

Министерство образования и науки Украины  
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АВТОМОБИЛЬНО-  
ДОРОЖНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям по физике  
(разделы «Волновая оптика. Квантовая физика»)

для студентов-иностранцев подготовительных факультетов  
высших учебных заведений

Утверждено  
Методическим советом университета  
Протокол № от

Харьков 2013

Составители: М.А. Волосюк  
А.П. Кулик

Кафедра естественных и гуманитарных дисциплин

Методические указания к практическим занятиям по физике предназначены для студентов-иностранцев, обучающихся на инженерно-технических специальностях подготовительных факультетов высших учебных заведений.

Методические указания составлены в соответствии с учебной программой по «Физике», рекомендуемой Учебно-методической комиссией по довузовской подготовке иностранных граждан, с учетом требований современной теории обучения на неродном для учащихся языке.

Цель методических указаний – способствовать формированию у иностранных студентов общепрофессиональных и коммуникативных компетенций, необходимых им для успешного овладения курсом физики (разделы «Волновая оптика. Квантовая физика») при обучении на основных факультетах высших учебных заведений технического профиля.

# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Свет - это сложное явление: в одних случаях он ведёт себя как электромагнитная волна, в других - как поток частиц (*фотонов*). Такое свойство называется *корпускулярно-волновым дуализмом* (корпускула - частица, дуализм - двойственность).

**Волновая оптика** изучает явления, в которых проявляется волновая природа света.

Утверждение, что *свет - это поперечные электромагнитные волны*, появилось в результате экспериментальных исследований *интерференции света, дифракции света, поляризации света*, распространения света в веществе.

Явления, обусловленные корпускулярной природой света, изучает **квантовая физика**.

## 1. Когерентность световых волн. Интерференция света

Наиболее наглядно волновые свойства света обнаруживаются в явлениях интерференции и дифракции.

**Когерентными волнами** называются волны одинаковой частоты и постоянной во времени разностью фаз.

При распространении в пространстве нескольких когерентных волн порождаемые этими волнами колебания в одних точках усиливают друг друга, в других - ослабляют. Это явление называется интерференцией волн. Устойчивую интерференционную картину образуют только когерентные волны.

Интерферировать могут волны любой физической природы: звуковые, электромагнитные и т. д.

**Интерференция света** - это явление перераспределения энергии светового излучения в пространстве при наложении когерентных световых волн с образованием устойчивой во времени картины максимумов и минимумов интенсивности света.

Некоторые явления интерференции света исследовались ещё И. Ньютоном в 17 в., но не могли быть им объяснены с точки зрения его корпускулярной теории. Правильное объяснение интерференции света как типично волнового явления было дано в начале 19 в. Т. Юнгом и О. Френелем.

## Интерференция волн.

Допустим, что имеются два точечных источника волн  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 1), которые возбуждают колебания в точке  $C$ , расположенной от источников на расстояниях  $d_1$  и  $d_2$ . Предположим, что колебания от источников  $S_1$  и  $S_2$  когерентны, имеют одинаковые амплитуды и, придя в точку  $C$  будут иметь некоторую разность фаз. Найдем результирующее колебание в точке  $C$ .

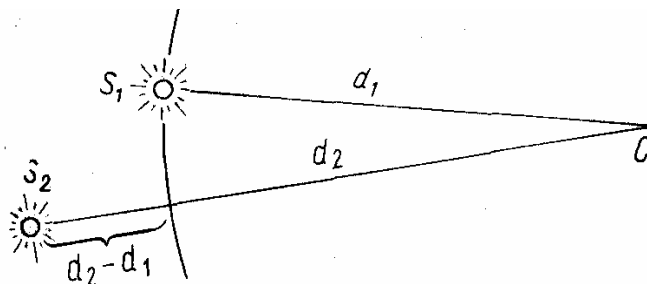


Рисунок 1 – К пояснению геометрической разности хода волн от двух точечных когерентных источников

Амплитуда результирующего колебания в точке  $C$  зависит от разности расстояний  $d_2 - d_1$ , которую называют *геометрической разностью хода* волн, и длины волны падающего света.

Возможны три случая:

1-й случай. Разность хода волн равна четному числу полуволин:

$$d_2 - d_1 = 2k \frac{\lambda}{2}, \text{ где } k \in Z.$$

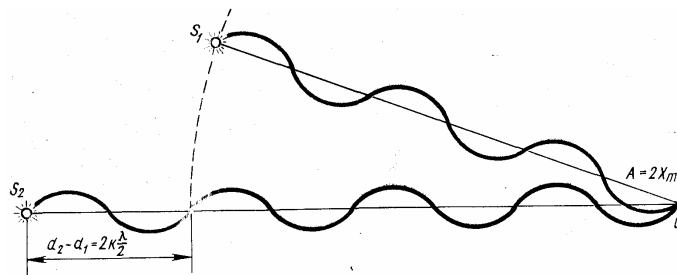


Рисунок 2 – Схема интерференции когерентных волн в точке  $C$  для случая, когда разность хода равна  $2 \frac{\lambda}{2}$

На рисунке 2 схематично показан случай, когда разность хода равна  $2\frac{\lambda}{2}$ . Он аналогичен случаям  $4\frac{\lambda}{2}$ ,  $6\frac{\lambda}{2}$ ,  $8\frac{\lambda}{2}$ .... $2k\frac{\lambda}{2}$ . Во всех этих случаях волны от источников  $S_1$  и  $S_2$  придут в точку  $C$  в одинаковых фазах и усилят друг друга. Амплитуда результирующего смещения в точке  $C$  будет равна удвоенной амплитуде:  $A=2X_m$ .

2-й случай. Разность хода волн равна нечетному числу полу-волн:  $d_2 - d_1 = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ , где  $k \in Z$ .

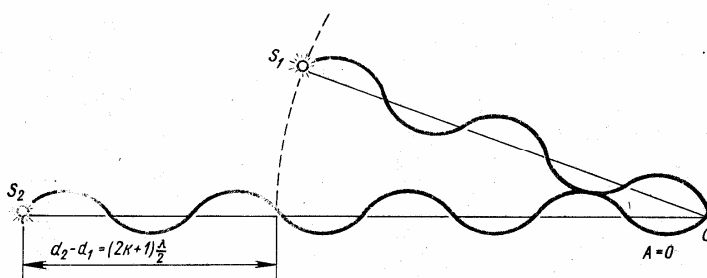


Рисунок 3 – Схема интерференции когерентных волн в точке  $C$  для случая, когда разность хода равна  $3\frac{\lambda}{2}$

На рисунке 3 схематично показан случай, когда разность хода равна  $3\frac{\lambda}{2}$ , что аналогично случаям  $1\frac{\lambda}{2}$ ,  $5\frac{\lambda}{2}$ ,  $7\frac{\lambda}{2}$ .... $(2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ . Во всех этих случаях волны от источников  $S_1$  и  $S_2$  придут в точку  $C$  в противофазе и «погасят» друг друга. Амплитуда результирующей волны в точке  $C$  будет равна нулю:  $A = 0$ .

3-й случай. Разность хода равна не целому числу полу-волн. Волны от источников  $S_1$  и  $S_2$  придут в точку  $C$  с произвольной разностью фаз и будут либо усиливать, либо ослаблять друг друга. Амплитуда результирующего смещения в точке  $C$  будет иметь какое-то промежуточное значение больше нуля и меньше  $2X_m$ :  $0 < A < 2X_m$ .

**Максимальная интенсивность в интерференционной картине наблюдается при разности хода, равной чётному числу**

**полуволн, а минимальная - при разности хода, равной нечётному числу полуволн.**

Пусть когерентные волны получают посредством разделения (с помощью отражений или преломлений) пучка света от одного источника на два в точке  $O$  (рис. 4). До точки  $P$  первая волна проходит путь  $d_1$  в среде с показателем преломления  $n_1$ , вторая волна проходит путь  $d_2$  в среде с показателем преломления  $n_2$ . Тогда  $\Delta = n_2 d_2 - n_1 d_1$  - есть *оптическая разность хода*.

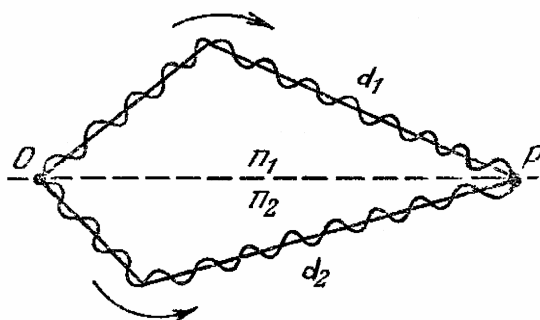


Рисунок 4 – Схема получения когерентных волн посредством разделения пучка света от одного источника на два в точке  $O$

**Условие интерференционного максимума:** оптическая разность хода равна чётному числу полуволн в вакууме:

$$\Delta_{\max} = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad k \in Z.$$

**Условие интерференционного минимума:** оптическая разность хода равна нечётному числу полуволн в вакууме:

$$\Delta_{\min} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad k \in Z.$$

При освещении некоторой поверхности когерентными источниками света на этой поверхности возникают в общем случае чередующиеся светлые и темные области, конфигурация которых определяется геометрией эксперимента и формой источников света.

При освещении поверхности некогерентными источниками освещенность в каждой точке равна сумме освещенностей, создаваемых каждым из источников.

Демонстрация. Явление интерференции.

Интерференция в тонких пленках. Направим световой пучок на пленку мыльного раствора, полученную на проволочном каркасе. Мы заметим на пленке окраску. Меняя положение или угол наклона плёнки по отношению к световому пучку, наблюдаем изменение окраски.

Наблюдаемое явление является результатом интерференции света. Световые волны частично отражаются от поверхности тонкой пленки, частично проходят в нее (рис. 5). На второй границе пленки вновь происходит частичное отражение волн. Когерентность волн, отраженных от наружной и внутренней поверхности пленки, обеспечивается тем, что обе они являются частями одного светового пучка. Между пучками, отраженными от передней и задней границ, возникает оптическая разность хода, зависящая от толщины пленки, её материала и угла падения светового пучка. Когда выполняется условие максимума для одной длины световой волны, то оно не выполняется для других длин волн. Поэтому освещаемая белым светом тонкая бесцветная прозрачная пленка кажется окрашенной. При изменении толщины пленки или угла падения световых волн разность хода изменяется, и условие максимума выполняется для света с другой длиной волны, - плёнка приобретает другую окраску.

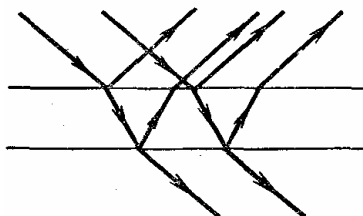


Рисунок 5 – К объяснению явления интерференции света в тонкой плёнке

Интерференцией света объясняется окраска мыльных пузырей и тонких масляных пленок на воде, хотя мыльный раствор и масло бесцветные. Яркую, переливающуюся всеми цветами радуги окраску некоторых раковин, крыльев бабочек, перьев птиц, на поверхности которых расположены тончайшие, незаметные для глаза прозрачные чешуйки, также объясняют интерференцией.



## Применения интерференции.

### 1) Создание «просветленной» оптики.

Для уменьшения световых потерь при отражении света в оптических приборах все стеклянные детали, через которые проходит свет, покрывают пленкой, показатель преломления которой меньше показателя преломления стекла. Толщина пленки равна четверти длины волны.

На оптическую деталь, изготовленную из материала с показателем преломления  $n_3$  (рис. 6), наносится пленка толщиной  $\frac{\lambda}{4}$  из материала, показатель преломления которого  $n_2 < n_3$ . Свет падает на деталь из воздуха, показатель преломления которого  $n_1 < n_2$ . На рисунке для наглядности падающая и отраженные волны показаны отдельно. Отражение от обеих границ пленки происходит с потерей полуволны, так как  $n_1 < n_2$ , а  $n_2 < n_3$ . В этом случае разность хода  $d = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}$  и волны, отраженные от передней и задней границ пленки, ослабляют друг друга. В результате свет этой длины волны проходит в стекло с меньшими потерями на отражение. Это и означает «просветление оптики».

Для того, чтобы расширить спектральный диапазон «просветления», покрытие делают многослойным, например, для синего, зелёного и красного цветов.

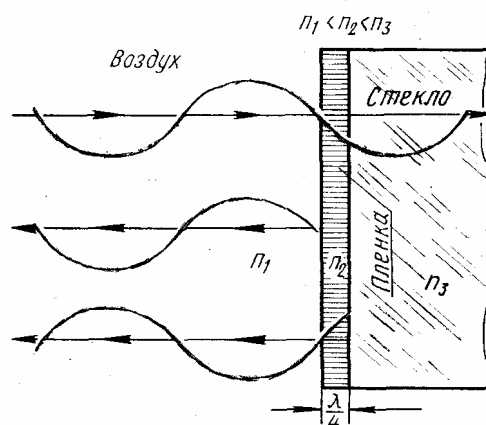


Рисунок 6 – К объяснению эффекта «просветления» оптики

2) Получение хорошо *отражающих покрытий* (интерференционных зеркал), которые широко применяются в лазерной технике.

В этом случае используют тонкую пленку толщиной  $\frac{\lambda}{4}$  из материала, коэффициент преломления которого  $n_2$  больше коэффициента преломления  $n_3$  (рис. 7). В этом случае отражение от передней границы происходит с потерей полволны, так как  $n_1 < n_2$ , а отражение от задней границы происходит без потери полволны ( $n_2 > n_3$ ). В результате разность хода  $d = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2} = \lambda$  и отраженные волны усиливают друг друга.

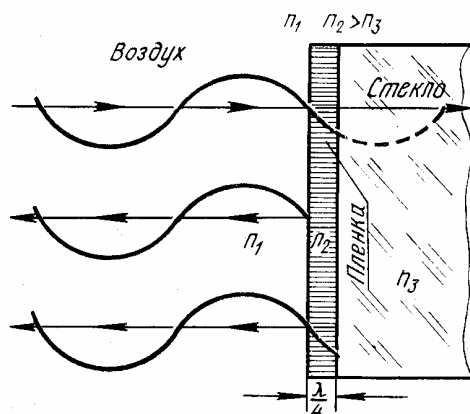


Рисунок 7 – К объяснению способа получения хорошо отражающих покрытий

3) Для *контроля качества обрабатываемой поверхности и точности её геометрической формы*.

На обрабатываемую поверхность накладывают гладкую эталонную пластину. Между поверхностями пластины и детали образуется тонкая плёнка. Неровности поверхности до  $10^{-6}$  м вызывают заметные искривления интерференционных полос, образующихся при отражении света от проверяемой поверхности и нижней грани эталонной пластины.

4) Для получения *интерференционных фильтров*, пропускающих свет строго заданной длины волны (т.е. высокой степени *монохроматичности*) и др.

## Задания к самостоятельной работе

*Задание 1. Прочитайте, напишите, переведите на родной язык новые слова и словосочетания. Запомните их!*

интерференция  
дифракция  
когерентные волны  
разность фаз  
перераспределение энергии  
устойчивая во времени картина  
результатирующее колебание  
геометрическая разность хода  
противофаза  
промежуточное значение  
интерференционная картина  
оптическая разность хода  
условие интерференционного максимума  
условие интерференционного минимума  
когерентный источник света  
чередующиеся светлые и темные области  
интерференция в тонких пленках  
проволочный каркас  
«просветленная» оптика  
отражающее покрытие  
эталонная пластина  
искривление интерференционных полос  
монохроматичные волны

*Задание 2. Ответьте на вопросы. Используйте информацию текста.*

1. Какие волны называются когерентными?
2. Что такое интерференция света?
3. Что такое геометрическая разность хода волн?
4. Что такое оптическая разность хода?
5. Каковы применения интерференции?

*Задание 3. Закончите предложения. Используйте информацию текста.*

Условие интерференционного максимума: ...

Условие интерференционного минимума: ...

*Задание 4. Напишите, как называются эти обозначения. Используйте информацию текста.*

Образец:  $\Delta$  - оптическая разность хода;

$n_1$  - ...

$d_1$  - ...

$n_2$  - ...

$d_2$  - ...

$\Delta$  - ...

$\frac{\lambda}{2}$  - ...

$\frac{\lambda}{4}$  - ...

*Задание 5. Напишите определения понятий по формулам. Используйте информацию текста.*

$$\Delta = n_2 d_2 - n_1 d_1$$

$$\Delta_{\max} = 2k \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta_{\min} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

*Задание 6. Решите задачи.*

#### Примеры решения задач

Задача 1. В некоторую точку пространства приходят световые пучки когерентного излучения с оптической разностью хода лучей 35 мкм. Определить, произойдет усиление или ослабление света в этой точке, если длина волны равна 700 нм.

*Дано:*

$$\Delta = 35 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$\lambda = 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

*Найти:*  $k - ?$

*Решение:*

Оптическая разность хода лучей  $\Delta$  пропорциональна полуволне  $\frac{\lambda}{2}$ :

$$\Delta = k \frac{\lambda}{2}, \quad \text{откуда} \quad \text{коэффициент}$$

$$\text{пропорциональности: } k = \frac{2\Delta}{\lambda}.$$

Подставляем в формулу численные значения и получаем:

$$k = \frac{2 \cdot 35 \cdot 10^{-6}}{0,7 \cdot 10^{-6}} = 100. \quad \text{Так как } k - \text{четное число, то произойдет}$$

максимальное усиление света в данной точке.

*Ответ:* максимальное усиление света.

Задача 2. Для устранения отражения света от поверхности линзы на нее наносят тонкую пленку вещества с показателем преломления 1,25, меньшим, чем у стекла (просветление оптики). При какой наименьшей толщине пленки отражение света с длиной волны 0,72 мкм не будет наблюдаться при нормальном падении лучей?

*Дано:*

$$n = 1,25;$$

$$\lambda = 0,72 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$\alpha = 0^\circ$$

*Найти:*  $d_{\min} - ?$

*Решение:*

Оптическая разность хода лучей, отраженных от нижней и верхней поверхностей пленки при нормальном падении лучей, равна:  $\Delta = 2dn$ , где  $d$  – толщина пленки,  $n$  – показатель преломления пленки.

