambda}{4},$ $d_{\min} = \frac{\lambda}{4(n_o - n_e)}$
$d_{\min} - ?$	Ответ: $d_{\min} = 13,3 \text{ мкм}$

4. Пластика кварца толщиной  $d = 2 \text{ мм}$ , вырезанная перпендикулярно оптической оси кристалла, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света определенной длины волны на угол  $\varphi_1 = 30^\circ$ . Определить толщину  $d_2$  кварцевой пластинки, помещенной между параллельными николями, чтобы данный монохроматический свет гасился полностью.

Дано	Решение
$d_1 = 2$ мм = $0,002$ м $\varphi_1 = 30^\circ$ $\varphi_2 = 90^\circ$	$\varphi_1 = \alpha d_1, \varphi_2 = \alpha d_2, \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{d_1}{d_2}, d_2 = \frac{d_1 \varphi_2}{\varphi_1}$
$d_2 - ?$	Ответ: $d_2 = 6 \text{ мм}$

### Задачи для самостоятельного решения

1. Раствор сахара концентрации  $0,5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  вращает плоскость поляризации монохроматического света на  $30^\circ$ . Определить концентрацию раствора сахара в другой такой же трубке, если он вращает плоскость поляризации на  $15^\circ$ .

2. Определить постоянную вращения для кварца, если кварцевая пластинка толщиной  $4 \text{ мм}$ , вырезанная перпендикулярно оптической оси и помещенная между николями с параллельными главными плоскостями, полностью затемняет поле зрения.

3. На стеклянную пластинку с показателем преломления  $1,7$  падает луч под углом полной поляризации. Как нужно изменить угол падения, чтобы получить полную поляризацию отраженного луча, если пластину поместить в сосуд с водой?

4. Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации. Степень поляризации преломленного луча составляет 0,09. Найти коэффициент отражения.

5. В частично поляризованном свете амплитуда светового вектора, соответствующая максимальной интенсивности света, в 3 раза больше амплитуды, соответствующей минимальной интенсивности.

6. Степень поляризации частично поляризованного света  $P = 0,25$ . Найти отношение интенсивности поляризованной составляющей этого света к интенсивности естественной составляющей.

7. Луч света, идущий в стеклянном сосуде, наполненном серной кислотой, отражается от поверхности стекла. При каком угле падения отраженный свет полностью поляризован? Показатель преломления кислоты равен 1,43, а стекла – 1,52.

8. На пути частично поляризованного света, степень поляризации которого равна 0,6, поставили анализатор так, что интенсивность света, прошедшего через него стала максимальной. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, если плоскость пропускания анализатора повернуть на угол  $\alpha = 30^\circ$ ?

9. Определите, во сколько раз уменьшится интенсивность света, прошедшего через два николя, главные плоскости которых образуют угол  $60^\circ$ , если каждый из николей как поглощает, так и отражает 5% падающего на них света.

10. В результате прохождения естественного света через 2 пластинки из николя яркость света уменьшилась на 80%. Определить угол между главными плоскостями николей, если каждый из них отражает и поглощает 10% падающего светового потока.

11. Чему равен угол между главными оптическими осями поляризатора и анализатора, если анализатор в 6 раз уменьшает интенсивность света, проходящего к нему от поляризатора? Показать ход лучей в призме Николя. Поглощением света пренебречь.

12. Между скрещенными николями поместили пластинку из кварца, вырезанную перпендикулярно оптической оси. Чтобы погасить свет, анализатор повернули на угол  $20^\circ$ . Определить толщину пластинки, если длина световой волны 0,5 мкм, а постоянная вращения  $29,7^\circ$  на 1 мм.

13. Угол преломления луча в жидкости  $30^{\circ}$ . Определить ее показатель преломления, если отраженный луч максимально поляризован.

14. Естественный луч света падает на полированную поверхность стеклянной пластины ( $n_2 = 1.5$ ), погруженной в жидкость. Отраженный от пластины луч образует угол  $= 97^{\circ}$  с падающим лучом. Определить показатель преломления жидкости, если отраженный луч полностью поляризован. Какой наименьший угол составляет преломленный луч с падающим?

15. Естественный свет падает на кристалл каменной соли с показателем преломления 1,544. Определить коэффициент отражения при нормальном падении лучей.

16. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности воды, были максимально поляризованы?

