



# **ФИЗИКА КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

Москва  
2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Кафедра физики

## **ФИЗИКА КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

*Методические указания к выполнению  
лабораторных работ и решению задач*

Москва  
2020

УДК 537(075)

**Физика колебаний и волн. Квантовая физика:** метод. указ. к выполнению лаб. работы решению задач/ сост.С. Г. Веселко, Е.Е. Карпова, А.Е. Штанько – М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2020. — 32 с.

Приведены описания лабораторных работ и даны задачи по разделу по разделу «Физика колебаний и волн. Квантовая физика». Предназначены для студентов первого и второго курсов всех специальностей.

УДК 537(075)

© Веселко С. Г., Карпова Е.Е., Штанько А.Е. 2020  
© ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2020

## ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

Взаимное усиление и ослабление волн в области их перекрытия, приводящее к тому, что результирующая интенсивность становится функцией разности фаз накладываемых волновых полей, называется *интерференцией*. При интерференции двух волновых полей результирующая интенсивность  $I(x)$  равна:

$$I(x) = I_1(x) + I_2(x) + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2}\cos\Delta\varphi(x), \quad (1)$$

где  $I_1(x)$  и  $I_2(x)$  - интенсивность каждого поля по отдельности,  $\Delta\varphi(x)$  - пространственное распределение разности фаз этих полей вдоль оси  $x$ . Ось  $x$  выбрана так, чтобы она проходила перпендикулярно интерференционным полосам, представляющим собой геометрическое место максимумов интенсивности (светлые полосы) и минимумов (темные) полосы.

Для наблюдения эффекта интерференции достаточным условием является совпадение поляризации волновых полей и постоянство во времени их разности фаз. Поля, для которых названное условие выполняется, называются взаимно когерентными или просто когерентными (в переводе на русский язык - сходными, подобными).

Такие поля получают из одного первоначального волнового поля либо делением его по волновому фронту (как в лабораторной работе "Измерение длины волны света с помощью бипризмы Френеля"), либо делением по амплитуде (лабораторная работа "Измерение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона").

При наложении двух когерентных световых волн максимумы интенсивности получают в точках, где  $\cos\Delta\varphi=+1$ , то есть

$$\Delta\varphi(x) = \pm 2\pi m \quad (m - \text{целое число}), \quad (2)$$

а минимумы интенсивности в точках, где  $\cos\Delta\varphi=-1$ , то есть

$$\Delta\varphi(x) = \pm 2\pi m + \pi. \quad (3)$$

Разность фаз  $\Delta\varphi$  двух волн, которые после деления исходного волнового поля на две волны прошли разную длину оптического пути и приобрели разность хода  $\Delta x$ , равна

$$\Delta\varphi = k\Delta x, \quad (4)$$

где  $k=2\pi/\lambda$  - волновое число. Подставив (4) в (2) и (3), получим, что максимум интенсивности интерференционной картины будет наблюдаться в точках, где

$$\Delta x = \pm m\lambda, \quad (5)$$

а минимумы интенсивности в точках, где

$$\Delta x = \pm m\lambda + \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) используются при интерференционных измерениях геометрических параметров различных изделий (см. лабораторную работу "Измерение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона").

## Лабораторная работа 1

### Измерение радиуса кривизны линзы по кольцам Ньютона

**Цель работы:** исследование интерференции света от воздушной прослойки и определение радиуса кривизны линзы.

Интерференционные полосы в форме концентрических колец от тонкой воздушной прослойки впервые описаны И. Ньютоном в 1676 г. Принципиальные схемы экспериментальной установки приведены на рис. 1,2.

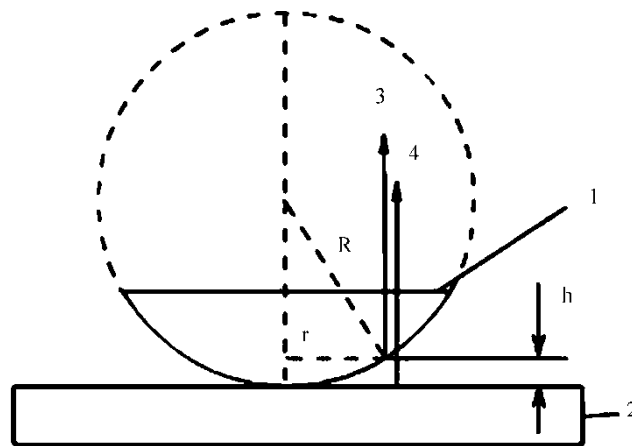


Рис.1.1 – плоско-выпуклая линза; 2 – «черная» пластинка; 3,4 – интерферирующие лучи.