При отражении световой волны от оптически более плотной среды происходит потеря оптической длины пути на  $\frac{\lambda}{2}$ . По

условию задачи, отражение лучей на обеих поверхностях пленки происходило от оптически более плотной среды и поэтому потери полуволны в обоих случаях компенсируют друг друга.

Условие интерференционного минимума имеет вид:

$\Delta_{\min} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ , где  $k \in Z$ ;  $\lambda$  – длина волны света.

Следовательно,  $2dn = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ , откуда возможные значения

толщины пленки:  $d = \frac{(2k + 1)\lambda}{4n}$ . Наименьшим значением толщины

пленки будет при  $k = 0$ :  $d_{\min} = \frac{\lambda}{4n}$ .

Подставляем в формулу численные значения и получаем:

$$d_{\min} = \frac{0,25 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1,25} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ (м)} = 0,05 \text{ (мкм)}.$$

*Ответ:* наименьшая толщина пленки 0,05 мкм.

### Основные задачи

Задача 1. В некоторую точку пространства приходят два пучка когерентных лучей с оптической разностью хода  $3 \cdot 10^{-6}$  м. Определить, происходит усиление или ослабление света длиной волны 600 нм.

*(Ответ: усиление света).*

Задача 2. Два когерентных световых пучка приходят в некоторую точку с разностью хода 2 мкм. Что произойдет в этой точке, усиление или ослабление света, если свет: 1) красный ( $\lambda_1 = 760$  нм); 2) желтый ( $\lambda_2 = 600$  нм); 3) фиолетовый ( $\lambda_3 = 400$  нм)?

*(Ответ: в первом и втором случаях - ослабление, в третьем - усиление света).*

Задача 3. В воде интерферируют когерентные волны частотой  $5 \cdot 10^{14}$  Гц. Усилится или ослабнет свет в точке, если геометрическая разность хода лучей в ней равна 1,8 мкм? Показатель преломления воды 1,33.

*(Ответ: почти максимально усилится).*

Задача 4. Прозрачная пластинка толщиной 2,4 мкм освещена перпендикулярными оранжевыми лучами с длиной волны 0,6 мкм. Будет ли видна эта пластинка в отраженном свете оранжевой, если ее показатель преломления равен 1,5?

*(Ответ: пластинка будет казаться черной).*

Задача 5. На тонкую пленку ( $n = 1,25$ ) перпендикулярно ее поверхности направлен параллельный пучок оранжевых лучей ( $\lambda = 656$  нм). При какой наименьшей толщине пленка в отраженном свете будет казаться оранжевой?

(Ответ:  $d = 131,2$  нм).

Задача 6. На мыльную пленку с показателем преломления 1,33 падает нормально к ее поверхности белый свет. Какова наименьшая толщина пленки, если в отраженном свете она кажется зеленой ( $\lambda_3 = 550$  нм)?

(Ответ: 0,1 мкм)

### Дополнительные задачи

Задача 1. В некоторую точку пространства приходят световые пучки когерентного излучения с оптической разностью хода 6 мкм. Что произойдет - усиление или ослабление света - в этой точке, если длина волны равна: а) 500 нм; б) 480 нм?

(Ответ: а) усиление; б) ослабление).

Задача 2. На мыльную пленку с показателем преломления 1,33 падает перпендикулярно ее поверхности белый свет. Какова наименьшая толщина пленки, если в отраженном свете она видна желтой? Длина волны желтого излучения 600 нм.

(Ответ:  $d = 0,13$  мкм).

Задача 3. Какую наименьшую толщину должна иметь пластинка, показатель преломления вещества которой 1,54, чтобы при освещении ее красными лучами с длиной волны 750 нм, перпендикулярными поверхности пластинки, она в отраженном свете казалась черной?

(Ответ:  $d = 243,5$  нм).

## **2. Дифракция света. Принцип Гюйгенса - Френеля**

**Дифракция света** – это явление отклонения света от прямолинейного распространения при прохождении вблизи границ инородных тел или сквозь малые отверстия, сопровождающееся проникновением света в область геометрической тени.

Явление дифракции всегда сопровождается интерференцией (интерференция вторичных волн). Дифракционные эффекты зависят

от соотношения между длиной волны и характерным размером неоднородностей среды. Наиболее сильно они проявляются при размерах неоднородностей, сравнимых с длиной волны. Во многих случаях при размерах неоднородностей, существенно превышающих длину волны, явлением дифракции можно пренебречь. В этом случае распространение волн описывается законами *геометрической оптики*. С другой стороны, если размер неоднородностей среды меньше длины волны, то в таком случае обычно говорят о явлении *рассеяния волн*.

Задачи дифракции, имеющие практический интерес, часто решаются приближёнными методами с использованием принципа Гюйгенса - Френеля.

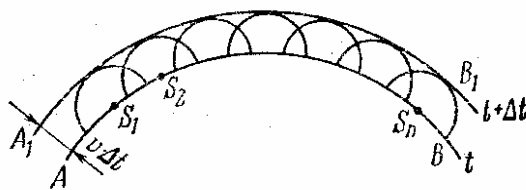


Рисунок 8 – К объяснению принципа Гюйгенса - Френеля

**Принцип Гюйгенса - Френеля:** каждая точка среды, до которой дошла волна, становится самостоятельным источником вторичных когерентных волн. Вторичные волны интерферируют, образуя новый фронт волны (рис. 8).

Принцип Гюйгенса - Френеля позволяет описывать все оптические явления, относящиеся к распределению интенсивности света по разным направлениям (*прямолинейное распространение света, отражение, преломление, дифракцию* и т. д.).

Волны заметным образом огибают препятствия, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны очень мала. Поэтому наблюдать дифракцию света трудно. Приведем примеры опытов, в которых проявляется дифракция света.

Демонстрация. Явление дифракции.

1. Дифракционная картина от круглого отверстия.

Возьмём точечный источник света  $S$ , поставим на некотором расстоянии от него непрозрачную ширму с отверстием радиуса  $r_0$  ( $r_0 \ll a, r_0 \ll b$ ) в точке  $O$  так, чтобы плоскость ширмы была перпендикулярна линии  $SO$  (рис. 9.1 а). При малых отверстиях,



сравнимых с длиной световой волны, за преградой получается расходящийся световой пучок; свет, нарушая прямолинейность распространения, появляется в области геометрической тени, несколько освещая удалённый от ширмы плоский экран. При постепенном открывании отверстия на удалённом экране формируется дифракционная картина в виде концентрических светлых и тёмных колец с постепенным убыванием их яркости (рис. 9.2). В центре картины будет либо светлое, либо тёмное пятно, что зависит от размера отверстия и длин отрезков  $SO = a$  и  $OP = b$ .

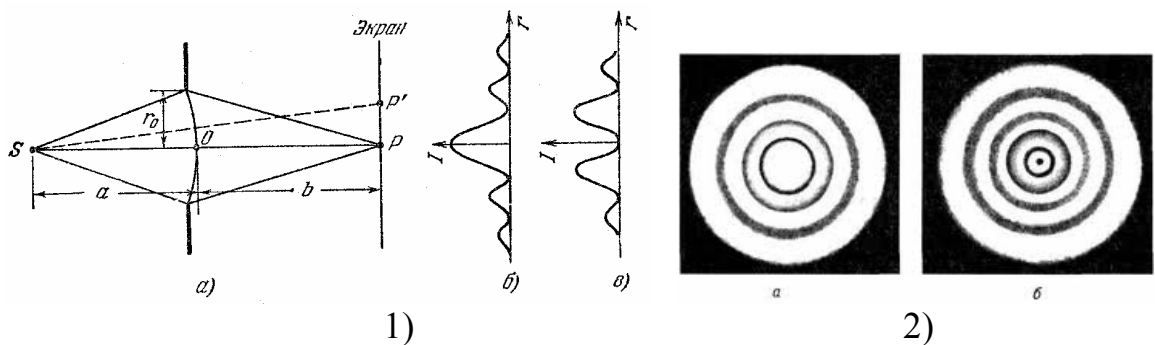


Рисунок 9 – Дифракция на круглом отверстии: 1 а – схема опыта; 1 б, в – графическое распределение интенсивности света в дифракционных кольцах; 2 а, б – фотографии дифракционных колец

## 2. Дифракционная картина от непрозрачного круглого диска.

На фотографии дифракционной картины от круглого малого непрозрачного диска видно, что в центре дифракционной картины на экране всегда наблюдается светлое пятно, окруженное чередующимися темными и светлыми кольцами с постепенным уменьшением яркости от середины к краям дифракционной картины с переходом к общему освещенному фону экрана (рис. 10).

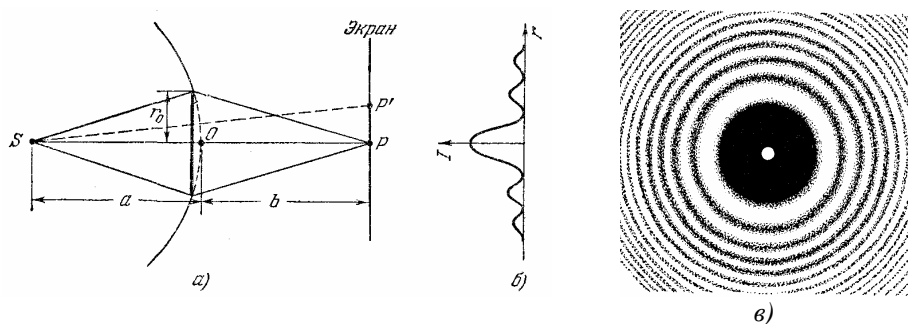


Рисунок 10 – Дифракция на непрозрачном круглом диске: а – схема опыта; б – графическое распределение интенсивности света в дифракционных кольцах; в – фотография дифракционных колец

Пусть небольшой плоский диск освещается точечным источником света, расположенным на оси, проведенной перпендикулярно к центру диска. Каждая точка, прилегающая к краю диска, по принципу Гюйгенса - Френеля является самостоятельным центром колебаний и будет излучать вторичные волны. Так как расстояния от источника света до краев диска одинаковы, то все вторичные волны, отходящие от краев диска, будут иметь одинаковые фазы. Эти лучи придут в точку  $P$  экрана в одной фазе, и, интерферируя, усилят друг друга. Поэтому в центре геометрической тени в точке  $P$  при не слишком большом диске образуется светлое пятно. За пределами геометрической тени формируются чередующиеся светлые и тёмные кольца.

При увеличении размеров непрозрачного диска дифракционная картина из светлых и тёмных колец сужается к краю геометрической тени, становясь постепенно слабо разрешимой, а светлое пятно в центре угасает и исчезает.

### 3. Дифракционная картина от щели.

До сих пор мы рассматривали дифракцию сферических волн, изучая дифракционную картину в точке наблюдения, лежащей на конечном расстоянии от препятствия (*дифракция Френеля*).

Тип дифракции, при котором дифракционная картина образуется параллельными пучками, называется *дифракцией Фраунгофера*. Параллельные лучи проявятся, если источник и экран находятся в бесконечности. Практически используется две линзы: в фокусе одной – источник света, а в фокусе другой – экран (рис. 11).

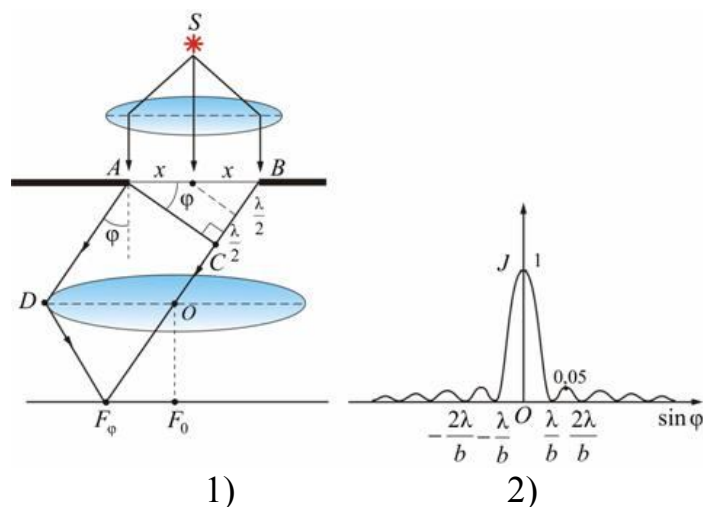


Рисунок 11 – Дифракция Фраунгофера на щели: 1 – схема опыта; 2 – графическое распределение интенсивности света на дифракционной картине

Рассмотрим дифракционную картину, возникающую при прохождении параллельного пучка монохроматического света через щель в непрозрачном экране (рис. 12). На экране наблюдаются дифракционные максимумы, разделенные темными промежутками - минимумами. При увеличении ширины щели дифракционная картина сужается. Ее максимумы и минимумы сближаются и смещаются к центральному максимуму. При уменьшении ширины щели дифракционная картина расширяется. Максимумы и минимумы раздвигаются.



Рисунок 12 – Изменение дифракционной картины с увеличением ширины щели: 1 – фотографии дифракционных полос; 2 - графические распределения интенсивности света в дифракционных полосах

Пусть в экране есть щель: ширина щели  $AB = b$ , длина щели (перпендикулярно плоскости рисунка)  $l \gg b$ . На щель падают параллельные лучи света. В плоскости щели  $AB$  амплитуды и фазы падающих волн одинаковы.

Разобьем щель на зоны так, чтобы оптическая разность хода между лучами, идущими от соседних зон под углом  $\varphi$  к первичному пучку, была равна  $\lambda/2$ . Если на ширине щели укладывается четное число таких зон, то в точке  $F_\varphi$  (побочный фокус линзы) колебания от каждой соседней пары зон будут взаимно гасить друг друга, так что результирующая амплитуда будет равна нулю и будет наблюдаться минимум интенсивности, а если нечетное число зон, то действие одной из них окажется не компенсированным и будет наблюдаться максимум интенсивности.

Следовательно,  $b \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}$  – условие минимума интенсивности;

$b \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$  – условие максимума интенсивности.

Картина будет симметричной относительно главного фокуса точки  $F_0$ . Знак плюс и минус соответствует углам, отсчитанным в ту или иную сторону. Центральный максимум по интенсивности превосходит все остальные.

Рассмотрим влияние ширины щели. Т.к. условие минимума имеет вид  $b \sin \varphi = \pm m\lambda$ , отсюда  $\sin \varphi = \frac{m\lambda}{b}$ . Из этой формулы видно, что с увеличением ширины щели  $b$  положения минимумов сдвигаются к центру, центральный максимум становится резче. При уменьшении ширины щели  $b$  вся картина расширяется, расплывается, центральная полоска тоже расширяется, захватывая все большую часть экрана, а интенсивность ее уменьшается.

#### 4. Дифракционная картина от тонкой нити.

Похожая картина наблюдается, если вместо щели поставить натянутую на рамку проволочку или гладкую капроновую нить. В этом случае в центре дифракционной картины всегда образуется светлая полоса, по бокам которой расположены чередующиеся тёмные и светлые полосы (рис. 13).

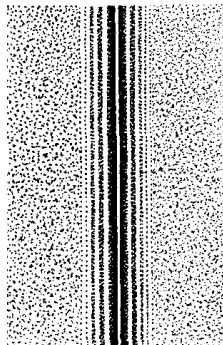


Рисунок 13 – Дифракционная картина от тонкой нити

### 3. Дифракционная решетка

Наблюдение дифракции от одной щели усложняется тем, что через узкую щель проникает очень мало света. Чтобы получить более яркую дифракционную картину, надо пропускать свет через несколько параллельных узких щелей. В этом случае будет происходить интерференция лучей, которые идут от всех щелей, и наибольшая освещённость будет в тех местах экрана, куда приходят

лучи в одинаковой фазе. Поэтому для наблюдения дифракции применяют дифракционные решётки.

Дифракционная решетка представляет собой систему из большого числа  $N$  одинаковых по ширине и параллельных друг другу щелей в экране, разделенных также одинаковыми по ширине непрозрачными промежутками (рис. 14). Обозначим:  $b$  – ширина щели решетки;  $a$  – расстояние между щелями;  $d = a + b$  – постоянная дифракционной решетки.

Пусть на решетку падает монохроматическая волна с плоским волновым фронтом. В результате дифракции из каждой щели свет распространяется не только в первоначальном направлении, но и по всем другим направлениям. Если за решеткой поставить собирающую линзу, то на экране в фокальной плоскости параллельные лучи одного направления от всех щелей соберутся в одну полоску. Линза не вносит никакой дополнительной разности хода.

Фазы колебаний в каждой точке любой из  $N$  щелей совпадают, так как эти точки принадлежат одной волновой поверхности. По принципу Гюйгенса - Френеля, каждая щель является источником когерентных вторичных волн, способных интерферировать. Дифракционная картина определяется как результат взаимной интерференции когерентных вторичных волн, идущих от всех щелей.

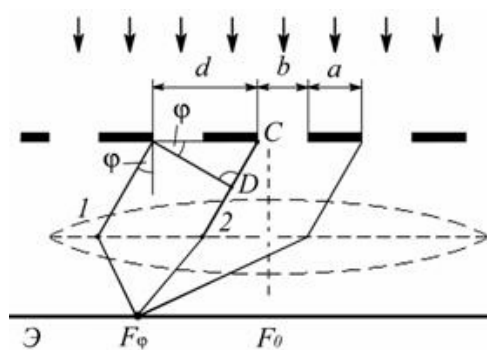


Рисунок 14 – Схема спектрального прибора с дифракционной решеткой

Пусть луч 1 падает на линзу под углом  $\varphi$  (угол дифракции). Световая волна, идущая под этим углом от щели, создает в точке  $F_\varphi$  максимум интенсивности. Второй луч, идущий от соседней щели под этим же углом  $\varphi$ , придет в ту же точку  $F_\varphi$ . Оба эти луча

придут в фазе, и будут усиливать друг друга, если оптическая разность хода  $\Delta = CD = d \sin \varphi$  будет равна  $m\lambda$ , т.е. **условие максимума для дифракционной решетки** будет иметь вид:

$$d \sin \varphi = m\lambda, m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Максимумы, соответствующие этому условию, называются *главными максимумами*. Значение величины  $m$ , соответствующее тому или иному максимуму, называется *порядком дифракционного максимума*. В центре экрана точке  $F_0$  соберутся лучи от всех щелей, идущие под углом  $\varphi = 0$ , т.е. без разности хода. В точке  $F_0$  всегда будет наблюдаться нулевой или центральный дифракционный максимум.