17. Определить степень поляризации лучей Солнца, отраженных от поверхности воды, если высота его над горизонтом  $45^{\circ}$ .

18. Пучок естественного света падает на стеклянную призму с углом  $\alpha=30^{\circ}$ . Определить показатель преломления стекла, если отраженный луч является плоско поляризованным.

19. Кристаллическая пластинка из исландского шпата с наименьшей толщиной  $d = 0,86$  мкм служит пластинкой в четверть волны для  $\lambda = 0,59$  мкм. Определите разность показателей преломления  $\Delta n$  обыкновенного и необыкновенного лучей.

20. Определите наименьшую толщину кристаллической пластинки в целую длину волны для  $\lambda = 530$  нм, если разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей для данной длины волны  $n_e - n_o = 0,01$ .

### **5. Распространение света в веществе**

Дисперсией света называются явления, обусловленные зависимостью показателя преломления  $n$  вещества от частоты  $\omega$  или от длины волны  $\lambda$ .

Для каждого вещества коэффициент преломления  $n$  является определенной функцией от частоты или длины волны:  $n = f(\omega)$

или  $n = f(\lambda)$ . Дисперсией вещества называется величина, показывающая, как быстро меняется коэффициент преломления с частотой.

Пусть частоте  $\omega$  соответствует показатель преломления  $n$ , а частоте  $\omega + d\omega$  —  $n + dn$ . Тогда дисперсия вещества  $D$  равна

$$D = \frac{dn}{d\omega}. \quad (54)$$

Если  $D > 0$ , т.е.  $n$  возрастает с увеличением  $\omega$ , то дисперсия называется нормальной дисперсией. Такая дисперсия наблюдается в области прозрачности вещества.

Если  $D < 0$ , т.е.  $n$  убывает с увеличением  $\omega$ , то дисперсия называется аномальной. Такая дисперсия наблюдается в области поглощения вещества.

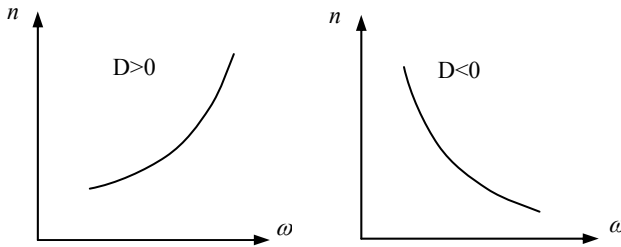


Рис.6. Нормальная и аномальная дисперсии

Вещества отличаются не только показателем преломления, но и формой кривой зависимости  $n$  от  $\omega$ , как говорят, разные материалы обладают различной дисперсией. Опытное изучение явления дисперсии света впервые осуществил Ньютон в 1666г, пропуская белый свет через призму, (хотя само явление разложения света в призме было известно и раньше). Длины волн для белого света лежат в интервале от 400 нм (фиолетовый край) до 800 нм (красный край спектра).

Заслуга Ньютона состоит в проведении тонких опытов, выяснивших зависимость показателя преломления от цвета лучей. В частности Ньютон разработал метод скрещенных призм, наглядно обнаруживающий ход дисперсии.

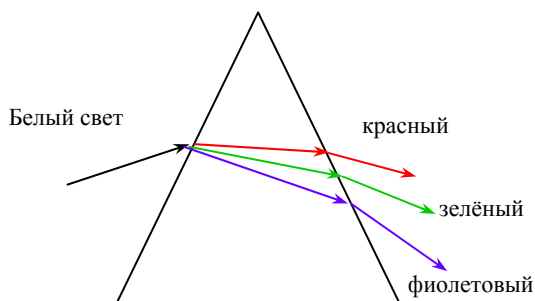


Рис.7. Опытное изучение дисперсии: пропускание белого света через призму

### Примеры решения задач

1. Луч света выходит из стеклянной призмы ( $n = 1,5$ ) под тем же углом, что и входит в нее. Определить угол отклонения  $\varphi$  луча призмой, если ее преломляющий угол  $A = 60^\circ$ .