Кольца Ньютона возникают при интерференции световых волн, отраженных от границ тонкой воздушной прослойкой, образованной выпуклой поверхностью линзы (1) и плоской стеклянной пластинкой, изготовленной из «черно» стекла (2). Наблюдение ведется в отраженном свете. Интерференционные полосы локализованы на границе поверхности воздушной прослойки и линзы. Толщина «черной» пластики выбрана такой, что преломленный луч полностью поглощается на пути до нижней поверхности. В эксперименте используется плоско-выпуклая линза с достаточно большим радиусом кривизны, что позволяет пренебречь небольшими наклонами лучей, проходящими в воздушном зазоре. В этом случае разность хода между интерферирующими лучами, равна  $2h$ , определяется из уравнения:

$$r^2 = R^2 - (R-h)^2 = 2Rh - h^2$$

При  $2R \gg h$  разность хода между интерферирующими лучами равна

$$2h = \frac{r^2}{R}.$$

При вычислении разности фаз  $\Delta\varphi$  между интерферирующими лучами необходимо учесть изменение фазы световой волны, связанная с её отражением от границ стекло-воздух и воздух-стекло. Как известно [2], отражение световой волны от границ воздух-стекло происходит с изменением фазы на  $\pi$ . Изменение фазы световой волны при отражении от границы раздела стекло-воздух отсутствует. Поэтому полная разность фаз между интерферирующими лучами равна

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2h + \pi = \frac{2\pi}{\lambda} (2h + \frac{\lambda}{2})$$

Светлые кольца в интерференционной картине наблюдаются при условии, когда

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{r^2}{R} + \pi = 2\pi m, m = 1, 2, 3, \dots$$

Отсюда следует, что радиус светлого пятна  $r_{c.m}$  равен

$$r_{c.m} = \sqrt{(2m - 1) \frac{R\lambda}{2}} = \sqrt{\frac{R\lambda}{2}} \sqrt{(2m - 1)}.$$

Радиус темного кольца определяется условиями

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{r^2}{R} + \pi = (2m + 1)\pi,$$

$$r_{T,M} = \sqrt{mR\lambda} = \sqrt{\frac{R\lambda}{2}} \sqrt{2m}, m = 1, 2, 3, \dots$$

### Описание прибора

Измерение радиусов интерференционных колец проводится с помощью микроскопа МБС-9. На столике микроскопа помещается «чёрная» пластинка, к которой тремя винтами и пружинным кольцом прижимается плоско-выпуклая линза. Держатель пластинки и линзы может перемещаться по столу микроскопа. Для освещения линзы в отраженном свете используется специальное устройство (рис.2).

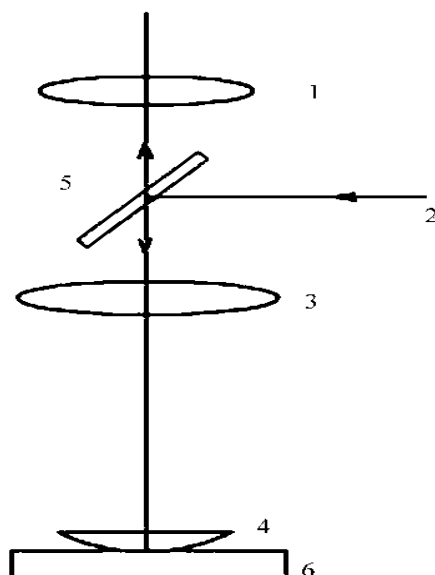


Рис.2. Освещение линзы: 1 – окуляр микроскопа, 2 – светодиод, 3 – объектив микроскопа, 4 – линза, 5 – полупрозрачная пластинка, 6 – «черная» пластинка.