Количество главных максимумов в наблюдаемой дифракционной картине будет зависеть от величин  $d$  и  $\lambda$ . Так как модуль  $\sin \varphi$  не может быть больше единицы, то максимальное число  $m \leq d/\lambda$ . Положение главных максимумов не зависит от числа щелей  $N$ .

Количество щелей определяет световой поток через решетку. Чем их больше, тем большая энергия переносится волной через нее. Интенсивность максимумов определяется общим числом щелей дифракционной решетки. Действительно, разность хода между пучками от всех щелей под углом  $\varphi$  кратна длине волны  $\lambda$ , поэтому амплитуды волн складываются от всех щелей. Если число щелей равно  $N$ , то суммарная амплитуда в  $N$  раз больше, а интенсивность света, которая пропорциональна квадрату амплитуды, больше в  $N^2$  раз, чем в случае одной щели. На рисунке 15 показано распределение интенсивности при дифракции монохроматического света на решетках с различным числом щелей, где  $I_0$  – интенсивность колебаний при дифракции света на одной щели.

Многолучевая интерференция между более далеко расположенными друг от друга щелями создает на экране между главными максимумами дополнительные  $(N-2)$  максимума, разделенные  $(N-1)$  минимумом. Т.е., чем больше число щелей, тем больше дополнительных минимумов помещается между соседними максимумами. Дополнительные максимумы очень малы по

интенсивности и при больших  $N$  становятся практически неразличимыми на фоне ярких главных максимумов.

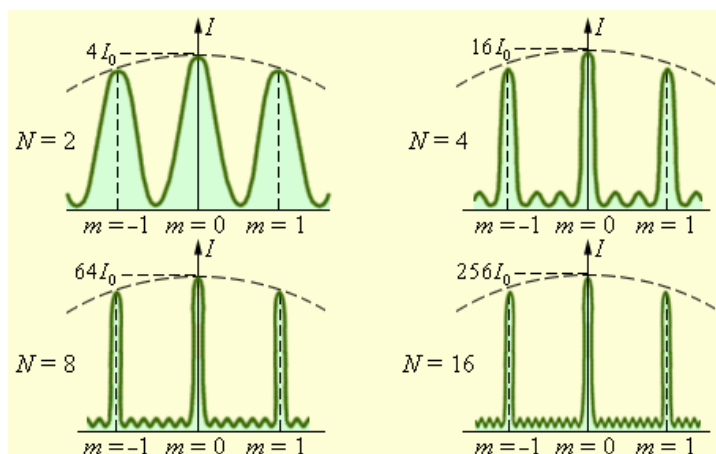


Рисунок 15 – Графики интенсивности при дифракции монохроматического света на решетках с различным числом щелей  $N$

Из условия максимума для дифракционной решетки видно, что угол дифракции пропорционален длине волны  $\lambda$ . Значит, дифракционная решетка разлагает белый свет на составляющие (рис. 16), причем отклоняет свет с большей длиной волны (красный) на больший угол (в отличие от призмы, где зависимость обратная). Центральные нулевые максимумы для всех длин волн будут совпадать, и поэтому в центре экрана будет наблюдаться белая полоса (ахроматический максимум). В отличие от призматического спектра, в котором длинноволновая часть спектра (красная) очень сжата по сравнению с коротковолновой (фиолетовой), у дифракционной решётки спектр растянутый равномерно и тем больше, чем больший его порядок.

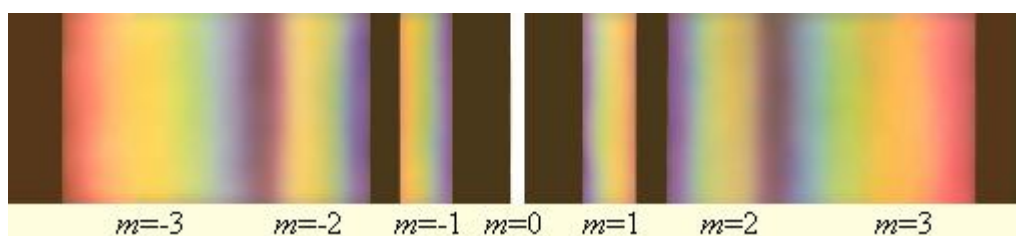


Рисунок 16 – Результат разложения дифракционной решеткой белого света на составляющие

Дифракционная решетка – *спектральный прибор*, она используется для определения спектрального состава света, т.е. для определения длин волн и интенсивностей всех его монохроматических компонентов. Дифракционные *спектрографы, спектроскопы, спектрометры* позволяют проводить химический анализ и изучать строение материалов.

Оптическая схема спектрографа с дифракционной решёткой проста (рис. 17). Щель (2) *коллиматора*, которая параллельна щелям дифракционной решётки (4), освещается источником света (1). Эта щель размещена в главном фокусе линзы (3) коллиматора. Расходящийся пучок света от щели после преломления в этой линзе становится параллельным и падает на дифракционную решётку (4). После прохождения дифракционной решетки лучи одинаковой частоты (одного цвета) параллельны друг другу (отклоняются на одинаковый угол). За решёткой стоит линза (5) спектрографа (объектив зрительной трубы), в главной фокальной плоскости (6) которой все параллельные лучи дают изображения щели (2). Лучи разных частот (цветов) параллельны разным побочным осям линзы, поэтому каждое изображение щели (линия определенной частоты) будет на определенном месте фокальной плоскости (6), образуя спектр.

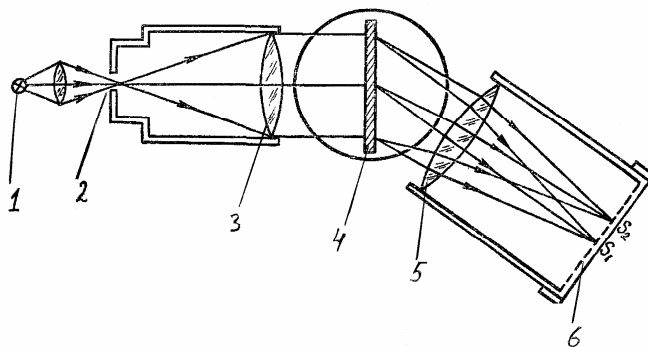


Рисунок 17 – Оптическая схема спектрографа с дифракционной решёткой

Демонстрация. *Наблюдение спектра с помощью дифракционной решетки.*

Параллельный пучок света, пройдя через светофильтр, освещает дифракционную решётку, спектр от которой рассматривается на экране. Помещаем дифракционную решетку на пути света так, чтобы плоскость решетки была перпендикулярна



световому пучку и штрихи были параллельны щели. На экране вместо одного изображения щели видим ряд таких же изображений по обе стороны от среднего яркого. Заменяя, например, красное стекло синим, показываем, что боковые изображения щели в этом случае ближе к среднему. Наконец, направляя белый свет на решетку, демонстрируем дифракционные спектры. Эти спектры обращены своими фиолетовыми концами к центральному белому изображению щели.

Дифракция ограничивает разрешающую силу оптических инструментов, т. е. способность инструментов давать не сливающееся изображение двух близких точек.

Явления интерференции и дифракции света положены в основу *голографии* - метода записи и воспроизведения объемных изображений предметов.

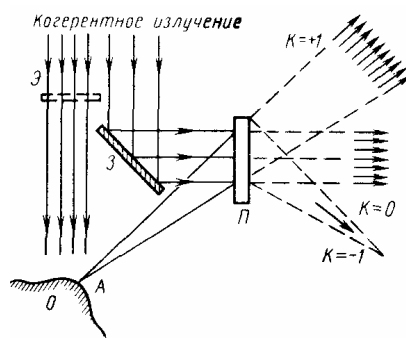


Рисунок 18 – Схема установки для получения голограмм

Голография - метод получения фотографического изображения объекта, основанного на фотографировании результата интерференции двух частей волны, испускаемой когерентным источником. На рисунке 18 показана схема одной из простейших установок для получения изображения предмета. Когерентная световая волна от лазера частично отражается от зеркала З и поступает на фотопластинку П, а частично направляется на объект О и от каждой точки объекта, например как от точки А, попадает на всю освещаемую фотопластинку, интерферируя с плоской опорной волной. Эта интерференционная картина фиксируется на фотопластинке, образуя после проявления голографическую картину, которая дает объемное изображение объекта. Голография

применима к волнам любой природы, любого диапазона частот. Она используется для создания объемного цветного кино и телевидения.

### **Задания для самостоятельной работы**

*Задание 1. Прочитайте, напишите, переведите на родной язык новые слова и словосочетания. Запомните их!*

дифракция света  
геометрическая тень  
интерференция вторичных волн  
размер неоднородностей среды  
принцип Гюйгенса – Френеля  
непрозрачный экран  
дифракционная картина  
прямолинейность распространения  
концентрические кольца  
слабо разрешимая картина  
дифракция Френеля  
дифракция Фраунгофера  
дифракционные максимумы / минимумы  
центральный максимум  
дифракционная решетка  
постоянная дифракционной решетки  
плоский волновой фронт  
порядок дифракционного максимума  
многолучевая интерференция  
ахроматический максимум  
спектральный прибор  
спектральный состав света  
спектрограф  
коллиматор  
светофильтр  
дифракционный спектр  
голография

*Задание 2. Ответьте на вопросы. Используйте информацию текста.*

1. Что такое дифракция света?
2. Назовите примеры опытов, в которых проявляется дифракция света.
3. Что наблюдается на экране при прохождении белого света через дифракционную решетку?
4. В чем отличия дисперсионного спектра белого излучения от дифракционного?
5. Что такое голография?

*Задание 3. Закончите предложения. Используйте информацию текста.*

- Дифракционные эффекты зависят от ...  
Принцип Гюйгенса - Френеля: ...  
Дифракционная решетка представляет собой ...  
Количество главных максимумов в наблюдаемой дифракционной картине будет зависеть от ...  
Количество щелей определяет ...  
Интенсивность максимумов определяется ...

*Задание 4. Напишите, как называются эти обозначения. Используйте информацию текста.*

Образец:  $b$  – ширина щели;

$a$  – ...

$d$  – ...

$\varphi$  – ...

$m$  – ...

*Задание 5. Напишите определения понятий по формулам. Используйте информацию текста.*

$$d = a + b$$

$$d \sin \varphi = m\lambda$$

*Задание 6. Решите задачи.*

Пример решения задачи

Задача. Дифракционная решетка содержит 200 штрихов на каждый миллиметр. На решетку падает нормально монохрома-

тический свет с длиной волны 575 нм. Определить постоянную решетки, наибольший порядок спектра и общее число главных максимумов в дифракционной картине.

*Дано:*

$$N = 200 \text{ мм}^{-1} = 2 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1};$$

$$\lambda = 575 \text{ нм} = 5,75 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

*Найти:*  $d$  - ?  $m_{\text{max}}$  - ?  $n$  - ?

*Решение:*

Число штрихов на единицу длины  $N$  и постоянная дифракционной решетки  $d$  обратно пропорциональны:

$$d = \frac{1}{N}; \quad d = \frac{1}{2 \cdot 10^5} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}.$$

Условие максимума для дифракционной решетки:  $d \sin \varphi = m\lambda$ , где  $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  - порядок дифракционного максимума;  $\varphi$  — угол между направлением на дифракционный максимум и нормалью к решетке;  $\lambda$  - длина волны. Число главных максимумов, даваемых решеткой,  $m_{\text{max}}$  определим из условия, что максимальный угол отклонения лучей не может превышать  $90^\circ$ :

$$m_{\text{max}} = \frac{d \sin \varphi_{\text{max}}}{\lambda}. \quad \text{Подставляя численные значения, имеем:}$$

$$m_{\text{max}} = \frac{5 \cdot 10^{-6} \sin 90^\circ}{5,75 \cdot 10^{-7}} = 8,7.$$

Число  $m_{\text{max}}$  должно быть целым, причем не может быть равным 9, так как в этом случае  $\sin \varphi > 1$ , что невозможно. Следовательно,  $m_{\text{max}} = 8$ .

Общее число главных максимумов  $n = 2m_{\text{max}} + 1$ , поскольку, кроме центрального максимума, наблюдаются симметрично еще  $2m_{\text{max}}$  максимумов.

$$n = 2 \cdot 8 + 1 = 17$$

*Ответ:*  $d = 5 \text{ мкм}$ ;  $m_{\text{max}} = 8$ ;  $n = 17$ .

### Основные задачи

Задача 1. Определите порядок дифракционного максимума, если при нормальном падении на решетку с периодом 1,3 мкм

плоской монохроматической волны длиной 650 нм он наблюдается под углом  $30^\circ$ .

(Ответ: 1).

Задача 2. На дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на 1 мм, нормально падает белый свет. Под каким углом видны красная ( $\lambda_1 = 650$  нм) и зеленая ( $\lambda_2 = 545$  нм) линии в спектре первого порядка?

(Ответ:  $19^\circ$ ;  $16^\circ$ ).

Задача 3. Определите длину световой волны  $\lambda_1$ , если в дифракционном спектре ее линия второго порядка совпадает с положением линии спектра третьего порядка световой волны с  $\lambda_2 = 400$  нм.

(Ответ: 600 нм).

Задача 4. Период дифракционной решетки 2,5 мкм. Сколько максимумов будет содержать спектр, образующийся при нормальном падении на решетку монохроматического света с длиной волны 500 нм?

(Ответ: 11).

Задача 5. Сколько штрихов на каждый миллиметр содержит дифракционная решетка, если при наблюдении в монохроматическом свете ( $\lambda = 0,6$  мкм) максимум пятого порядка отклонен на угол  $\varphi = 18^\circ$ ?

(Ответ: 100).

#### Дополнительные задачи

Задача 1. Дифракционная решетка освещена нормально падающим монохроматическим светом. В дифракционной картине максимум второго порядка отклонен на угол  $\varphi_1 = 14^\circ$ . На какой угол  $\varphi_2$  отклонен максимум третьего порядка?

Задача 2. Дифракционная решетка содержит 200 штрихов на 1 мм. На решетку падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 0,6$  мкм). Максимум какого наибольшего порядка дает эта решетка?

Задача 3. 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?

Задача 4. На дифракционную решетку, содержащую  $n = 400$  штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет ( $\lambda = 0,6$  мкм). Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. Определить угол  $\varphi$  дифракции, соответствующий последнему максимуму.

### Тест для самопроверки

5. При каком условии может наблюдаться интерференция двух пучков света с разными длинами волн?

А. При одинаковой амплитуде колебаний. Б. При одинаковой начальной фазе колебаний. В. При одинаковых амплитуде и начальной фазе колебаний. Г. При постоянной разности хода. Д. Ни при каких условиях.

6. Какие излучения из перечисленных ниже обладают способностью к интерференции: 1 - видимый свет, 2 - радиоволны, 3 - рентгеновские лучи, 4 - инфракрасные лучи?

А. Только 1. Б. Только 1 и 2. В. Только 1, 2 и 3. Г. Только 1, 3 и 4. Д. 1, 2, 3 и 4.

7. Какое из приведенных ниже выражений является условием наблюдения главных максимумов в спектре дифракционной решетки с периодом  $d$  под углом  $\varphi$ ?

А.  $d \sin \varphi = k\lambda$ . Б.  $d \cos \varphi = k\lambda$ . В.  $d \sin \varphi = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ .

Г.  $d \cos \varphi = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ . Д. Среди ответов А - Г нет правильного.

8. На дифракционную решетку с периодом  $d$  перпендикулярно ее плоскости падает параллельный монохроматический пучок света с длиной волны  $\lambda$ . Какое из приведенных ниже условий выполняется для угла  $\varphi$ , под которым наблюдается первый главный максимум?

А.  $\sin \varphi = \frac{\lambda}{d}$ . Б.  $\sin \varphi = \frac{d}{\lambda}$ . В.  $\cos \varphi = \frac{\lambda}{d}$ . Г.  $\cos \varphi = \frac{d}{\lambda}$

Д. Среди ответов А - Г нет правильного.

9. На дифракционную решетку падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda$  (см. рис.). В точке  $D$  наблюдается первый главный максимум. Чему равен отрезок  $AC$ ?

- А.  $\frac{\lambda}{2}$ . Б.  $\frac{\lambda}{2} \sin \varphi$ . В.  $\lambda$ . Г.  $\lambda \sin \varphi$ . Д.  $\frac{\lambda}{\sin \varphi}$ .

#### 4. Поляризация света

Интерференция и дифракция света - явления, подтверждающие волновую природу света. Поляризация света является еще одним явлением, подтверждающим его волновую природу и доказывающим поперечный характер световых волн.

Свет – это электромагнитное излучение. В электромагнитной волне колеблются векторы напряженности электрического и магнитного полей, перпендикулярные друг другу и направлению распространения волны. Как показывает опыт, физиологическое, фотохимическое, фотоэлектрическое и другие действия света вызываются колебаниями вектора напряженности электрического поля. Поэтому этот вектор называют *световым вектором*.

Колебания вектора  $\vec{E}$  в случае *естественного* света имеют всевозможные ориентации, поскольку свет реальных источников состоит из суммы волн, хаотически испускаемых большим числом атомов, со случайной (равновероятной) ориентацией колебаний вектора  $\vec{E}$  в плоскости, перпендикулярной лучу (рис. 19).

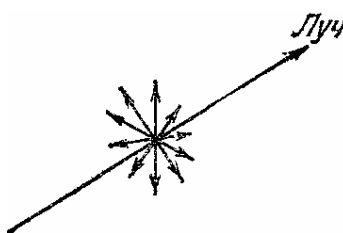


Рисунок 19 – Схематическое изображение колебаний светового вектора в случае естественного света

Свет, в котором направления колебаний упорядочены каким-либо образом, называется *поляризованным* (рис. 20). Если колебания светового вектора происходят только в одной проходящей через луч плоскости, свет называется *плоско-* (или *линейно*) *поляризованным*, а плоскость колебаний вектора  $\vec{E}$  называется *плоскостью поляризации*.