Дано	Решение
$n=1,5$ $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ $A=60^\circ$	$\beta_1 = \beta_2 = \beta = \frac{A}{2}, \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \quad \sin \alpha =$ $= n \sin \beta = n \sin\left(\frac{A}{2}\right), \quad \alpha = \arcsin\left(n \sin\left(\frac{A}{2}\right)\right),$ $\varphi = 2\alpha - A = \arcsin\left(n \sin\left(\frac{A}{2}\right)\right) - A$
$\varphi - ?$	Ответ: $\varphi = 37^\circ 11''$

2. Определить максимальную скорость вынужденных колебаний свободного электрона, если в точке его нахождения радиопередатчик, работающий на частоте  $500 \text{ кГц}$ , создает поле электромагнитного излучения  $E_0 = 10 \text{ мВ/см}$ .

Дано	Решение
$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ $m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ $\nu = 5 \cdot 10^5 \text{ Гц}$ $E_0 = 1 \text{ В/м}$	$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_{\text{вын}}}{m} \cos \omega t, \quad \omega = 2\pi\nu, \quad \omega_0 = 0,$ $F_{\text{вын}} = E_0 e, \quad \ddot{x} = \frac{eE_0}{m} \cos \omega t,$ $x = v = \frac{eE_0}{m} \sin \omega t, \quad v_{\text{max}} = \frac{E_0 e}{m\omega} = \frac{E_0 e}{2\pi\nu m}$
$v_{\text{max}} - ?$	Ответ: $v = 55,9 \text{ км/с}$



### Задачи для самостоятельного решения

1. Определить концентрацию свободных электронов ионосферы, если для радиоволн с частотой 100 МГц ее показатель преломления 0,92.

2. Показатель преломления воздуха при нормальных условиях для желтой линии натрия вдвое от линий поглощения 1,0002918. Определить показатель преломления воздуха при температуре 300 К и давлении 1,5 МПа.

3. Определить минимальную ускоряющую разность потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы в среде с показателем преломления 1,6 возникло излучение Черенкова-Вавилова.

4. Показатель преломления воды для красного света равен 1,329, а для голубого – 1,337. Какая дисперсия (нормальная или аномальная) наблюдается в воде?

### 6. Квантовая природа излучения

Всякое излучение тела сопровождается потерей энергии. Поэтому излучение может происходить либо за счет убыли энергии самого тела, либо за счет того, что тело получает энергию извне.

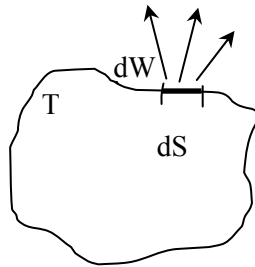


Рис.8. Схема излучения тела

В таких видах излучения как люминесценция, свечение газа в электрическом разряде, энергия, затрачиваемая на излучение, пополняется энергией, поступающей извне.

Наиболее распространенным в природе видом электромагнитного излучения является тепловое излучение. Тепловое излучение происходит за счет внутренней энергии вещества. Оно свойственно всем телам при любой температуре выше  $0^\circ \text{ К}$ . Спектр тепло-

вого излучения является сплошным, т.е. при любой температуре в спектре присутствует излучение всех длин волн. Однако доля энергии, приходящаяся на различные участки спектра, зависит от температуры излучающего тела. Поэтому тепловое излучение называют иногда и температурным излучением.

$$\text{Энергия кванта (фотона)} \quad \varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (55)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $\nu$  - частота излучения;  $c$  - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме;  $\lambda$  - длина волны.

Закон Кирхгофа:

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}, \quad (56)$$

где  $R_{\nu,T}$  - испускательная способность тела,  $A_{\nu,T}$  - поглощательная способность тела;  $r_{\nu,T}$  - спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела.

Энергетическая светимость абсолютно черного тела

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda, \quad (57)$$

Закон Стефана-Больцмана

$$R_e = \sigma \cdot T^4, \quad (58)$$

где  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана;  $T$  - термодинамическая температура.

Энергетическая светимость серого тела

$$R_T^c = A_T \cdot R_e = A_T \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (59)$$

где  $A_T$  – поглощательная способность серого тела;  $R_e$  – энергетическая светимость черного тела;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура.

Закон смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (60)$$

где  $\lambda_{\max}$  – длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости черного тела;  $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м·К - постоянная Вина;  $T$  – термодинамическая температура.

Законы излучения черных тел используются для измерения температуры раскаленных тел. Приборы, служащие для определения температуры по тепловому излучению, называются пирометрами.