В качестве источника света используется светодиод СДЦ, генерирующий излучение на трех длинах волн:  $\lambda_1=624\text{нм}$ ,  $\lambda_2=522\text{нм}$ ,  $\lambda_3=469\text{нм}$ . Для перехода от одной спектральной линии к другой используются тумблеры, находящиеся на блоке питания. При выполнении эксперимента можно использовать как поочередное, так и одновременное включение светодиодов. Для измерения радиуса  $r_m$  интерференционных колец используется оптическая шкала в окуляре микроскопа. В табл. 1 приведена цена одного деления измерительной шкалы в зависимости от увеличения микроскопа.

**Таблица 1**

Увеличение микроскопа	Цена одного деления измерительной шкалы, мм
1	0,1
2	0,05
4	0,025
7	0,015

### **Измерения. Определение радиуса кривизны линзы**

При определении радиуса кривизны  $R$  линзы поочередно используют линии  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ . Держатель с линзой располагают на столике микроскопа так, чтобы точка соприкосновения линзы с пластиной оказалась в центре светового пятна. Четкости интерференционных колец добиваются посредством фокусировки микроскопа. Наблюдаемая интерференционная картина в этом случае будет выглядеть так, как показано на рис.3.

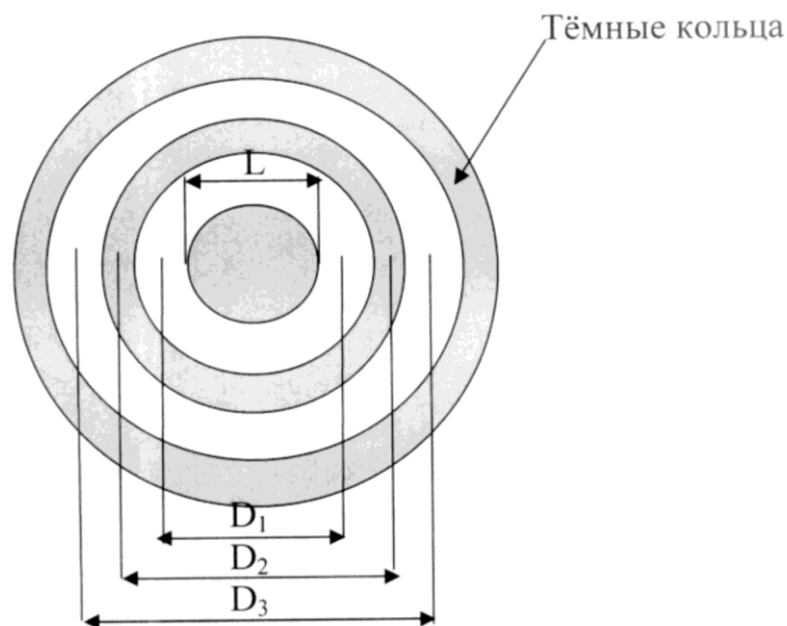


Рис.3.

Используя измерительную шкалу в окуляре микроскопа определяют диаметры  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ... светлых и темных интерференционных колец. Полученные результаты следует записывать в табл. 2.

Следует провести измерения диаметра «L» в центре интерференционной картины, возникновение и размеры которого связаны с деформацией поверхностей линзы и стеклянной пластинки в месте их соприкосновения. Деформация поверхностей линзы и стеклянной пластинки вносит погрешности в расчеты радиуса кривизны линзы по приведенным выше формулам при малых значениях  $m$ . Для более точного вычисления радиуса кривизны линзы  $R$  по измеренным значениям  $r_m$  и  $r_n$  интерференционных колец (светлых  $m$ ,  $n$  и темных  $m'$ ,  $n'$ ) следует использовать формулу

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m - n)\lambda},$$

а значения  $m$  брать настолько большими.<sup>1</sup>

Таблица 2

	$m$	$D_m^{\text{светлое}}$	$m'$	$D_{m'}^{\text{тёмное}}$	$L$	$m-n$	$m'-n'$	$R$
$\lambda_1$								

<sup>1</sup> Вывод этой формулы предлагается сделать самостоятельно



$\lambda_2$								
$\lambda_3$								

Правильная форма колец Ньютона легко искажается даже при значительных дефектах в обработке выпуклой поверхности линзы и верхней поверхности пластины. Наблюдение формы колец позволяет быстро оценить качество работ по изготовлению линзы и пластины.