Существуют также *круговая и эллиптическая поляризации*. В первом случае вектор  $\vec{E}$  колеблется не в фиксированной плоскости, а описывает полную окружность при прохождении светом расстояния в одну длину волны; величина вектора при этом остается постоянной. Эллиптическая поляризация аналогична круговой, но только в этом случае конец вектора  $\vec{E}$  описывает не окружность, а эллипс.

Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный, используя поляризаторы.

**Поляризатор** - устройство, преобразующее неполяризованный (естественный свет) или частично поляризованный свет в плоскополяризованный.

В качестве поляризаторов могут быть использованы, например, кристаллы. Турмалин – один из природных кристаллов, широко используемых в качестве поляризатора.

Демонстрация. *Поляризация при прохождении света через кристалл.*

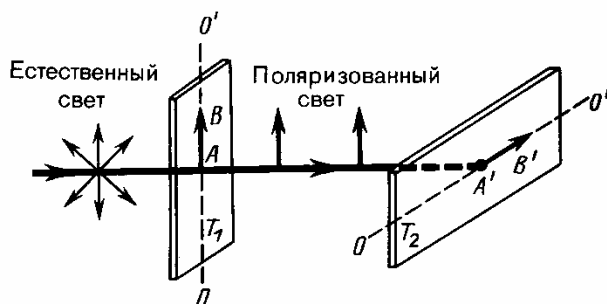


Рисунок 20 – Схема получения поляризованного света при помощи поляризаторов

Направим естественный свет перпендикулярно пластинке турмалина  $T_1$ , вырезанной параллельно *оптической оси*  $OO'$  (направление в кристалле, относительно которого свойства кристаллической решетки симметричны) (рис. 23). Вращая кристалл  $T_1$  вокруг направления луча, никаких изменений интенсивности прошедшего через турмалин света не наблюдаем. Если на пути луча после первой пластины  $T_1$  поставить вторую пластинку турмалина  $T_2$  и вращать ее вокруг направления луча, то интенсивность света, прошедшего через пластинки, меняется в зависимости от угла  $\alpha$



между оптическими осями кристаллов по **закону Малюса** (французский физик Э. Малюс (1775 - 1812)):

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

где  $I_0$  и  $I$  - соответственно интенсивности света, падающего на второй кристалл и вышедшего из него. Следовательно, интенсивность прошедшего через пластинки света изменяется от минимума (полное гашение света) при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  (оптические оси пластинок перпендикулярны) до максимума при  $\alpha = 0$  (оптические оси пластинок параллельны).

Оказывается, первая пластинка поляризует проходящий через нее пучок света, оставляя в нем колебания только одного направления. Эти колебания могут пройти через второй кристалл полностью только в том случае, когда направление их совпадает с направлением колебаний, пропускаемых второй пластинкой, т. е. когда ее ось параллельна оси первой. Если направление колебания поляризованного света перпендикулярно к направлению колебаний, пропускаемых второй пластинкой турмалина, то свет будет полностью задержан. Это имеет место, когда оси кристаллов турмалина составляют угол  $90^\circ$ . Наконец, если направление колебаний в поляризованном свете составляет острый угол с направлением, пропускаемым пластинкой турмалина, то колебания будут пропущены лишь частично.

Пластинка  $T_1$ , преобразующая естественный свет в плоскополяризованный, называется **поляризатором**. Пластинка  $T_2$ , служащая для анализа степени поляризации света, называется **анализатором**. Обе пластинки совершенно одинаковы (их можно поменять местами).

Поляризация света при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков.

Поляризация происходит не только при прохождении света через кристалл, но и при отражении и преломлении на границе двух диэлектриков. При некотором угле падения, называемом **углом Брюстера**  $\varphi_B$ , отраженный свет становится полностью поляризованным, а преломленный – только частично; при этом

отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны. В отраженном луче вектор  $\vec{E}$  параллелен отражающей поверхности. Угол Брюстера связан с относительным показателем преломления двух сред  $n$  соотношением:

$$\operatorname{tg} \varphi_B = n.$$

Это соотношение называют **законом Брюстера**. Для стекла  $\varphi_B \approx 57^\circ$ , для воды  $\varphi_B \approx 53^\circ$ . Если сквозь поляризатор рассматривать блики, отраженные от воды, стекла и т. п., то при определенной ориентации поляризатора блики гаснут целиком или частично. Это свойство поляризаторов находит применение в фотографии.

Часто вместо кристалла применяют *поляроидные пленки (поляроиды)*, представляющие собой множество игольчатых микроскопических кристаллов, расположенных вплотную один к другому и закрепленных в слое тонкой прозрачной пленки. Дешевизна поляроидов и возможность изготовления пластин с большой площадью обеспечили их широкое применение на практике. Вместе с тем у них есть недостатки - они дают окрашенный свет; кроме того, они хорошо работают только в относительно узком спектральном диапазоне.

Демонстрация. *Поляризация света поляроидами.*

Рассмотрим прохождение естественного света последовательно через два поляроида. Первый поляроид играет роль поляризатора. Он превращает естественный свет в линейно поляризованный. Вторым поляроидом служит для анализа падающего на него света.

Пусть линейно поляризованная волна падает на второй поляроид так, что направление колебаний электрического вектора совпадает с направлением оптической оси поляроида (рис. 21.1). Свет пройдет через поляроид и будет воспринят глазом. Повернем поляроид на  $90^\circ$  (рис. 21.2). Тогда плоскость колебаний перпендикулярна главной плоскости кристалла и свет сквозь поляроид не пройдет.

Поляроиды нашли практическое применение в автотранспорте для защиты глаз водителя от ослепляющего действия солнечных

лучей и света фар встречного автотранспорта; в технике применяется поляризационно-оптический метод для исследования механических напряжений в твердых телах.

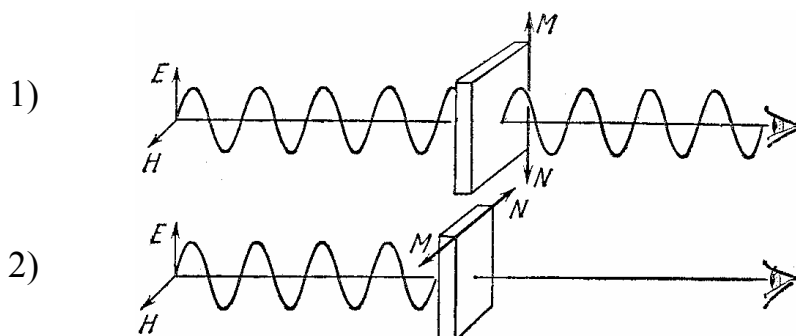


Рисунок 21 – Прохождение линейно поляризованной волны через поляроид:  
 1 - направление колебаний электрического вектора  $\vec{E}$  совпадает с направлением оптической оси  $MN$  поляроида; 2 – направления вектора  $\vec{E}$  и оси  $MN$  взаимперпендикулярны

### Вращение плоскости поляризации.

Поставим на пути светового пучка два поляроида так, чтобы их оптические оси были перпендикулярны друг другу. Свет через эту систему поляроидов не пройдет: первый поляроид превратит естественный свет в линейно поляризованный, который не будет пропущен вторым поляроидом. Поместим теперь на пути светового пучка между поляроидами кювету с раствором сахара. Мы увидим, что поле зрения просветлилось. Повернув поляроид на некоторый угол  $\alpha$ , мы опять добьемся полного затемнения поля зрения.

Таким образом, при прохождении пучка линейно поляризованного света через раствор сахара свет остался линейно поляризованным, но плоскость колебаний и, соответственно, плоскость поляризации повернулись на некоторый угол.

Вещества, вызывающие поворот плоскости поляризации, называются *оптически активными*. Оказывается, угол поворота плоскости поляризации пропорционален концентрации оптически активного вещества в растворе, поэтому с помощью приборов, называемых *поляриметрами* или *сахариметрами*, можно очень быстро и точно определять концентрацию раствора.

Поляриметры широко используются в медицине, биологии, пищевой промышленности для определения концентрации вещества

в растворе. С помощью этих приборов производится, например, предварительная диагностика сахарного диабета.

Явление поляризации света доказывает волновую природу света и поперечность световых волн.

### **Задания для самостоятельной работы**

*Задание 1. Прочитайте, напишите, переведите на родной язык новые слова и словосочетания. Запомните их!*

поляризация света  
фотохимическое действие света  
фотоэлектрическое действие света  
естественный свет  
поляризованный свет  
плоскополяризованный свет  
плоскость поляризации  
круговая поляризация  
эллиптическая поляризация  
закон Малюса  
поляризатор  
анализатор  
оптическая ось кристалла  
угол Брюстера  
ориентация поляризатора  
поляроид  
игльчатые микроскопические кристаллы  
спектральный диапазон  
поляризационно-оптический метод  
затемнение поля зрения  
оптически активное вещество  
поляриметр  
сахариметр

*Задание 2. Ответьте на вопросы. Используйте информацию текста.*

1. Какой свет называется естественным?
2. Какой свет называется поляризованным?

3. Какой свет называется плоско- (или линейно) поляризованным?
4. Что называют плоскостью поляризации?
5. Как можно поляризовать естественный свет?
6. Сформулируйте закон Малюса.
7. Что такое поляроиды?

*Задание 3. Закончите предложения. Используйте информацию текста.*

Поляризатор - устройство, преобразующее ...  
При некотором угле падения, называемом углом Брюстера,...  
Вещества, вызывающие поворот плоскости поляризации, называются ...  
Явление поляризации света доказывает ...

*Задание 4. Напишите, как называются эти обозначения. Используйте информацию текста.*

Образец:  $\varphi_B$  - угол Брюстера;

$I_0$  - ...

$I$  - ...

$n$  - ...

$\alpha$  - ...

*Задание 5. Напишите определения понятий по формулам. Используйте информацию текста.*

$$I = I_0 \cos^2 \alpha$$

$$\operatorname{tg} \varphi_B = n$$

*Задание 6. Решите задачи.*

### Пример решения задачи

**Задача.** Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы свет, отраженный от поверхности воды, был максимально поляризован?

<p><i>Дано:</i></p> $n_1 = 1;$ $n_2 = 1,33$	<p><i>Решение:</i></p> <p>По закону Брюстера угол падения, при котором отраженный свет становится полностью поляризованным, определяется соотношением:</p>
<p><i>Найти:</i> <math>\varphi</math> - ?</p>	

$$\operatorname{tg} \varphi_B = n_2/n_1 ,$$

где  $n_2$  и  $n_1$  - показатели преломления воздуха и воды.

Подставляем численные данные и получаем:  $\operatorname{tg} \varphi_B = 1,33$ , откуда  $\varphi_B = 53^\circ$ . Тогда угол, под которым должно находиться Солнце к горизонту:  $\varphi = 90^\circ - 53^\circ = 37^\circ$ .

*Ответ:* угол Солнца к горизонту  $37^\circ$ .

#### Основные задачи

Задача 1. Пучок света, идущий в воздухе, падает на поверхность жидкости под углом  $54^\circ$ . Определите угол преломления пучка, если отраженный пучок полностью поляризован.

(Ответ:  $36^\circ$ ).

Задача 2. Определите угол полной поляризации при переходе луча из воздуха в алмаз. Показатель преломления алмаза равен 2,42.

(Ответ:  $67^\circ 30'$ ).

Задача 3. Естественный свет падает на кристалл алмаза под углом полной поляризации. Определите угол преломления света. Показатель преломления алмаза 2,42.

(Ответ:  $22^\circ 30'$ ).

Задача 4. Определите угол падения и преломления при полной поляризации отраженного луча от поверхности масляной жидкости ( $n = 1,532$ ).

(Ответ:  $56^\circ 50'$ ;  $33^\circ 10'$ ).

#### Дополнительные задачи

Задача 1. Угол полной поляризации при падении луча на грань топаза равен  $50^\circ 30'$ . Определите показатель преломления топаза.

(Ответ: 1,632).

Задача 2. Пучок естественного света, идущий в воде, отражается от грани алмаза, погруженного в воду. При каком угле падения отраженный свет полностью поляризован? Показатель преломления алмаза 2,42.

(Ответ:  $61^{\circ}12'$ ).

Задача 3. Угол Брюстера при падении света из воздуха на кристалл каменной соли равен  $57^{\circ}$ . Определите скорость света в этом кристалле.

(Ответ: 194 Мм/с).

## 5. Дисперсия света

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению скоростей распространения света в этих средах, а абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света в вакууме к скорости света в данном веществе:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{v_1}{v_2}; \quad n = \frac{c}{v}.$$

Опыты Фуко и Физо экспериментально подтверждают это. Поместив на пути светового пучка в установке для определения скорости света длинную трубку, заполненную водой, они доказали, что скорость света в воде в 1,3 раза меньше, чем в воздухе  $\left( v = \frac{c}{n} \right)$ .

Формула связи скорости  $v$ , длины  $\lambda$  и частоты волны  $\nu$ :

$$v = \lambda \nu.$$

**При переходе света из одной среды (в том числе из вакуума) в другую изменяется скорость света и длина волны, а частота остается неизменной.** Постоянство частоты объясняется тем, что падающая волна с частотой  $\nu$  вызывает *вынужденные* колебания атомных электронов в другой среде с той же частотой. Т.е., меняется именно длина волны:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n},$$

где  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме,  $\lambda$  - длина той же волны в веществе.

Как известно, при переходе из одной среды в другую цвет светового пучка остается неизменным; следовательно, одному и тому же цвету соответствует определенная частота, но в разных средах неодинаковая длина световой волны.

***Цвет света определяется частотой, а не длиной волны.***

Таблица 1 иллюстрирует, каким диапазонам частот и длин волн в вакууме соответствуют отдельные области непрерывного спектра (деление спектра по цветовым областям условное).

**Таблица 1 – Деление спектра видимого света в вакууме по цветовым областям**

Диапазон		Цвет области спектра
частот $\nu$ , ТГц	длин волн в вакууме $\lambda$ , нм	
395 - 484	760 - 620	Красный
395 - 484	620 - 585	Оранжевый
512 - 521	585 - 575	Желтый
521 - 625	575 - 480	Зеленый
625 - 666	480 - 450	Синий
666 - 750	450 - 400	Фиолетовый

***Дисперсией*** называется зависимость скорости света в веществе (значит, и показателя преломления) от частоты волны.

В вакууме нет дисперсии, и скорость любых электромагнитных волн здесь одна и та же, равная  $c$ . В веществе же скорость света зависит от частоты; следовательно, и показатель преломления  $n = c/\nu = f(n)$  есть функция частоты. Для видимого света представление об этом дает таблица 2 (для воды).

За счет дисперсии происходит спектральное разложение белого света, но это же явление происходит и при интерференции, и при дифракции, и при поляризации света. ***Спектральным разложением***, как уже говорилось, называется разложение белого света на монохроматические компоненты. Спектральное разложение было впервые исследовано Ньютоном в 1672 г. именно в опытах с дисперсией света.



Таблица 2 – Данные о дисперсии видимого света в воде

Частота $\nu$ , ТГц	456,8	508,7	616,7	755,3
Длина световой волны в вакууме $\lambda$ , нм	656,3	589,3	486,1	369,9
Цвет (область спектра)	Красный	Желтый	Синий	Фиолетовый
Показатель преломления воды $n$ при 20 °С	1,331	1,333	1,337	1,343
Скорость света в воде $\nu$ , $10^8$ м/с	2,252	2,249	2,242	2,232

Демонстрация. Явление дисперсии.

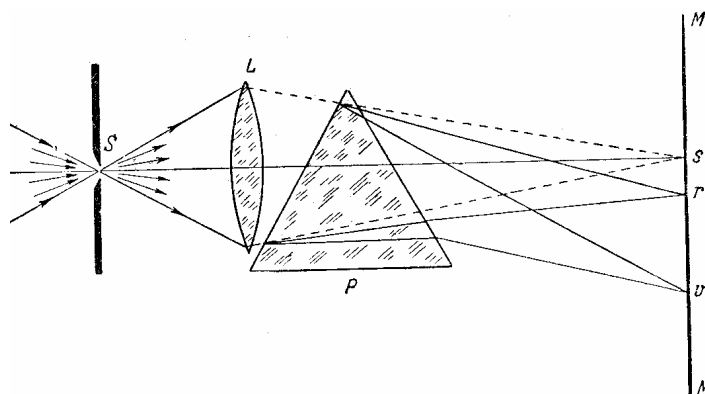


Рисунок 22 – Схема установки для демонстрации дисперсии света

Белый свет освещает узкое отверстие  $S$  (щель) (рис. 22). При помощи линзы  $L$  изображение щели получается на экране  $MM$  в виде белого прямоугольника  $s$ . Поместив на пути лучей призму  $P$ , ребро которой параллельно щели, обнаружим, что изображение щели сместится и превратится в окрашенную полоску  $ru$ , переходы цветов в которой от красного к фиолетовому подобны радуге. Цветную полоску на экране называют *сплошным спектром*.

Если прикрыть щель  $S$  цветным стеклом, т. е. если направлять на призму вместо белого света цветной, изображение щели сведется

к цветному прямоугольнику, располагающемуся на соответствующем месте спектра, т. е. в зависимости от цвета свет будет отклоняться на различные углы от первоначального изображения  $s$ .

Если с помощью второй призмы, повернутой на  $180^\circ$  относительно первой, собрать все пучки спектра, то опять получится белый свет.

Если в экране  $MM$ , на котором получается спектр, прорезать отверстие и выпустить через отверстие узкий пучок лучей того или иного цвета, то такой выделенный пучок, преломляясь во второй призме, уже не растягивается в полоску. Такому пучку соответствует определенный показатель преломления, значение которого зависит от цвета выделенного пучка.