Опытным путем установлены следующие основные законы фотоэффекта:

1. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

2. Число фотоэлектронов, вырываемых из катода за единицу времени (т.е. сила фототока) пропорционально интенсивности света.

3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота  $\nu_0$  света, при которой еще возможен фотоэффект. Опыт показывает также, что фотоэффект практически безынерционен.

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{m\nu_{\max}^2}{2} \text{ или } eU_0 = h(\nu - \nu_0), \quad (61)$$

где  $\nu$  – частота падающего фотона;  $h$  – постоянная Планка;  $A$  – работа выхода электрона из металла;  $\frac{m\nu_{\max}^2}{2}$  – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона;  $U_0$  – задерживающее напряжение;  $\nu_0$  – красная граница фотоэффекта.

Красная граница фотоэффекта

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A}, \quad \nu_0 = \frac{A}{h}, \quad (62)$$

где  $\lambda_0$  – максимальная длина волны излучения ( $\nu_0$  – соответственно минимальная частота), при которой фотоэффект еще возможен;  $A$  – работа выхода электрона из металла.

Для объяснения фотоэффекта в принципе достаточно предположить, что свет поглощается квантами. Предположение Эйнштейна о том, что свет и распространяется в виде квантов (фотонов)

в явлении фотоэффекта не проявляется. Эта гипотеза Эйнштейна была подтверждена рядом опытов. Непосредственное подтверждение дал опыт Боте.

Тонкая металлическая фольга  $\Phi$  помещалась между двумя газоразрядными счетчиками. Фольга освещалась слабым пучком рентгеновских лучей, под действием которых она сама становилась источником рентгеновских лучей. Количество квантов, испускаемых фольгой, было невелико. При попадании в счетчик рентгеновских лучей особый механизм  $M$  делал отметку на движущейся ленте  $L$ . Если бы излучаемая энергия распространялась равномерно во все стороны, как это следует из волновых представлений, оба счетчика должны были бы срабатывать одновременно, и отметки на ленте приходились бы одна против другой. В действительности же наблюдалось совершенно беспорядочное расположение отметок. Это можно объяснить лишь тем, что в отдельных актах испускания возникают световые частицы, летящие то в одном, то в другом направлении.

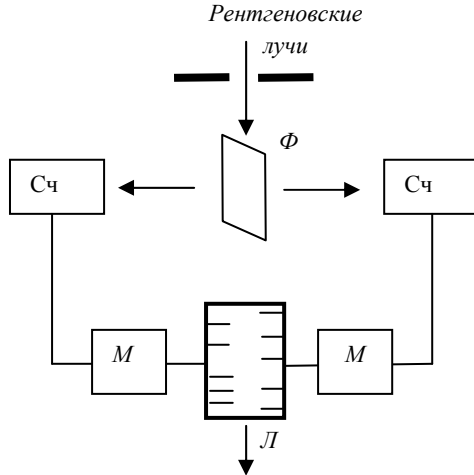


Рис.9. Схема опыта Боте

Так было экспериментально доказано существование особых световых частиц – фотонов.

До сих пор мы использовали только одну характеристику фотона – его энергию. Но как частица фотон должен обладать также массой и импульсом. Наличие у фотона массы вытекает из общей взаимосвязи между энергией и массой в теории относительности.

$$E = mc^2, \quad m = E/c^2. \quad (63)$$

$$\text{Так как для фотона } E_\phi = h\nu, \text{ то } m_\phi = h\nu/c^2. \quad (64)$$

Импульс фотона

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (65)$$

где  $h\nu$  – энергия фотона,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\lambda$  – длина волны.

Для электрона, ускоряемого разностью потенциалов  $U_{\text{уск}}$ :

$$W = mv^2/2 = eU_{\text{уск}}, \quad (66)$$

откуда  $v = \sqrt{2(e/m)U_{\text{уск}}}$ , теперь можно найти импульс и вычислить де-Бройлевскую длину волны:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{2(e/m)U_{\text{уск}}}} = \frac{h}{\sqrt{2emU_{\text{уск}}}}. \quad (67)$$

Если пучок электронов обладает волновыми свойствами, то он должен отражаться от кристалла также, как и рентгеновское излучение, т.е. в соответствии с условием Брэгга-Вульфа:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n=1,2,3\dots). \quad (68)$$

Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность,

$$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = \omega(1 + \rho), \quad (69)$$

где  $E_e = N h \nu$  – энергия  $N$  фотонов, падающих на  $1 \text{ м}^2$  поверхности в  $1 \text{ с}$ ;  $N$  – полное число падающих фотонов,  $\rho$  – коэффициент отражения;  $\omega$  – объемная плотность энергии излучения.