Для дополнительного контроля полученных результатов измерений радиуса кривизны линзы целесообразно провести эксперимент по определению фокусного расстояния  $f$  плоско-выпуклой линзы. Зная значение фокусного расстояния  $f$ , радиус кривизны  $R$  линзы определяется по формуле

$$R = (n - 1)f,$$

где  $n$  – показатель преломления стекла линзы ( $n=1,5$ ). Для проведения эксперимента необходимо извлечь линзу из держателя и

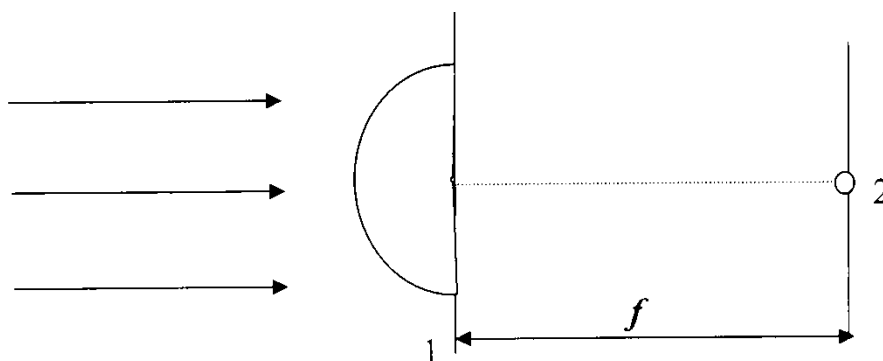


Рис.4.1 – линза; 2 - экран

направить световой поток от удаленного источника света по главной оптической оси линзы, измерить  $f$  (рис.4).

Для более полного понимания наблюдаемой интерференционной картины предлагается объяснить:

1. Как образуется и от чего зависит формы и размеры «черного» пятна в центре интерференционной картины?
2. Как зависит радиус интерференционного кольца от длины волны?
3. Как изменится интерференционная картина при одновременном освещении двумя линиями  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ?
4. Можно ли получить в отраженном свете в центре интерференционной картины светлое пятно?

5. Почему радиус кривизны  $R$  линзы должен быть достаточно большим?

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Савельев И.В. Курс Физики. т. III М.: Из-во «Наука», 1971.
2. Сивухин Д.В. Оптика. М.: Из-во «Наука», 1985.
3. Лансберг Г.С. Оптика. М.: Из-во «Наука», 1976.

## Лабораторная работа 2

### Измерение длины волны света с помощью бипризмы Френеля

**Цель работы:** ознакомление с явлением интерференции света и применением интерференции в измерительных целях.

**Оборудование:**

1) Оптическая скамья учебная, 2) Источник излучения – узкая длинная прямая регулируемая щель, освещённая светом He-Ne лазера (без указания длины волны), 3) Бипризма Френеля, 4) Экран для наблюдения интерференционной картины, 5) Рулетка для измерения расстояния от щели до экрана.

**Краткая теория:**

Бипризма Френеля 2 (состоящая из двух одинаковых стеклянных призм с общим основанием и малым углом  $\beta$  при вершине) раздваивает падающую на нее волну света, идущего из узкой щели  $S$  (см.1). В результате два взаимно когерентных (согласованных по необходимым параметрам, таким как поляризация, длина волны  $\lambda$ , сдвиг по начальным фазам) световых потока, прошедшие через разные половины бипризмы, при дальнейшем их распространении накладываются друг на друга. В области перекрытия волн СВ устанавливают экран, на котором наблюдают интерференцию (см. рис.1, где в основном прорисованы лучи, идущие через верхнюю половину бипризмы).

Интерференционная картина локального взаимного усиления или ослабления света получается так, как будто свет идет от двух мнимых источников  $S_1$  и  $S_2$ , расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга.