Сопоставляя подобные наблюдения, Ньютон сделал вывод:

1) свет различного цвета характеризуется разными показателями преломления в данном веществе (дисперсия);

2) белый цвет является совокупностью простых цветов.

Поскольку фиолетовый свет испытывает наибольшее отклонение, а красный - наименьшее, то можно сделать вывод, что в веществе скорость распространения коротковолнового излучения видимого участка спектра меньше, чем длинноволнового. Значит, из определения  $n$  следует, что показатель преломления для фиолетового света больше, чем для красного.

Дисперсия возникает вследствие взаимодействия частиц вещества со световой волной, и это явление обязательно связано с поглощением света - превращением части энергии электромагнитной волны во внутреннюю энергию вещества.

Максимальное поглощение энергии возникает при резонансе, когда частота вынуждающей силы (в данном случае световой волны) совпадает с собственной частотой гармонических осцилляторов (в данном случае атомов и молекул вещества). Этим объясняются два эффекта:

1) Различная прозрачность вещества для разных участков спектра. Так, обычное оконное стекло прозрачно для видимого света и плохо пропускает инфракрасные и особенно ультрафиолетовые лучи. Это свойство вещества используется в производстве светофильтров.

2) *Различная отражательная способность вещества для разных участков спектра, т. е. в конечном итоге цвета тел.* Так, пусть при освещении некоторого тела дневным светом оно кажется зеленым. Значит, это тело хорошо отражает волны зеленого участка спектра и сильно поглощает остальные. Следовательно, если тело осветить красным светом, то оно его поглотит и ничего отражать не будет: тело будет нам казаться черным, что и подтверждается в эксперименте.

Таким образом, *цвет прозрачного тела определяется составом того света, который проходит сквозь это тело; цвет непрозрачного тела определяется составом того света, который отражается от этого тела.*

Для всех прозрачных бесцветных веществ с уменьшением длины волны показатель преломления увеличивается, такую дисперсию называют *нормальной*.

Дисперсию света называют *аномальной*, если с уменьшением длины волны показатель преломления вещества уменьшается. Аномальная дисперсия наблюдается в области частот, где происходит сильное поглощение света в данном веществе. Так, у обыкновенного стекла эти области лежат в инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра.

В природе никаких красок нет, есть только излучения, которые отличаются друг от друга частотами колебаний (или длинами волн). Цветность светового излучения является физиологическим свойством глаза. Глаз воспринимает электромагнитные частоты как красные, голубые или другие цветные лучи.

Открытие явления разложения белого света на цвета при преломлении позволило объяснить образование радуги и других подобных атмосферных явлений. Преломление света в водяных капельках или ледяных кристалликах, плавающих в атмосфере, сопровождается, благодаря дисперсии в воде или льде, разложением солнечного света. Рассчитывая направление преломления лучей в случае сферических водяных капель, мы получаем картину распределения цветных дуг, точно соответствующую наблюдаемым в радуге. Аналогично, рассмотрение преломления света в кристалликах льда позволяет объяснить явления кругов вокруг

Солнца и Луны в морозное время года, образование так называемых ложных солнц, столбов и т. д.

## 6. Виды спектров. Спектральный анализ

### Спектральные аппараты.

Для получения спектров используется дифракционная решетка (см. рис. 14) или чаще призма.

Рассмотрим устройство призматического спектрографа (рис. 23).

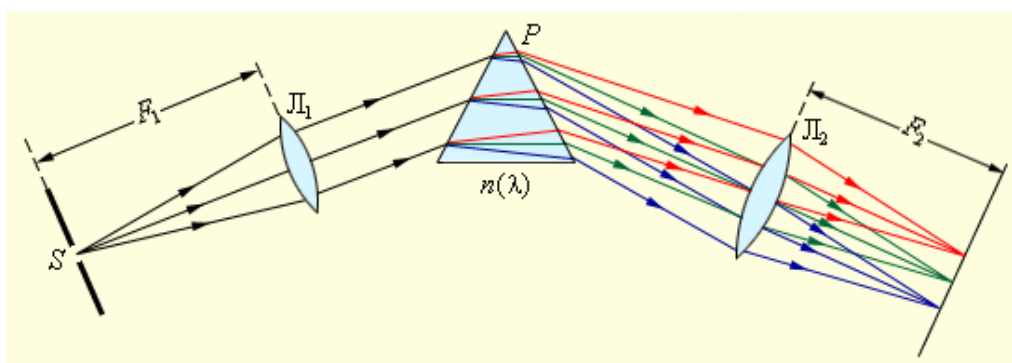


Рисунок 23 – Схема спектрального прибора с призмой

Основной частью спектрографа является призма  $P$ , на которую с помощью щели  $S$  и объектива  $L_1$  коллиматора  $SL_1$  проектируются исследуемые лучи, причем щель коллиматора помещается в главной фокальной плоскости объектива. Так как лучи разной длины волны (разного цвета) отклоняются призмой на разные углы (вследствие дисперсии), то из призмы выходят параллельные пучки разного направления. Прошедшие через призму  $P$  лучи с помощью второго объектива  $L_2$  собираются на экран, который располагают в фокальной плоскости этого объектива. Если свет, падающий на щель  $S$ , представляет собой смесь нескольких монохроматических пучков, то спектр имеет вид отдельных изображений щели в разных длинах волн (цветах), т. е. имеет вид отдельных узких линий, разделенных темными промежутками. Если на щель падает белый свет, то все отдельные изображения щели сливаются в цветную полосу.

Если спектр фиксируется на экране с помощью фотопластинки, то аппарат называют *спектрографом*, если наблюдается на экране визуально, то *спектроскопом*.

Таким образом, с помощью призмы, так же как и с помощью дифракционной решетки, можно разложить свет в спектр, и определить его спектральный состав. Между спектром, даваемым дифракционной решеткой, и спектром, даваемым призмой, имеются существенные различия.

1. Дифракционная решетка разлагает падающий свет непосредственно по длинам волн падающего света, благодаря чему возможно по измеренным углам, образованным направлениями соответствующих дифракционных максимумов, вычислить длину волны. Призма разлагает падающий пучок света по величинам коэффициента преломления, поэтому вычисляют длину волны путем градуировки призмного спектрографа с помощью уже известного спектра.

2. Порядок расположения составных цветов в спектре призмы и в спектре дифракционной решетки различен. В дифракционной решетке синус угла отклонения (а при малых углах просто угол отклонения) пропорционален длине волны. Следовательно, угол отклонения возрастает с увеличением длины волны. В результате красные лучи, имеющие большую длину волны (0,7 мк), отклонятся дифракционной решеткой сильнее, чем фиолетовые лучи (длина волны 0,4 - 0,42 мк). Призма разлагает лучи в спектр по величине коэффициента преломления, коэффициент же преломления в прозрачных веществах падает с увеличением длины волны. Коэффициент преломления красных лучей меньше, чем фиолетовых, поэтому призма отклоняет их слабее, чем фиолетовые лучи.

3. В дифракционном спектре ширина цветных полос, соответствующих цветным лучам белого излучения, примерно одинакова, поэтому равномерный дифракционный спектр называется *нормальным*. Дисперсионный (призматический) спектр белого излучения неравномерный, он сжат в области красно-оранжевого излучения и растянут в области сине-фиолетового.

Несмотря на недостатки определения спектрального состава с помощью призмного спектрографа (необходимость градуировки, различная дисперсия в различных участках спектра), они находят

широкое применение для целей спектрального анализа. Вызвано это тем, что изготовление хороших призм значительно проще, чем изготовление хороших дифракционных решеток, к тому же в призматических спектрографах легче получить большую светосилу.

#### Виды спектров.

Спектр нагретого вещества в атомарном газообразном состоянии состоит из узких линий разного цвета, представляющих собой изображение щели спектрографа в отдельных длинах волн. Каждая «линия» представляет по существу узкий спектральный интервал, охватывающий некоторый набор длин волн; но интервал этот так узок, что его можно практически считать соответствующим одной определенной длине волны. Такой спектр называется **линейчатым спектром излучения**. Для получения линейчатого спектра излучения исследуемое вещество нужно нагреть до высокой температуры, достаточной для перевода вещества в газообразное состояние и возбуждения атомов. Обычно для этой цели используют *дуговой* или *искровой разряд*. Линейчатый спектр излучения у каждого химического элемента свой, не совпадающий со спектром ни одного другого химического элемента.

При изучении спектров излучения нагретых паров или газов в молекулярном состоянии наблюдаются спектры, состоящие из отдельных полос, разделенных темными промежутками. Некоторые из этих полос состоят из очень большого числа отдельных линий, другие же представляют собой действительно сплошные полосы. Такой спектр называется **полосатым спектром излучения**. В молекуле атомы взаимодействуют друг с другом: электроны одного из входящих в молекулу атомов взаимодействуют не только с ядром собственного атома, но и с ядрами и электронами других атомов. Поэтому резко увеличивается число возможных значений частот световых волн, которые может испускать молекула, и линии, соответствующие возможным частотам волн, сливаются в полосы.

Спектр излучения нагретых твердого тела, жидкости или сильно сжатого газа **сплошной**, т.е. в излучении присутствуют волны любых частот. В твердых телах или жидкостях, а также сильно сжатых газах электроны взаимодействуют с огромным числом атомных ядер и других электронов. А это означает, что

вещество в концентрированном состоянии испускает волны со всевозможными, очень близкими друг к другу частотами.

Если пучок белого света проходит через вещество в газообразном состоянии, то при разложении пучка света в спектрографе на сплошном спектре излучения обнаруживаются темные линии, т.е. волны соответствующей длины сильно поглощаются рассматриваемой средой. Такие спектры называют **спектрами поглощения**. Вид спектра поглощения зависит от рассматриваемого вещества. **Линии поглощения любого атома точно соответствуют линиям спектра этого атома при испускании**. Т.е., всякое вещество поглощает те частоты, которые само может испускать.

Сравнивая положение линий поглощения с линиями испускания различных элементов, можно определить состав поглощения паров. Такое сравнение позволило установить состав атмосферы, окружающей Солнце и некоторые другие звезды.

#### Спектральный анализ.

Метод определения качественного и количественного состава вещества по его спектру называется **спектральным анализом**.

Атомы каждого химического элемента и молекулы каждого вещества обладают индивидуальным, присущим только им набором линий в спектрах испускания и поглощения света. По существованию в спектре определенных спектральных линий можно судить о присутствии какого-либо элемента в изучаемой смеси (о химическом составе смеси), т.е. делать **качественный спектральный анализ**.

По интенсивности линий можно судить о процентном содержании тех или иных элементов, т. е. проводить **количественный спектральный анализ**.

При помощи спектрального анализа можно обнаружить элемент даже в том случае, когда количество этого элемента очень мало ( $10^{-7}$  -  $10^{-10}$  г). При его помощи были открыты неизвестные элементы (*рубидий, цезий, таллий, индий, галлий*). В 1895 г. в спектре Солнца были установлены новые линии, которые были приписаны новому газу, получившему название *гелий* (от греческого слова *г е л и о с* - солнце). Некоторое время спустя на Земле был обнаружен в чистом виде гелий.

В настоящее время благодаря спектральному анализу мы имеем сведения о структуре и атомном составе Вселенной и установили, что она построена из тех же элементов, которые имеются и на Земле. Например, при помощи спектрального анализа установлено, что атмосфера Солнца содержит (по объему): водорода - 81,76%, кислорода - 0,03%, гелия - 18,17%, магния - 0,02%, азота - 0,01%, углерода - 0,003%, железа - 0,0008%. Изучая спектры, ученые смогли определить не только химический состав небесных тел, но и их температуру. По смещению спектральных линий можно определять скорость движения небесного тела.

Применение спектрального анализа: в химических, биологических и медицинских исследованиях; в геологии (для определения состава руд, при поисках полезных ископаемых); в охране природы (для исследования степени загрязнения воздуха и т.п.); в пищевой промышленности (для установления вредных примесей в пищевых продуктах) и т. д.

### **Задания для самостоятельной работы**

*Задание 1. Прочитайте, напишите, переведите на родной язык новые слова и словосочетания. Запомните их!*

дисперсия света

непрерывный (сплошной) спектр

спектральное разложение

монохроматические компоненты

светофильтр

прозрачность вещества

отражательная способность вещества

коэффициент преломления

физиологическое свойство

спектральный анализ

призматический спектрограф

дифракционный спектрограф

объектив коллиматора

фокальная плоскость объектива

монохроматический пучок

спектроскоп



спектральный состав  
градуировка спектрографа  
равномерный дифракционный спектр  
качественный состав вещества  
количественный состав вещества  
смещение спектральных линий

*Задание 2. Ответьте на вопросы. Используйте информацию текста.*

- 1) Что такое дисперсия?
- 2) Что называется спектральным разложением?
- 3) Чем определяется цвет прозрачного тела?
- 4) Чем определяется цвет непрозрачного тела?
- 5) Какую дисперсию называют нормальной?
- 6) Какую дисперсию называют аномальной?
- 7) Какие виды спектров вы знаете?
- 8) Что представляет собой линейчатый спектр излучения?
- 9) В каком состоянии вещество дает линейчатый спектр излучения?
- 10) Что представляет собой полосатый спектр излучения?
- 11) В каком состоянии вещество дает полосатый спектр излучения?
- 12) Что представляет собой сплошной спектр излучения?
- 13) В каком состоянии вещество дает сплошной спектр излучения?
- 14) Что представляет собой линейчатый спектр поглощения? Как его можно получить?

*Задание 3. Закончите предложения. Используйте информацию текста.*

При переходе света из одной среды (в том числе из вакуума) в другую изменяется...

Цвет света определяется...

Свет различного цвета характеризуется разными....

Белый цвет является...

Скорость распространения коротковолнового излучения видимого участка спектра...

Показатель преломления для фиолетового света...  
Поглощение света - превращение части...  
Максимальное поглощение энергии возникает при...  
Различная прозрачность вещества для...  
Различная отражательная способность вещества для...  
В природе никаких красок нет, есть только...  
Цветность светового излучения является...  
Дифракционная решетка разлагает падающий свет по...  
Призма разлагает падающий пучок света по величинам...  
Порядок расположения составных цветов в спектре призмы и в спектре дифракционной решетки...  
В дифракционном спектре ширина цветных полос...  
Дисперсионный (призматический) спектр белого излучения...  
Линии поглощения любого атома точно соответствуют...  
Всякое вещество поглощает те частоты, которые...

*Задание 4. Напишите, как называются эти обозначения. Используйте информацию текста.*

Образец:  $n_{21}$  - относительный показатель преломления второй среды относительно первой;

$\nu$  - ...

$c$  - ...

$n$  - ...

$\lambda$  - ...

$\lambda_0$  - ...

$\nu$  - ...

*Задание 5. Напишите определения понятий по формулам. Используйте информацию текста.*

$$\frac{\sin \delta}{\sin \alpha} = n_{21} = \frac{\nu_1}{\nu_2}$$

$$\nu = \frac{c}{n}$$

$$\nu = \frac{LH}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$n = c/v = f(\lambda)$$

Задание 6. Решите задачи.

#### Основные задачи

Задача 1. Длина волны желтого света в вакууме равна  $5,9 \cdot 10^{-7}$  м. Какова частота колебаний в такой волне?

(Ответ:  $5,1 \cdot 10^{14}$  Гц)

Задача 2. Какая частота колебаний соответствует красным лучам видимого света, длина волны которых в вакууме  $7,6 \cdot 10^{-7}$  м?

(Ответ:  $4 \cdot 10^{14}$  Гц)

Задача 3. Определить скорость света в глицерине, если абсолютный показатель преломления его 1,47.

Задача 4. Поверхность воды освещена красным светом, длина волны которого 0,7 мкм. Какова длина волны в воде? Какой цвет увидит человек, открыв глаза под водой? Показатель преломления воды  $n = 1,33$ .

Задача 5. Показатель преломления воды при 20 °С для различных монохроматических лучей видимого излучения находится в интервале от 1,33 до 1,3428. Какое из этих значений является показателем преломления фиолетовых лучей? Почему?

(Ответ: 1,3428).

Задача 6. В вакууме длина волны синего луча равна 460 нм, желтого - 580 нм. Показатель преломления какого луча больше при прохождении их через стеклянную призму? Объясните.

(Ответ:  $n_c > n_{ж}$ ).

Задача 7. Показатель преломления стекла для красного луча 1,513, а фиолетового – 1,532. Найдите скорость этих лучей в стекле.

(Ответ:  $v_k = 1,982 \cdot 10^8$  м/с,  $v_{\phi} = 1,958 \cdot 10^8$  м/с).

#### Дополнительные задачи

Задача 1. Наибольшая частота электромагнитных колебаний, воспринимаемых глазом, равняется  $7,5 \cdot 10^{14}$  Гц. Чему равна длина волны в воздухе, соответствующая этой частоте?

(Ответ:  $4,0 \cdot 10^{-7}$  м)

Задача 2. Длина световой волны в воде 435 нм. Какова длина этой волны в воздухе?

(Ответ: 579 нм).

Задача 3. Скорость распространения света в алмазе 124000 км/с. Найдите показатель преломления алмаза.

(Ответ: 2,42).

Задача 4. Скорость желтого света в воде 225000 км/с, а в стекле 198200 км/с. Найдите показатель преломления стекла относительно воды.

Задача 5. Показатель преломления стекла для оранжевых лучей равен 1,514, а для синих - 1,528. Какие лучи имеют большую длину волны в вакууме?

(Ответ: оранжевые лучи имеют большую длину волны в вакууме, чем синие).

Задача 6. Показатель преломления воды для красного луча 1,331, а фиолетового – 1,343. Найдите скорость этих лучей в воде.

(Ответ:  $v_k = 225400$  км/с,  $v_\phi = 223400$  км/с).

### Тест для самопроверки

1. Как изменяется частота света при переходе из вакуума в прозрачную среду с абсолютным показателем преломления  $n = 2$ ?

А. Увеличивается в 2 раза.      Б. Остается неизменной.  
В. Уменьшается в 2 раза.      Г. Изменение зависит от угла падения.  
Д. Среди ответов А - Г нет правильного.