### Примеры решения задач

1. Калий освещается монохроматическим светом с длиной волны  $400 \text{ нм}$ . Определить наименьшее задерживающее напряже-

ние, при котором фототок прекратиться. Работа выхода электронов из калия равна 2,8 эВ.

Дано	Решение
$\lambda=400\text{нм}=4\cdot 10^{-7}\text{м}$ $A=2,2\text{эВ}=3,52\cdot 10^{-19}\text{ Дж}$ $e=1,6\cdot 10^{-19}\text{ Кл}$ $h=6,63\cdot 10^{-34}\text{ Дж}\cdot\text{с}$	$h\nu = A + \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}, \quad \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2} = eU_0, \quad \nu = \frac{c}{\lambda},$ $\frac{hc}{\lambda} = A + eU_0, \quad U_0 = \frac{\frac{hc}{\lambda} - A}{e}$
$U_0 - ?$	Ответ: $U_0 = 0,91\text{ В}$

2. Определить длину волны фотона, импульс которого равен импульсу электрона, прошедшего разность потенциалов  $U = 9,8\text{ В}$ .

Дано	Решение
$E = 1,6\cdot 10^{-19}\text{ Кл}$ $U = 9,8\text{ В}$ $p_e = p$	$eU = \frac{m_e\nu^2}{2}, \nu = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}, p_e = m_e\nu = \sqrt{2m_e eU},$ $p = \frac{h}{\lambda}, p = p_e, \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}.$
$\lambda - ?$	Ответ: $\lambda = 392\text{ нм}$

3. Фотон с энергией  $\varepsilon = 1,025\text{ МэВ}$  рассеялся на первоначально покоившемся свободном электроне. Определить угол рассеяния фотона, если длина волны рассеянного фотона оказалась равной комптоновской длине волны  $\lambda_C = 2,43\text{ пм}$ .

Дано	Решение
$\varepsilon = 1,025\text{ МэВ} =$ $1,64\cdot 10^{-13}\text{ Дж}$ $\lambda' = \lambda_C$ $\lambda_C = 2,43\text{ пм} =$ $= 2,43\cdot 10^{-12}\text{ м}$	$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \lambda = \frac{hc}{\varepsilon},$ $\lambda' = \lambda + \lambda_C(1 - \cos\vartheta), \quad \lambda_C = \frac{hc}{\varepsilon} + \lambda_C(1 - \cos\vartheta),$ $\cos\vartheta = \frac{hc}{\lambda_C\varepsilon}, \quad \vartheta = \arccos\left(\frac{hc}{\lambda_C\varepsilon}\right)$

$\mathcal{G} - ?$	Ответ: $\mathcal{G} = 60^\circ$
-------------------	---------------------------------

4. Давление  $p$  монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 600$  нм на зачерненную поверхность, расположенную перпендикулярно падающему излучению, составляет  $0,1$  мкПа. Определить:

1) концентрацию  $n$  фотонов в световом пучке;

2) число  $N$  фотонов, падающих каждую секунду на  $1 \text{ м}^2$  поверхности.

Дано	Решение
$p = 0,1 \text{ мкПа} = 10^{-7} \text{ Па}$ $\lambda = 600 \text{ нм} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $\rho = 0$ $t = 1 \text{ с}$ $S = 1 \text{ м}^2$	$p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho) = \omega (1 + \rho), \quad n = \frac{\omega}{\varepsilon},$ $\omega = \frac{p}{1 + \rho}, \quad \varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad n = \frac{\lambda p}{hc(1 + \rho)},$ $W = E_e St = \frac{hc}{\lambda} N, \quad E_e = \frac{pc}{1 + \rho},$ $N = E_e = \frac{E_e St \lambda}{hc} = \frac{pcSt\lambda}{hc(1 + \rho)} = \frac{pSt\lambda}{h(1 + \rho)},$ $N = ncSt$
$n - ?$ $N - ?$	Ответ: $n = 3,02 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{-3}$ $N = 9,06 \cdot 10^{19}$

### Задачи для самостоятельного решения

1. При увеличении в 2 раза частоты падающего на металл света задерживающее напряжение для электронов увеличивается в 4 раза. Определить длину волны света, соответствующую красной границе фотоэффекта, если первоначальная длина волны  $600$  нм.