2. Как изменится длина волны света при переходе из вакуума в прозрачную среду с абсолютным показателем преломления  $n = 2$ ?

А. Увеличится в 2 раза.      Б. Останется неизменной.  
В. Уменьшится в 2 раза.      Г. Изменение зависит от угла падения.  
Д. Среди ответов А - Г нет правильного.

3. Как изменяется скорость распространения света при переходе из вакуума в прозрачную среду с абсолютным показателем преломления  $n = 2$ .

А. Увеличивается в 2 раза.      Б. Остается неизменной.  
В. Уменьшается в 2 раза.      Г. Изменение зависит от угла падения.  
Д. Среди ответов А - Г нет правильного.

4. Как изменится цвет монохроматического пучка света при переходе из вакуума в прозрачную среду с абсолютным показателем преломления  $n = 1,5$ ?

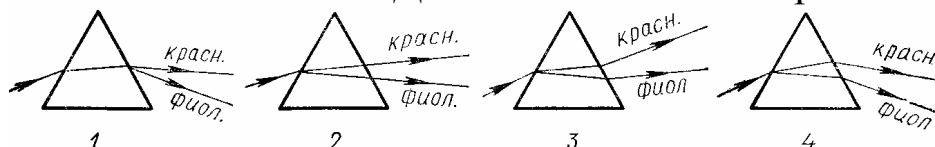
А. Изменится в сторону красного конца спектра. Б. Изменится в сторону фиолетового конца спектра. В. Не изменится. Г. Изменение зависит от угла падения. Д. Среди ответов А - Г нет правильного.

5. Свет какого цвета обладает наибольшим показателем преломления при переходе из воздуха в стекло?

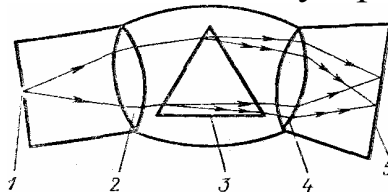
А. Красного. Б. Синего. В. Зеленого. Г. Фиолетового. Д. У всех одинаковый.

6. На какой из схем (см. рис.) правильно представлен ход лучей при разложении пучка белого света стеклянной призмой?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. На всех схемах неправильно.



7. На рисунке представлена схема устройства спектрографа.



С помощью какого элемента спектрографа осуществляется разложение (дисперсия) пучка света сложного спектрального состава?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

8. С помощью какого элемента спектрографа (см. рис. задания 7) осуществляется превращение расходящегося светового пучка в параллельный?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

9. С помощью какого элемента спектрографа (см. рис. задания 7) осуществляется выделение узкого светового пучка?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

10. С помощью какого элемента спектрографа (см. рис. задания 7) осуществляется построение изображений щели на фотопластинке?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

## 7. Излучение нагретого тела

Изучение явлений дифракции, интерференции и поляризации света привело к заключению о волновой природе света. Было также доказано, что свет – это электромагнитные волны.

Излучение электромагнитных волн в радиодиапазоне происходит при ускоренном движении электронов при их колебаниях в антенне. Можно было предположить, что излучение видимого света нагретым телом также обусловлено колебательными движениями электронов, только с частотами гораздо более высокими, чем в антенне радиопередатчика.

Проверка правильности такого предположения могла быть выполнена путем сравнения теоретически предсказываемого электромагнитной теорией закона распределения энергии в сплошном спектре излучения нагретого тела с наблюдаемым экспериментально.

Пример экспериментально полученной кривой распределения энергии в спектре излучения нагретого тела представлен на рисунке 24, а. По оси абсцисс отложены длины волн, по оси ординат - мощность излучения единицы поверхности светящегося тела в единичном интервале длин волн. Энергия, как показал опыт, распределяется неравномерно, очень длинные и очень короткие волны имеют мало энергии. Наибольшая энергия приходится на волны определенной длины. Так, для солнечного излучения (температура поверхности  $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) максимум приходится на желто-зеленую область видимого света. Площадь фигуры, ограниченной графиком и осью абсцисс, пропорциональна полной энергии, излучаемой телом в единицу времени. Она имеет конечную величину. Экспериментальные исследования показали, что общий характер графика с изменением температуры не меняется, но максимум кривой при меньшей температуре смещается в сторону больших длин волн, а полная энергия (площадь, ограниченная графиком) уменьшается. Так при температуре раскаленной нити ( $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) лампочки максимум приходится на инфракрасную область.

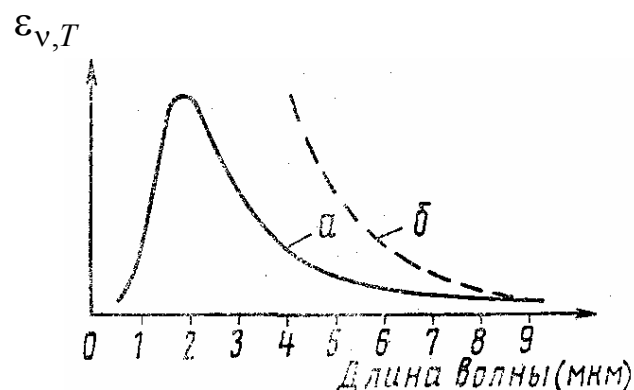


Рисунок 24 – Распределение энергии в спектре излучения нагретого тела:  
 а - экспериментально полученная кривая; б – расчетная кривая

Английский физик Д. Рэлей сделал попытку теоретически найти уравнение, описывающее распределение энергии в спектре, которое согласовалось бы с экспериментом. Было сделано предположение, что тепловое электромагнитное излучение испускается электронами, колеблющимися внутри нагретого тела. Расчет был сделан на основе применения законов электродинамики Максвелла и статистической физики, но привел к противоречию с опытом: график кривой спектрального распределения энергии, соответствующий теоретической формуле, круто уходил вверх с уменьшением длины волны (рис. 24, б). По этому закону мощность излучения должна непрерывно возрастать с уменьшением длины волны излучения, ведь кривая уходит в бесконечность, и площадь фигуры, ограниченной ею, стремится к бесконечности. Физически это означает, что тело, теряя энергию, должно охлаждаться до абсолютного нуля и равновесия между излучающим телом и излучением быть не может. Из опыта известно, что такое равновесие существует, тело не отдает всю свою энергию излучению. Кроме того, это значит, что в тепловом излучении должно быть много ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, чего на самом деле не наблюдается. Теоретическая и экспериментальная кривые распределения энергии резко расходились в области малых длин волн (ультрафиолетовая часть спектра), отсюда и название этой ситуации - «*ультрафиолетовая катастрофа*».

Расхождение теоретического уравнения с опытом указывало на существование каких-то закономерностей, несовместимых с представлениями электродинамики и классической статистики.

## 8. Гипотеза Планка. Квант излучения

Таким образом, в рамках классической физики оказалось невозможным объяснить распределение энергии в спектре излучения нагретого тела.

Стремясь преодолеть затруднения классической теории, немецкий физик Макс Планк в 1900 г. высказал гипотезу.

**Гипотеза Планка:** электромагнитное излучение испускается веществом в виде отдельных порций энергии (*квантов*); энергия кванта  $E$  пропорциональна частоте излучения  $\nu$ :

$$E = h\nu.$$

Коэффициент пропорциональности  $h$  является универсальной постоянной для всех частот и называется *постоянной Планка*. Постоянная Планка равна

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}.$$

Исходя из этой принципиально новой идеи, Планк получил закон распределения энергии в спектре, хорошо согласующийся с экспериментальными данными. Хорошее согласие теории с экспериментом было подтверждением правильности квантовой гипотезы Планка.

## 9. Фотоэлектрический эффект

Гипотеза Планка о квантах послужила основой для объяснения явления *фотоэлектрического эффекта*, открытого в 1887 г. немецким физиком Генрихом Герцем.



**Фотоэлектрическим эффектом или фотоэффектом** называется явление испускания электронов веществом под действием света.

Существует *внешний фотоэффект*, при котором фотоэлектроны вылетают за пределы тела, и *внутренний фотоэффект* – возникновение свободных носителей заряда (электронов и / или дырок) внутри твердого тела.

Демонстрация. *Фотоэффект на устройстве с цинковой пластинкой.*

Явление фотоэффекта обнаруживается при освещении цинковой пластины, соединенной со стержнем электрометра. Если пластине и стержню передан положительный заряд, то электрометр не разряжается при освещении пластины (рис. 25.1). При сообщении пластине отрицательного электрического заряда электрометр разряжается, как только на пластину попадает световое излучение (рис. 25.2).

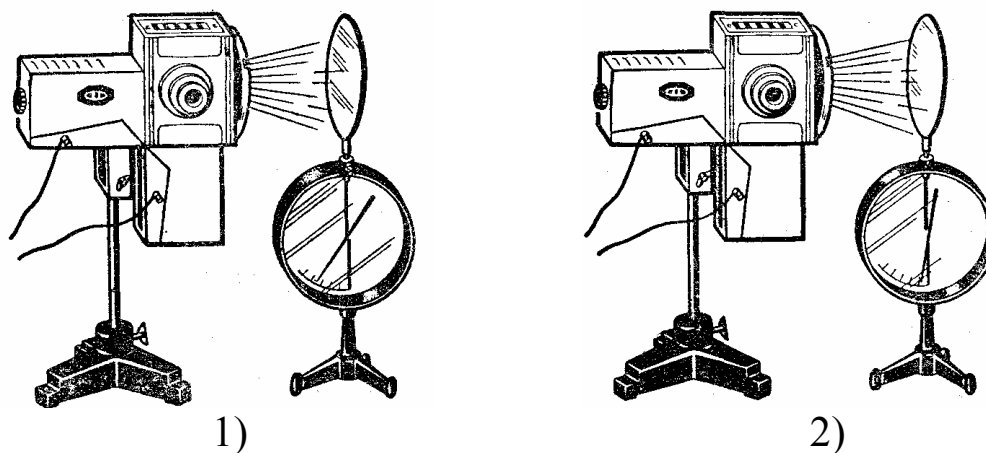


Рисунок 25 – Демонстрация явления фотоэффекта на устройстве с цинковой пластиной: 1 – электрометр с положительно заряженной пластиной не реагирует на освещение; 2 – отрицательно заряженный электрометр разряжается при освещении пластины

Выводы:

- 1) *разряжаются под действием света только отрицательно заряженные тела;*
- 2) *разряд начинается одновременно с началом освещения.*

Это свидетельствует о том, что фотоэффект практически безынерционен (для успеха демонстрации лампе дают сначала полностью разогреться и только затем подставляют под излучение отрицательно заряженную пластинку, закрепленную на стержне электрометра).

Этот опыт доказывает, что с поверхности металлической пластины под действием света могут освобождаться отрицательные электрические заряды.

#### Демонстрация. Красная граница фотоэффекта.

Повторяется опыт с отрицательно заряженной цинковой пластинкой, соединенной со стержнем электрометра, но на пути излучения ставится стеклянная пластинка.

Стекло, поставленное на пути светового пучка, прекращает разряд, что дает основание предполагать зависимость явления фотоэффекта от частоты падающего света. Так как стекло задерживает ультрафиолетовые лучи, то возможно, что именно ультрафиолетовые лучи и вызвали фотоэффект. Более точные опыты подтверждают, что у большей части металлов фотоэффект вызывается ультрафиолетовым излучением.

Количественные закономерности внешнего фотоэффекта изучались А.Г. Столетовым в 1888 - 1889 гг. На основании своих опытов Столетов пришел к следующим *выводам*:

1) наибольшее действие на вещество оказывают ультрафиолетовые лучи;

2) сила тока возрастает с увеличением освещенности пластины;

3) испускаемые под действием света заряды имеют отрицательный знак.

В 1898 г. Ленард и Томсон, измерив удельный заряд испускаемых под действием света частиц, установили, что эти частицы являются электронами.

## **10. Законы фотоэффекта**

Опыт. Соберем цепь, состоящую из стеклянного баллона (из которого откачан воздух) с двумя электродами, микроамперметра,

потенциометра и батареи (рис. 26.1). Свет, проникающий через кварцевое окошко баллона (в отличие от обычного стекла, кварц пропускает ультрафиолетовые лучи), освещает катод, изготовленный из исследуемого материала. Электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, перемещаются под действием электрического поля к аноду. В результате в цепи течет фототок, измеряемый микроамперметром. Напряжение между анодом и катодом можно изменять с помощью потенциометра.

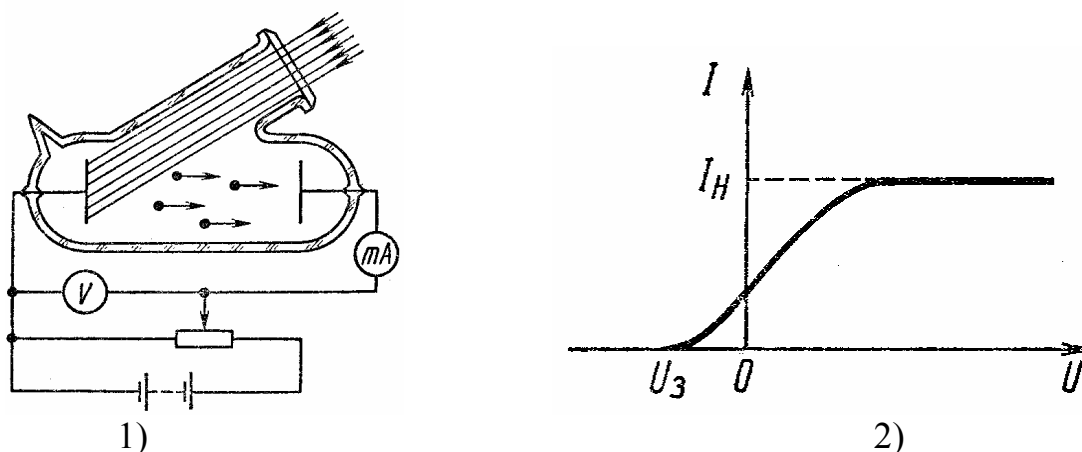


Рисунок 26 – Экспериментальное исследование внешнего фотоэффекта:  
1 – схема установки; 2 – вольт-амперная характеристика фототока

При неизменных условиях освещения одного электрода полученная *вольт-амперная характеристика* (т. е. кривая зависимости фототока  $I$  от напряжения между электродами  $U$ ) приведена на рисунке 26.2. Из этой зависимости видно, что при некотором напряжении фототок достигает насыщения - все электроны, испущенные катодом, попадают на анод. Следовательно, сила тока насыщения  $I_H$  определяется количеством электронов, испускаемых катодом в единицу времени под действием света.

Для обращения силы тока в нуль нужно приложить задерживающее напряжение  $U_3$ . При таком напряжении ни одному из электронов, даже обладающему при вылете из катода наибольшим значением скорости  $v_{max}$ , не удастся преодолеть задерживающее поле и достигнуть анода. Измерив задерживающее напряжение  $U_3$ , можно на основе закона сохранения энергии найти

максимальное значение кинетической энергии электронов, вырываемых светом из катода:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3,$$

где  $e$  - заряд электрона,  $m$  - масса электрона,  $U_3$  - задерживающее напряжение,  $v_{\max}$  - максимальная скорость электронов.

Экспериментальные факты позволили сформулировать следующие **законы фотоэффекта**:

**Первый закон.** Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности излучения, падающего на катод.

**Второй закон.** Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света и не зависит от интенсивности света.

**Третий закон.** Если частота света меньше некоторой определенной для данного вещества минимальной частоты  $\nu_{\min}$ , то фотоэффект не происходит (*красная граница фотоэффекта*).

## 11. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Электромагнитная теория света не могла объяснить пропорциональность кинетической энергии фотоэлектронов частоте света и ее независимость от интенсивности светового излучения, существование красной границы фотоэффекта.

Объяснение основных законов фотоэффекта было дано А. Эйнштейном (1879 - 1955) в 1905 г. За эти работы Эйнштейну была присуждена Нобелевская премия (1921).

А. Эйнштейн показал, что все закономерности фотоэффекта легко объясняются, если предположить, что свет поглощается такими же порциями

$$E = h\nu$$

- квантами, какими он, по предположению Планка, испускается. По мысли Эйнштейна, энергия, полученная электроном, доставляется ему в виде кванта  $h\nu$ , который усваивается им целиком. Часть этой

энергии, равная работе выхода  $A$ , затрачивается на то, чтобы электрон мог покинуть тело. **Работой выхода** называется наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы удалить его из твердого или жидкого тела в вакуум. Если электрон освобождается светом не у самой поверхности, а на некоторой глубине, то часть энергии, равная  $E'$ , может быть потеряна вследствие случайных столкновений в веществе. Остаток энергии образует кинетическую энергию  $E_k$  электрона, покинувшего вещество. Энергия  $E_k$  будет максимальной, если  $E' = 0$ .

Следовательно, энергия кванта света идет на работу выхода  $A$  электрона из вещества и на сообщение ему максимальной

кинетической энергии  $E_{\max} = \frac{m v_{\max}^2}{2}$ :

$$E = h\nu = A + \frac{m v_{\max}^2}{2}.$$

Это соотношение называется **уравнением Эйнштейна для фотоэффекта**.

Основываясь на уравнении Эйнштейна для фотоэффекта, можно объяснить все три закона фотоэффекта.

1-й закон фотоэффекта: при увеличении интенсивности монохроматического излучения растет число поглощенных металлом квантов, а следовательно, и число вылетающих из него электронов, поэтому сила фототока прямо пропорциональна интенсивности излучения. Число фотоэлектронов должно быть пропорционально числу квантов излучения, а не равно, потому что часть квантов поглощается кристаллической решеткой, и их энергия переходит во внутреннюю энергию металла;

2-й закон фотоэффекта: т.к. каждый фотоэлектрон вырывается из катода за счет действия одного кванта излучения, то максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона зависит от энергии одного кванта (т.е. частоты волны), а не от полной энергии волны. Формула Эйнштейна определяет именно максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, вылетающих с поверхности катода. Электроны же, вырывающиеся изнутри металла,

потеряют часть энергии, и их скорость окажется меньше максимальной.

3-й закон фотоэффекта: если энергия кванта меньше работы выхода, то при любой интенсивности излучения электроны вылетать не будут.

Наименьшую частоту или наибольшую длину волны света, при которой энергия кванта света равна работе выхода электрона из металла, называют *красной границей фотоэффекта*:

$$h\nu_{\min} = h \frac{c}{\lambda_{\max}} = A, \quad \nu_{\min} = \frac{A}{h}, \quad \lambda_{\max} = \frac{hc}{A}.$$

Красная граница фотоэффекта для разных веществ различна, так как работа выхода  $A$  зависит от рода вещества. При этом кинетическая энергия электронов равна нулю.

**Безынерционность фотоэффекта** (отсутствие запаздывания возникновения фототока после начала освещения) объясняется тем, что квант света, достигший фотокатода, практически мгновенно может освободить из него один электрон.

Таким образом, фотоэффект является экспериментальным подтверждением идеи о дискретности энергии излучения и наличии кванта энергии  $E$ . Элементарные акты фотоэффекта объясняются на основе всеобщего закона природы - закона сохранения и превращения энергии.

## 12. Применение фотоэффекта

Простейшим прибором, работающим на основе использования фотоэффекта, является **вакуумный фотоэлемент** (рис. 27). Светочувствительный слой наносится на большую часть внутренней поверхности стеклянного баллона, из которого откачан воздух (создан вакуум), и служит катодом К. Через окошко В свет поступает в баллон. Анодом А служит проволочное кольцо или диск. Кольцо соединено с положительным полюсом батареи Б, а светочувствительный слой через гальванометр Г - с отрицательным ее полюсом. При освещении катода таким источником света, в спектральном составе излучения которого есть частоты,

удовлетворяющие условию красной границы, в цепи появится ток. Сила тока пропорциональна интенсивности светового излучения. Таким образом фотоэлемент преобразует энергию светового излучения в энергию электрического тока.

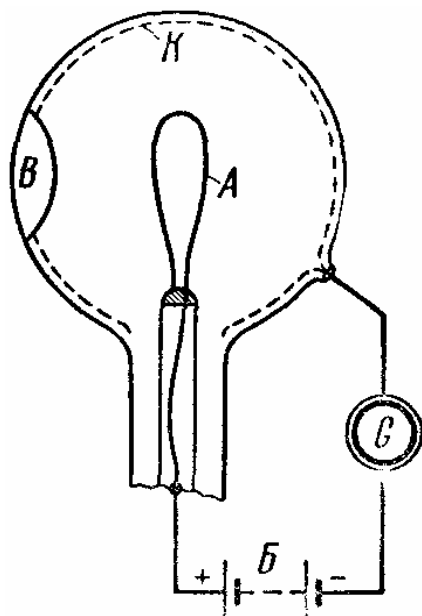


Рисунок 27 – Схема вакуумного фотоэлемента

Включение фотоэлемента последовательно с обмоткой электромагнитного реле позволяет автоматически включать или выключать исполнительные устройства при попадании света на фотоэлемент.

**Фотореле** называется прибор автоматического управления различными установками, использующий способность фотоэлемента практически мгновенно реагировать на световое воздействие или его изменение. Фотореле срабатывает либо при попадании света на фотоэлемент, либо при прекращении освещения фотоэлемента.

Фотореле применяются для автоматического счета изделий, обеспечения безопасности работы на станках, автоматического отсчета времени при фотопечати и т.п.

*Демонстрация. Действие фотореле на фотоэлементе.*

Продемонстрировать работу фотореле при освещении и затемнении фотоэлемента. В качестве чувствительного элемента

можно использовать как вакуумный, так и полупроводниковый фотоэлемент или фоторезистор.

### Задания к самостоятельной работе

*Задание 1. Прочитайте, напишите, переведите на родной язык новые слова и словосочетания. Запомните их!*

квантовая физика  
спектральное распределение энергии  
мощность излучения единицы поверхности  
единичный интервал длин волн  
ультрафиолетовая катастрофа  
гипотеза Планка  
квант  
постоянная Планка  
закон распределения энергии в спектре  
фотоэлектрический эффект (фотоэффект)  
красная граница фотоэффекта  
кварцевое окошко  
вольт-амперная характеристика  
задерживающее напряжение  
сила фототока насыщения  
интенсивность излучения  
работа выхода электрона из вещества  
безынерционность фотоэффекта  
вакуумный фотоэлемент  
светочувствительный слой  
спектральный состав излучения  
электромагнитное реле  
исполнительное устройство  
прибор автоматического управления



*Задание 2. Ответьте на вопросы. Используйте информацию текста.*

1. Какие явления свидетельствуют о том, что свет представляет собой электромагнитные волны?
2. Какие явления объясняет электромагнитная теория света?
3. Какие явления не может объяснить электромагнитная теория света?
4. В чем состоит сущность гипотезы Планка?
5. Чему равна постоянная Планка?
6. Что такое фотоэффект?
7. В чем состоит явление внешнего фотоэффекта? Внутреннего фотоэффекта?
8. Опишите установку, на которой исследовался фотоэффект.
9. Как можно найти максимальное значение кинетической энергии фотоэлектронов?
10. Как можно рассчитать скорость освобожденных фотоэлектронов?
11. Сформулируйте законы фотоэффекта.
12. Напишите и объясните формулу Эйнштейна для фотоэффекта.
13. Объясните законы фотоэлектрического эффекта с точки зрения квантовой теории.
14. Что называют красной границей фотоэффекта?
15. Что представляет собой фотоэлемент?
16. Расскажите о применении фотоэлектрического эффекта.

*Задание 3. Закончите предложения. Используйте информацию текста.*

- Гипотеза Планка: электромагнитное излучение испускается...
- Фотоэффектом называется явление ...
- Сила тока насыщения  $I_n$  определяется ...
- Для обращения силы тока в нуль нужно приложить ...
- Сила фототока насыщения прямо пропорциональна ...
- Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно ...
- ...

Если частота света меньше некоторой определенной для данного вещества ...

Энергия кванта света идет на работу ...

Наименьшую частоту или наибольшую длину волны света, при которой ...

Работа выхода  $A$  зависит от...

Безынерционность фотоэффекта объясняется тем, что ...

Фотоэффект является экспериментальным подтверждением идеи о ...

Элементарные акты фотоэффекта объясняются на основе ...

Фотореле называется прибор ...

Фотореле применяются для ...

*Задание 4. Напишите, как называются эти обозначения. Используйте информацию текста.*

Образец:  $h$  - постоянная Планка;

$E$  - ...

$\nu$  - ...

$U_3$  - ...

$v_{\max}$  - ...

$E$  - ...

$m$  - ...

$v_{\min}$  - ...

$A$  - ...

*Задание 5. Напишите определения понятий по формулам. Используйте информацию текста.*

$$E = h\nu;$$

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3;$$

$$E_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2};$$

$$E = h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2};$$

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h};$$

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{A}.$$

Задание 6. Решите задачи.

### Пример решения задачи

Задача. Наибольшая длина волны световой волны, при которой возможен фотоэффект для вольфрама, равна  $2,75 \cdot 10^{-7}$  м. Найдите работу выхода электрона из вольфрама; наибольшую скорость электронов, вырываемых из вольфрама светом с длиной волны  $1,8 \cdot 10^{-7}$  м; наибольшую энергию этих электронов.

Дано:

$$\lambda_{\max} = 2,75 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

$$\lambda = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

Найти: А-?

$$\nu_{\max} \text{ -? } E_{\max} \text{ -?}$$

Решение:

Наибольшую длину волны света, при которой энергия фотона равна работе выхода электрона из металла, называют красной границей фотоэффекта:

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{A}.$$

Следовательно, работа выхода электрона из металла:

$$A = \frac{hc}{\lambda_{\max}}.$$

По формуле Эйнштейна для фотоэффекта имеем:

$$h\nu = A + E_{\max},$$

где  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ . Тогда наибольшая кинетическая энергия электрона:

$$E_{\max} = h\nu - A = \frac{hc}{\lambda} - A.$$

$$E_{\max} = \frac{m\nu_{\max}^2}{2},$$

откуда наибольшая скорость электрона:  $\nu_{\max} = \sqrt{\frac{2E_{\max}}{m}}.$

Найдем числовые значения величин:

$$A = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,75 \cdot 10^{-7}} = 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}$$

$$E_{\max} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,8 \cdot 10^{-7}} - 7,2 \cdot 10^{-19} = 3,85 \cdot 10^{-19} \text{ (Дж)}$$

$$\nu_{\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,85 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 9,2 \cdot 10^5 \text{ (м/с)}$$

*Ответ:*  $A = 7,2 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $E_{\max} = 3,85 \cdot 10^{-19}$  Дж;

$\nu_{\max} = 9,2 \cdot 10^5$  м/с.

### Основные задачи

Задача 1. На металлическую поверхность падает оптическое излучение с длиной волны 0,6 мкм. Работа выхода электронов равна 1,9 эВ. Определите: а) кинетическую энергию вылетающих фотоэлектронов, б) красную границу фотоэффекта для данного металла.

Задача 2. Какой должна быть длина волны излучения, падающего на кадмий, чтобы при фотоэффекте максимальная скорость вылетающих электронов была равна  $7,2 \cdot 10^5$  м/с?

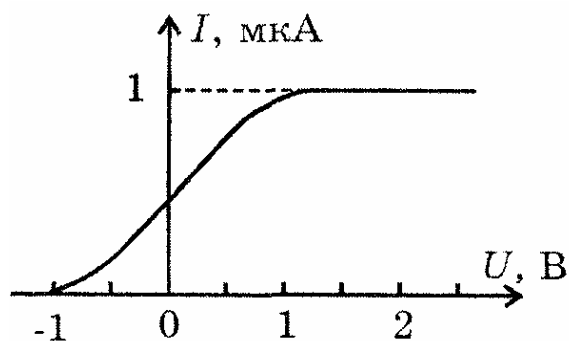
*(Ответ:  $2,2 \cdot 10^{-7}$  м)*

Задача 3. Найдите, с какой скоростью вылетают фотоэлектроны с поверхностного слоя калия при облучении оптическим излучением с длиной волны 0,4 мкм, если фотоэффект для калия начинается с длины волны 1 мкм.

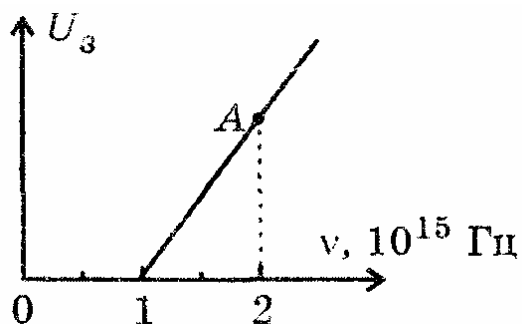
*(Ответ:  $4,6 \cdot 10^5$  м/с)*

Задача 4. Катод фотоэлемента освещается монохроматическим излучением с длиной волны 200 нм. Работа выхода электронов из металла 4 эВ. Каким должно быть задерживающее напряжение?

Задача 5. На катод вакуумного фотоэлемента падает свет с длиной волны 450 нм. Определите, пользуясь вольтамперной характеристикой фотоэлемента, максимальную длину волны излучения, вызывающую фотоэффект.



Задача 6. Определите красную границу фотоэффекта и работу выхода электронов из катода вакуумного фотоэлемента, пользуясь графиком зависимости задерживающего напряжения от частоты электромагнитного излучения, падающего на катод. Какое задерживающее напряжение соответствует точке A на графике?



Задача 7. Определите постоянную Планка, если известно, что электроны, освобожденные с поверхности некоторого металла оптическим излучением с частотой  $2,2 \cdot 10^{15}$  Гц, полностью задерживаются обратным напряжением 6,6 В, а освобожденные излучением с частотой  $4,6 \cdot 10^{15}$  Гц, - напряжением 16,5 В.

(Ответ:  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж/с)

### Дополнительные задачи

Задача 1. Наибольшая длина волны, при которой происходит фотоэффект для калия, равна  $6,2 \cdot 10^{-5}$  см. Найдите работу выхода электронов из калия.

(Ответ:  $3,2 \cdot 10^{-19}$  Дж)

Задача 2. Может ли свет с длиной волны  $5,5 \cdot 10^{-7}$  м вызвать фотоэффект с серебряного катода? С калиевого катода?

(Ответ: нет, да)

Задача 3. Определите наибольшую скорость электрона, вылетающего из металла цезия, при освещении его светом с длиной волны 400 нм.

(Ответ:  $6,5 \cdot 10^5$  м/с)

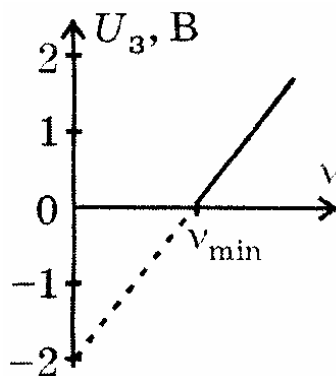
Задача 4. Максимальная кинетическая энергия электронов, вылетающих из рубидия при его освещении ультрафиолетовыми лучами с длиной волны  $3,17 \cdot 10^{-7}$  м, равна  $2,84 \cdot 10^{-19}$  Дж. Определите работу выхода электронов из рубидия.

(Ответ:  $3,4 \cdot 10^{-19}$  Дж)

Задача 5. При освещении металла монохроматическим светом фотоэлектроны приобретают скорость  $3 \cdot 10^5$  м/с. Определите скорость фотоэлектронов, вылетающих из металла при освещении его монохроматическим светом с частотой на  $10^{13}$  Гц больше.

(Ответ:  $3,23 \cdot 10^5$  м/с)

Задача 6. Пользуясь графиком зависимости задерживающего напряжения от частоты электромагнитного излучения, падающего на катод вакуумного фотоэлемента, определите значение минимальной частоты, при которой возникает фотоэффект.



### 13. Фотон

**Фотон** - это элементарная частица, квант электромагнитного поля. Термин «фотон» был введен в 1929 г. Г. Льюисом. Масса покоя фотона равна нулю, и поэтому его скорость равна скорости света. Не существует систем отсчета, в которых фотон покоится. Все, что сказано о скорости света (конечность, предельность, инвариантность относительно любой инерциальной системы отсчета), относится и к фотону, так как фотоны и есть свет.

Фотон – нейтральная частица. Кроме электромагнитного взаимодействия, фотон участвует в гравитационном взаимодействии.

*Энергия фотона равна*

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda};$$

*импульс фотона равен*

$$p_f = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

где  $\lambda$  и  $\nu$  - соответственно длина и частота световой волны. Это указывает на связь корпускулярных и волновых свойств света: ведь  $E$  и  $p_f$  - энергия и импульс частицы, а  $\lambda$  и  $\nu$  - характеристики волны. Фотон принципиально отличается от классической корпускулы тем, что его свойства неразрывно связаны с электромагнитной волной.

Поскольку у фотона нет массы покоя, то фотон не подчиняется законам Ньютона. В частности, его нельзя ни ускорить, ни замедлить.

Фотон не делится на части. Он испускается и поглощается только целиком.

Таким образом, свет обладает двойственными свойствами - как корпускулярными, так и волновыми.

## 14. Давление света

Давление света теоретически предсказал Дж. К. Максвелл (1873 г.), а экспериментально его обнаружил и измерил П. Н. Лебедев (1900 г.).

Волновая и квантовая теории света одинаково хорошо объясняют происхождение давления света.

Волновое объяснение давления света. При падении плоской монохроматической электромагнитной волны перпендикулярно поверхности тела (рис. 28) на электрон действует переменная электрическая сила

$$\vec{F}_э = e\vec{E}.$$

Поэтому электроны совершают вдоль поверхности тела вынужденные гармонические колебания, т. е. образуется *переменный ток*. Скорость электронов пропорциональна силе.

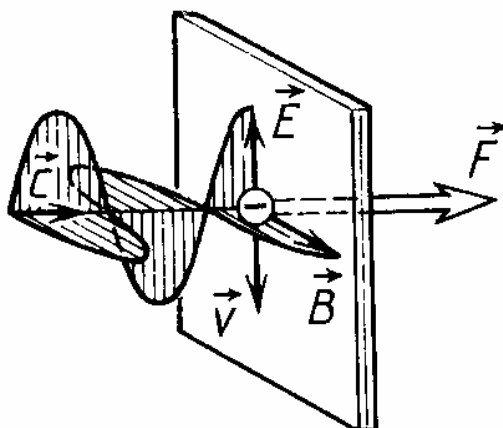


Рисунок 28 – К волновому объяснению давления света

На электрический заряд, движущийся с некоторой скоростью, действует магнитная составляющая электромагнитной волны с силой Лоренца

$$F_л = evB.$$

Поскольку скорость электронов все время меняется, то эта сила также переменная. С помощью правила левой руки можно



убедиться, что на движущийся электрон сила Лоренца действует все время в одном направлении - внутрь тела. Эта сила передается атомам, ионам и молекулам тела. Так образуется световое давление, т. е. свет производит механическое действие.

Несмотря на периодическое изменение направлений векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ , сила светового давления совпадает по направлению с направлением распространения света. Это относится к электромагнитному излучению любой частоты.