2. При изменении длины волны монохроматического излучения, освещающего фотокатод, максимальная скорость вылетающих электронов увеличилась в 2 раза. Найти конечную длину волны излучения, если начальная длина волны излучения равнялась  $400$  нм, а красная граница фотоэффекта для материала фотокатода составляет  $600$  нм.

3. Пучок ультрафиолетовых лучей с длиной волны  $\lambda = 0,33$  мкм и мощностью  $10$  мВт падает на фотокатод. Определите в мкА

силу фототока, если фотоэффект вызывают лишь 3% падающих фотонов.

4. Угол рассеяния фотона на свободном электроне равен  $30^\circ$ . Угол отдачи электрона равен  $30^\circ$ , а скорость электронов отдачи равна  $2,5 \cdot 10^4$  м/с. Определите энергию падающего фотона, его массу, импульс и частоту.

5. Фотон с длиной волны  $\lambda = 5$  пм испытал комптоновское рассеяние под углом  $\vartheta = 90^\circ$  на первоначально покоившемся электроне. Определить: 1) изменение длины волны при рассеянии; 2) энергию электрона отдачи; 3) импульс электрона отдачи.

6. У фотоэлектронов, вырываемых с поверхности некоторого металла светом с частотой  $2,2 \cdot 10^{15}$  Гц, максимальная энергия равна 6,6 эВ, а у электронов, вырываемых светом с частотой  $4,6 \cdot 10^{15}$  Гц, она равна  $16,5 \cdot 10^{-19}$  Дж. Найдите по этим данным величину постоянной Планка.

7. Определить красную границу фотоэффекта для серебра, если работа выхода равна 4,24 эВ.

8. Красная граница фотоэффекта для платины равна 198 нм. После прокаливании платины она увеличивается до 220 нм. На сколько при этом уменьшается работа выхода (в эВ) электрона?

9. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов в 2 раза больше работы выхода их из некоторого металла. Светом какой частоты освещается металл, если красная граница фотоэффекта составляет 200 нм?

10. Красная граница фотоэффекта для рубидия равна 810 нм. Какова максимальная энергия (в эВ) фотоэлектронов, испускаемых рубидием под действием ультрафиолетовых лучей с длиной волны 100 нм?

11. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна  $1,2 \cdot 10^{15}$  Гц. При какой длине волны света, освещающего металл, максимальная энергия фотоэлектронов будет равна 1,3 эВ?

12. Максимальная энергия фотоэлектронов при освещении металла светом с частотой  $2,2 \cdot 10^{15}$  Гц оказалась в два раза больше, чем при освещении светом с частотой  $4,6 \cdot 10^{15}$  Гц. Найдите работу выхода электрона из металла.



13. Найдите частоту света, вызывающую фотоэффект с поверхности металла, если максимальная энергия фотоэлектронов равна 3 эВ. Фотоэффект начинается при частоте света  $6 \cdot 10^{14}$  Гц.

14. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна 600 нм. Найдите работу выхода (в эВ) электрона из этого металла.

15. На поверхность металла падает электромагнитное излучение с длиной волны 0,1 мкм. Красная граница фотоэффекта – 0,3 мкм. Какая доля энергии фотона расходуется на придание электрону максимальной кинетической энергии?

16. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла равна 275 нм. Чему равно минимальное значение энергии фотона?

17. Максимальная энергия фотоэлектронов при облучении ультрафиолетовым светом платиновой пластинки, равна 3,7 эВ. Если платиновую пластинку заменить другой пластинкой, максимальная энергия возрастает до 6 эВ. Определите работу выхода электронов с поверхности второй пластинки. Работа выхода электронов из платины равна 5,29 эВ.

18. На поверхность лития падает монохроматический свет с длиной волны 310 нм. При этом максимальная энергия фотоэлектронов равна 1,7 эВ. Определите работу выхода лития (в эВ).

19. При фотоэффекте с платиновой поверхности максимальная энергия электронов составляет 0,8 эВ. Найдите длину волны электромагнитного излучения, вызывающего фотоэффект, и определите красную границу фотоэффекта. Работа выхода электронов из платины  $A = 5,29$  эВ.