Квантовое объяснение давления света. Фотон, нормально падая на поверхность тела, либо поглощается, передавая импульс  $\frac{h\nu}{c}$  веществу, либо отражается, передавая ему импульс

$$\frac{h\nu}{c} - \left( -\frac{h\nu}{c} \right) = 2\frac{h\nu}{c}.$$

Т.е., если поверхность тела черного цвета, то все фотоны поглощаются и каждый из них передает телу свой импульс, если же поверхность тела полностью отражает свет, то каждый из фотонов передает телу в два раза больший импульс. Пусть за интервал времени  $\Delta t$  на площадку  $S$  падает  $N$  фотонов. Импульс, который фотоны передают поверхности, полностью поглощающей свет, равняется:

$$\Delta p'_f = N \frac{h\nu}{c},$$

а импульс, который фотоны передают поверхности, полностью отражающей свет (зеркальной), равняется:

$$\Delta p''_f = 2N \frac{h\nu}{c}.$$

Обычно поверхности тел и отражают, и поглощают свет. Пусть отражается  $R$ -ая часть падающего на поверхность света ( $R$  – коэффициент отражения). Это означает, что  $RN$  фотонов отражается от поверхности, а  $(1 - R)N$  фотонов поглощается. Тогда

суммарный импульс, который передают телу все  $N$  фотонов, равняется:

$$\Delta p_f = \Delta p'_f + \Delta p''_f = 2RN \frac{h\nu}{c} + (1-R)N \frac{h\nu}{c} = (1+R)N \frac{h\nu}{c}.$$

Но  $Nh\nu = W$  - суммарная энергия всех фотонов. Поэтому давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность, равняется:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p_f}{S\Delta t} = \frac{(1+R)W}{cS\Delta t} = \frac{(1+R)W}{V} = (1+R)\omega,$$

где  $\omega$  - объемная плотность энергии падающего света. Если поверхность полностью отражает свет ( $R=1$ ), то  $p=2\omega$ , а если полностью поглощает свет ( $R=0$ ), то  $p=\omega$ . Такой результат дает и волновая теория.

В *опыте Лебедева* сравнивалось давление, оказываемое на черные и зеркальные крылышки при разных интенсивностях светового пучка, падавшего на них (рис. 29).

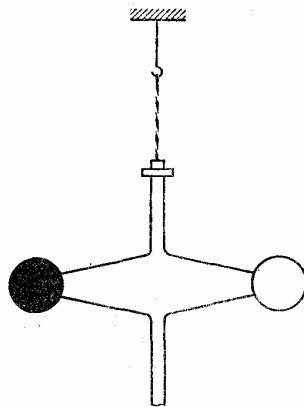


Рисунок 29 – Схема опыта Лебедева

При одновременном освещении двух дисков происходил их поворот вокруг вертикальной оси. По углу закручивания упругой нити подвеса можно было измерить момент сил, вызывающих этот поворот. Закручивание нити подвеса происходило в таком направлении, которое соответствует большей силе давления света

на зеркально отражающий диск. Обнаружить световое давление было очень трудно, так оно очень мало.

Опыты П. Н. Лебедева - экспериментальное доказательство наличия импульса у фотона и выполнимости закона сохранения импульса как для вещества, так и для квантов электромагнитного излучения, т.е. как доказательство всеобщего характера закона сохранения импульса.

Сила светового давления в природных явлениях не всегда пренебрежимо мала по сравнению с другими силами. В недрах звезд потоки светового излучения настолько велики, что сила светового давления становится сравнимой с силой гравитационного взаимодействия и препятствует неограниченному сжатию звезд.

Образование кометных хвостов вблизи Солнца объясняется следующим образом. Действие света и корпускулярного потока от Солнца («солнечный ветер») на малые частицы кометы превосходит действие тяготения. Вследствие этого кометные хвосты всегда направлены от Солнца.

## 15. Корпускулярно-волновой дуализм

Свет – это поток фотонов, а фотоны – это кванты электромагнитного излучения, имеющие одновременно и волновые, и корпускулярные свойства.

Волновую природу света подтверждает совпадение скорости света со скоростью электромагнитных волн, поперечность световых волн (поляризация), явления интерференции и дифракции света. Т.е., волновые свойства света проявляются в закономерностях его распространения.

Фотоэффект и давление света показывают, что при взаимодействии с веществом электромагнитное излучение ведет себя как поток особых частиц - фотонов.

Энергия и импульс фотона определяются частотой волны (длиной волны). Значит, фотоны нельзя рассматривать как классические корпускулы: это принципиально неклассические объекты, которые проявляют как волновые, так и корпускулярные свойства, причем эти свойства *неразделимы*. При малых частотах

преобладающую роль играют волновые свойства света, при больших – квантовые.

В тех случаях, когда регистрируются усредненные результаты воздействия света на объект в течение сравнительно больших (в масштабах микромира) промежутков времени, дискретность светового потока стирается и мы наблюдаем непрерывную волновую картину (например, при наблюдении глазом или фотографировании интерференционной картины).

Если же регистрируются индивидуальные акты взаимодействия излучения с микрочастицами, например с отдельными электронами (фотоэффект), то здесь микрочастица взаимодействует с отдельным фотоном, поэтому дискретная структура излучения проявляется наглядно.

Единство волновых (непрерывных) и корпускулярных (дискретных) свойств вещества и излучения - одна из основных идей современной физики.

Проявление светом как волновых, так и корпускулярных свойств называют *корпускулярно-волновым дуализмом* свойств света.

Смысл корпускулярно-волнового дуализма свойства света заключается в том, что свет имеет сложную природу, которая в зависимости от условий опыта лишь приближенно может быть описана с применением привычных представлений о волнах или частицах.

В 1924 г. Луи де Бройль высказал гипотезу, согласно которой дуализм свойств присущ не только свету, но и частицам вещества, например электронам. Он утверждал, что не только свет обладает корпускулярными свойствами, но и частицы обладают волновыми. Девисон и Джермер в 1927 г. опытно доказали, что от потока электронов определенной скорости можно получить типичную дифракционную картину. Из опыта следовал вывод: волновыми свойствами обладает каждый электрон.

Таким образом, корпускулярно-волновой дуализм является универсальным свойством любых материальных объектов.

## Задания к самостоятельной работе

*Задание 1. Прочитайте, напишите, переведите на родной язык новые слова и словосочетания. Запомните их!*

фотон  
элементарная частица  
нейтральная частица  
инвариантность  
корпускулярные свойства света  
волновые свойства света  
классическая корпускула  
двойственные свойства  
световое давление  
усредненные результаты  
дискретность светового потока  
корпускулярно-волновой дуализм

*Задание 2. Ответьте на вопросы. Используйте информацию текста.*

1. Что понимают под фотоном?
2. Каковы свойства фотона?
3. Как объяснить давление света с точки зрения электромагнитной теории?
4. Как объяснить давление света с точки зрения квантовой теории?
5. На какую поверхность (черную или белую) световые лучи производят большее давление?
6. Опишите принцип действия установки П. Н. Лебедева для измерения давления света.
7. Почему хвосты комет всегда обращены от Солнца?
8. Что представляет собой свет с точки зрения квантовой теории?
9. В чем заключается корпускулярно-волновой дуализм свойств света?

*Задание 3. Закончите предложения. Используйте информацию текста.*

Фотон - это ...

Масса покоя фотона равна ...

Свет обладает двойственными свойствами - ...

Опыты П. Н. Лебедева - экспериментальное доказательство ...

Свет – это ...

Волновую природу света подтверждает ...

Фотоэффект и давление света показывают, что ...

Проявление светом как волновых, так и корпускулярных свойств называют ...

Смысл корпускулярно-волнового дуализма свойства света заключается в том, что...

Луи де Бройль высказал гипотезу, согласно которой ...

Корпускулярно-волновой дуализм является универсальным ...

*Задание 4. Напишите, как называются эти обозначения. Используйте информацию текста.*

Образец:  $N$  - количество фотонов;

$p_f$  - ...

$S$  - ...

$\Delta p'_f$  - ...

$\Delta p''_f$  - ...

$\Delta p_f$  - ...

$R$  - ...

$W$  - ...

$\omega$  - ...

*Задание 5. Напишите определения понятий по формулам. Используйте информацию текста.*

$$p_f = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda};$$

$$\vec{F}_3 = e\vec{E};$$

$$F_{\text{л}} = e\nu B;$$

$$\Delta p'_f = N \frac{h\nu}{c};$$

$$\Delta p''_f = 2N \frac{h\nu}{c};$$

$$\Delta p_f = \Delta p'_f + \Delta p''_f;$$

$$Nh\nu = W;$$

$$p = (1 + R)\omega.$$

Задание 6. Решите задачи.

### Примеры решения задач

Задача 1. Глаз человека воспринимает свет с длиной волны 0,5 мкм, если световые лучи, попадающие в глаз, несут энергию не менее  $20,8 \cdot 10^{-18}$  Дж/с. Какое число фотонов при этом попадает на сетчатку глаза за 1 с?

Дано:

$$\lambda = 0,5 \text{ мкм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

$$N = 20,8 \cdot 10^{-18} \text{ Дж/с};$$

$$T = 1 \text{ с};$$

Найти:  $n$  -?

Решение:

Энергия фотона:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}.$$

Число фотонов, попадающих на сетчатку глаза за 1 с, равно:

$$n = \frac{Nt}{E} = \frac{Nt\lambda}{hc}.$$

$$n = \frac{20,8 \cdot 10^{-18} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 53 \text{ (фотона)}.$$

Ответ: на сетчатку глаза за 1 с попадает 53 фотона.

Задача 2. На каждый квадратный метр черной поверхности ежесекундно падает нормально к поверхности  $2,5 \cdot 10^{15}$  фотонов

рентгеновского излучения с частотой  $7 \cdot 10^{19}$  Гц. Какое давление создает это излучение на поверхность?

*Дано:*  
 $S = 1 \text{ м}^2$ ;  
 $\Delta t = 1 \text{ с}$ ;  
 $R = 0$ ;  
 $N = 2,5 \cdot 10^{15}$ ;  
 $\nu = 7 \cdot 10^{19} \text{ Гц}$ ;  
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ ;

*Найти:*  $p$  -?

т.к.  $\omega = \frac{W}{V}$ ,

$$V = cS\Delta t, W = Nh\nu.$$

Найдем числовое значение:

$$p = \frac{2,5 \cdot 10^{15} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 7 \cdot 10^{19}}{3 \cdot 10^8} = 3,86 \cdot 10^{-7} \text{ (Н/м}^2\text{)}$$

*Ответ:*  $p = 3,86 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}^2$ .

*Решение:*

Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность, равняется:

$$p = (1 + R)\omega = \frac{(1 + R)W}{V} = \frac{(1 + R)W}{cS\Delta t} = \frac{(1 + R)Nh\nu}{cS\Delta t},$$

### Основные задачи

Задача 1. Вычислите энергию, которую несет один фотон: 1) инфракрасного света с длиной волны  $10^{-5}$  м; 2) жесткого рентгеновского излучения с длиной волны  $10^{-12}$  м. Сравните энергии этих фотонов.

(*Ответ:*  $2 \cdot 10^{-20}$  Дж;  $2 \cdot 10^{-13}$  Дж)

Задача 2. Найдите импульс фотона, соответствующего рентгеновскому излучению с длиной волны  $1,5 \cdot 10^{-10}$  м.

(*Ответ:*  $4,4 \cdot 10^{-24}$  кг·м/с)



Задача 3. Энергия фотона равна  $2,76 \cdot 10^{-19}$  Дж. Определите импульс фотона.

(Ответ:  $9,2 \cdot 10^{-28}$  кг·м/с)

Задача 4. Лазер, работающий на длине волны  $5 \cdot 10^{-7}$  м, излучает пучок света мощностью 0,1 Вт. Какое число фотонов излучает лазер за 1 с?

Задача 5. Сколько квантов видимого света излучает 100-ваттная лампа накаливания за 1 с, если в видимый свет переходит 5 % потребляемой энергии? Длина волны видимого света  $5,6 \cdot 10^{-7}$  м.

(Ответ:  $1,4 \cdot 10^{19}$  квантов)

Задача 6. Красная граница фотоэффекта для натрия составляет  $5,3 \cdot 10^{-7}$  м. Определите минимальное значение импульса фотонов, при котором возможно возникновение фотоэффекта для натрия.

(Ответ:  $1,25 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с)

Задача 7. Свет с частотой  $10^{15}$  Гц падает перпендикулярно плоскому зеркалу. Определите изменение импульса фотонов при отражении.

Задача 8. Плотность потока солнечного излучения, приходящего на Землю  $1,4 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>. Вычислите световое давление при условии полного поглощения излучения.

(Ответ:  $0,47 \cdot 10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>)

Задача 9. Излучение от оптического квантового генератора с помощью оптических стекол концентрируется на небольшой поверхности. При этом создается поверхностная плотность энергии  $6 \cdot 10^8$  Дж/см<sup>2</sup>. Длительность импульса 2 мс. Вычислите давление оптического излучения.

(Ответ:  $10^7$  Н/м<sup>2</sup>)

### Дополнительные задачи

Задача 1. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона излучения с длиной волны 52 мкм?

Задача 2. Каков импульс фотона с энергией 6 эВ? Какова длина волны такого излучения?

(Ответ:  $3,2 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с;  $2,1 \cdot 10^{-9}$  м)

Задача 3. Излучатель мощностью 10 Вт создает монохроматическое излучение с длиной волны 662 нм. Определите, сколько фотонов в одну секунду излучает этот источник.

Задача 4. Рубиновый лазер излучает в импульсе  $2 \cdot 10^{19}$  фотонов с длиной волны 694 нм. Чему равна средняя мощность вспышки лазера, если ее длительность  $2 \cdot 10^{-3}$  с?

(Ответ:  $0,3 \cdot 10^5$  Вт)

Задача 5. Фотон частотой  $10^{15}$  Гц перпендикулярно падает на плоское зеркало. Определите изменение импульса фотона при отражении.

Задача 6. Какое давление производит световое излучение на  $1 \text{ м}^2$  черной поверхности, если ежесекундно эта поверхность получает 500 Дж энергии?

Задача 7. Давление солнечного света на поверхность Земли 4,5 мкПа. Определите энергию излучения, падающего ежесекундно на  $1 \text{ м}^2$  Земли, расположенный перпендикулярно лучам.

### Тест для самопроверки

1. Какие из перечисленных ниже явлений получили впервые объяснение на основе квантовой теории света: 1 - интерференция, 2 - дифракция, 3 - фотоэффект, 4 - поляризация?

А. 1, 2, 4. Б. Только 3. В. 3 и 4. Г. Только 1 и 2. Д. Только 1.

2. Чему равна энергия фотона света с частотой  $\nu$ ?

А.  $h\nu c^2$ . Б.  $h\nu c$ . В.  $h\nu$ . Г.  $\frac{h\nu}{c}$ . Д.  $\frac{h\nu}{c^2}$ .

3. Чему равна частота света, если энергия фотона  $E$ ?

А.  $Eh$ . Б.  $\frac{E}{h}$ . В.  $\frac{E}{c}$ . Г.  $\frac{E}{c^2}$ . Д.  $\frac{Eh}{c^2}$ .

4. Чему равен импульс фотона света с частотой  $\nu$ ?

А.  $hvc^2$ . Б.  $hvc$ . В.  $hv$ . Г.  $\frac{hv}{c}$ . Д.  $\frac{hv}{c^2}$ .

5. Первая из двух одинаковых металлических пластин имеет положительный электрический заряд, вторая - отрицательный. Какая из них быстрее разряжается при освещении электрической дугой?

А. Первая. Б. Вторая. В. Обе одинаково. Г. Не разряжается ни одна. Д. Среди ответов А - Г нет правильного.

6. Незаряженная изолированная от других тел металлическая пластина освещается ультрафиолетовым светом. Заряд какого знака будет иметь эта пластина в результате фотэффекта?

А. Положительный. Б. Отрицательный. В. Пластина останется нейтральной. Г. Знак заряда может быть различным. Д. Среди ответов А - Г нет правильного.

7. При освещении электрической дугой отрицательно заряженная металлическая пластина в результате фотэффекта постепенно теряет свой заряд. Как изменится скорость потери электрического заряда пластиной, если на пути света поставить фильтр, задерживающий ультрафиолетовые лучи и свободно пропускающий все остальные?

А. Увеличится. Б. Не изменится. В. Уменьшится. Г. Возможны различные изменения. Д. Среди ответов А - Г нет правильного.

8. При освещении катода вакуумного фотоэлемента потоком монохроматического света происходит освобождение фотоэлектронов. Как изменится максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов при увеличении частоты света в 2 раза?

А. Увеличится в 2 раза. Б. Увеличится менее чем в 2 раза. В. Уменьшится в 2 раза. Г. Уменьшится менее чем в 2 раза. Д. Не изменится.

9. При освещении катода вакуумного фотоэлемента потоком монохроматического света происходит освобождение фотоэлектронов. Как изменится количество фотоэлектронов, вырванных светом за 1 с, если интенсивность света уменьшится в 4 раза?

А. Уменьшится в 16 раз. Б. Уменьшится в 4 раза. В. Уменьшится в 2 раза. Г. Не изменится. Д. Увеличится в 4 раза.

10. При освещении катода вакуумного фотоэлемента потоком монохроматического света происходит освобождение фотоэлектронов. Как изменится максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов при увеличении интенсивности света в 2 раза?

А. Увеличится в 2 раза. Б. Увеличится менее чем в 2 раза. В. Уменьшится в 2 раза. Г. Уменьшится менее чем в 2 раза. Д. Не изменится.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА.....	4
1. Когерентность световых волн. Интерференция света.....	4
Задания к самостоятельной работе.....	11
2. Дифракция света. Принцип Гюйгенса - Френеля.....	15
3. Дифракционная решетка.....	20
Задания к самостоятельной работе.....	26
Тест для самопроверки.....	30
4. Поляризация света.....	31
Задания к самостоятельной работе.....	36
5. Дисперсия света.....	39
6. Виды спектров. Спектральный анализ.....	44
Задания к самостоятельной работе.....	48
Тест для самопроверки.....	52
7. Излучение нагретого тела.....	54
8. Гипотеза Планка. Квант излучения .....	56
9. Фотоэлектрический эффект .....	56
10. Законы фотоэффекта.....	58
11. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.....	60
12. Применение фотоэффекта.....	62
Задания к самостоятельной работе.....	64
13. Фотон. ....	71
14. Давление света.....	72
15. Корпускулярно-волновой дуализм.....	75
Задания к самостоятельной работе.....	77
Тест для самопроверки.....	82

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з фізики  
(розділи «Хвильова оптика. Квантова фізика»)

для студентів-іноземців підготовчих факультетів  
вищих навчальних закладів

Укладачі: ВОЛОСЮК Марина Андріївна  
КУЛИК Олександр Петрович

Авторська редакція

Відповідальний за випуск *Нікітіна Т.Б.*

Комп'ютерна верстка, оформлення оригінал-макета *О.П. Кулик*