20. При поочередном освещении поверхности некоторого металла светом с длинами волн 0,35 мкм и 0,54 мкм обнаружили, что соответствующие максимальные скорости фотоэлектронов отличаются друг от друга в два раза. Найдите работу выхода (в эВ) электронов с поверхности этого металла.

21. Найдите длину волны электромагнитного излучения, падающего на платиновую пластинку, если максимальная скорость фотоэлектронов равна 3 Мм/с. Работа выхода электронов из платины  $A = 5,29$  эВ.

22. Определить, при каком задерживающем потенциале прекратится эмиссия электронов с цезиевого катода, освещаемого светом с длиной волны 600 нм.

23. Найдите красную границу фотоэффекта для цинка и максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с его поверхности электромагнитным излучением с длиной волны 250 нм. Работа выхода электрона из цинка равна 3,37 эВ.

24. Максимальная скорость фотоэлектронов, вылетающих из металла с работой выхода 5 эВ под действием гамма-излучения, равна 291 Мм/с. Определите энергию гамма-фотонов (в эВ).

25. Определите максимальную скорость фотоэлектронов, вылетающих из металла с работой выхода 4,5 эВ под действием гамма-излучения с энергией квантов 1,53 МэВ.

26. Найдите энергию и импульс фотона, если соответствующая ему длина волны равна 1,6 пм.

27. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона с длиной волны 520 нм?

28. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона с длиной волны 520 нм?

29. Фотон с энергией 1,02 МэВ рассеялся на свободном электроном, в результате чего энергия стала равна 0,255 МэВ. Под каким углом рассеялся фотон?

30. Фотон, испытав столкновение со свободным электроном, рассеялся под углом  $60^\circ$ . Найдите изменение длины волны рассеянного фотона.

31. Определите угол рассеяния фотона, испытавшего соударение со свободным электроном, если изменение длины волны фотона равно 3,62 пм.

32. Фотон с энергией 250 кэВ рассеялся под углом  $120^\circ$  на первоначально покоившемся свободном электроном. Определите энергию рассеянного фотона.

33. Фотон с энергией 0,25 МэВ рассеялся на свободном электроном. Энергия рассеянного фотона 0,2 МэВ. Найдите угол рассеяния.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Савельев И.В.* Курс физики. Т.2. М.: Лань. 2004. С. 381-384, 400-415.
2. *Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г.* Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.
3. *Калитеевский Н.М.* Волновая оптика. СПб.: Издательство Лань, 2008, 480 с.
4. *Литвинов О.С., Горелик В.С.* Электромагнитные волны и оптика: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. – 448 с. ил. (Физика в техническом университете / Под ред. Л.К. Мартинсона, А.Н.Морозова)
5. *Трофимова Т.И.*, Курс физики: учеб. пособие для вузов / Таисия Ивановна Трофимова. – 11-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. 560 с. ISBN 5-7695-2629-7.
6. *Ташлыкова-Бушкевич И.И.* Физика: учебник. В 2 ч. Ч.2. Оптика. Квантовая Физика. Строение и Физические свойства вещества/ И.И. Ташлыкова-Бушкевич. – 2-е изд., испр. – Минск: Высшая школа, 2014. – 232 с.: ил. ISBN 987-985-06-2506-9.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Свет как электромагнитная волна. Электромагнитные волны....	3
Примеры решения задач .....	6
Задачи для самостоятельного решения .....	7
2. Интерференция света .....	8
Примеры решения задач .....	17
Задачи для самостоятельного решения .....	19
3. Дифракция света .....	22
Примеры решения задач .....	25
Задачи для самостоятельного решения .....	27
4. Поляризация света.....	30
Примеры решения задач .....	33
Задачи для самостоятельного решения .....	34
5. Распространение света в веществе .....	36
Примеры решения задач .....	38
Задачи для самостоятельного решения .....	40
6. Квантовая природа излучения.....	40
Примеры решения задач .....	44
Задачи для самостоятельного решения .....	46
Библиографический список.....	50

# **ФИЗИКА**

## **ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА**

*Методические указания к практическим занятиям  
для студентов специальности 11.05.01*

Сост.: *Е.С. Ломакина*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *Е.С. Ломакина*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 01.12.2021. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 3,0. Усл.кр.-отт. 3,0. Уч.-изд.л. 2,6. Тираж 50 экз. Заказ 1082.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2