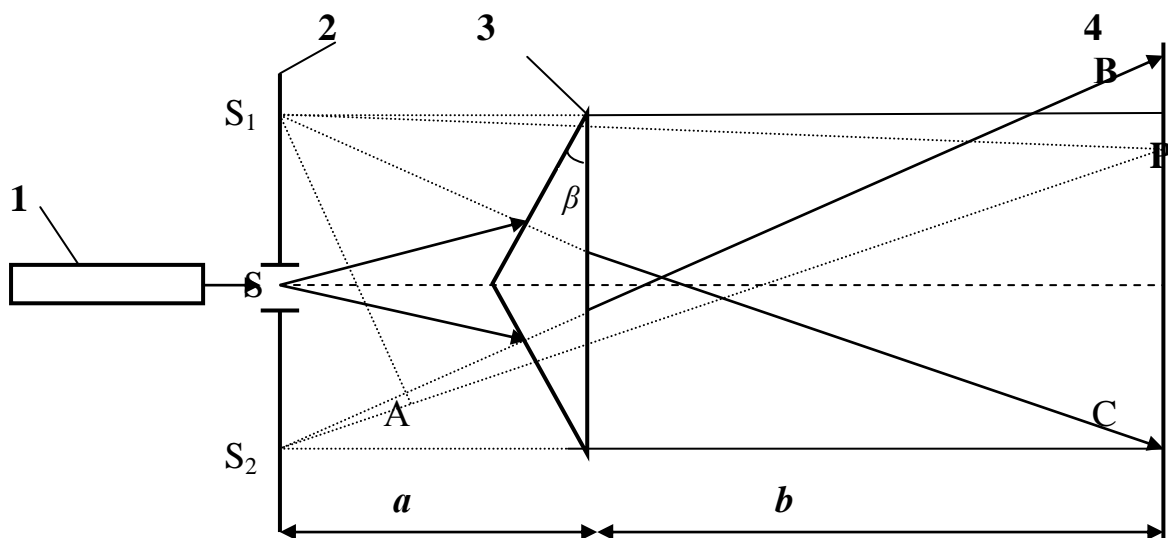


Рис.1

Это расстояние легко рассчитывается из геометрии рассматриваемой задачи, если учесть, что углы отклонения лучей, идущих от источника света к экрану, малы и их синусы и тангенсы можно заменить самими углами.

Из рисунка видно, что для малых углов расстояние между мнимыми источниками  $S_1S_2 = d = 2S_1S = 2a \gamma = 2a(n-1)\beta$ , где  $n$  - показатель преломления вещества бипризмы,  $\beta = (8,0 \pm 0,5)10^{-3}$  рад – её преломляющий угол, а  $\gamma$  - угол отклонения первичного луча.

В этом легко убедиться, воспользовавшись законом преломления и малостью углов. Особенно прост расчет, если бипризму считать повернутой тупым углом в сторону экрана (см. рис. 3). Здесь угол отклонения от прямолинейного направления прошедших через призму лучей легко вычисляется по закону преломления и видно, что  $\gamma = \beta(n-1)$ .

При достаточном удалении экрана можно, не внося заметной погрешности в расчёты, считать встречающиеся на экране лучи (например, в точке Р)  $S_1P$  и  $S_2P$  параллельными друг другу. Тогда, используя подобие «прямоугольных» треугольников  $S_1S_2A$  и  $SPO$ , легко выразить расстояние между соседними интерференционными полосами на экране (тёмными или светлыми), называемое шириной интерференционной полосы, у нас обозначается  $x_1$ . Для этого приравнять длине волны  $\lambda$  изменение разности хода от источников до экрана  $S_2A = (S_2P - S_1P)$ , для разного положения точки Р на экране. Если теперь воспользоваться условием максимумов для интерференции излучения от двух точечных источников  $d \sin \theta = m\lambda$  или  $d\theta = m\lambda$ , где  $\sin \theta = \tan \theta = \theta$  - угол из щели на точку наблюдения, а  $m$  - порядок интерференции, то предсказываемая теорией интерференции в параллельных лучах (через  $\theta = x_m / (a + b)$ ) зависимость ширины интерференционной полосы  $x_1$  от расстояния между щелью и бипризмой, то есть от  $a$  принимает вид:

$$x_1 = \frac{x_m}{m} = \frac{\lambda(a+b)}{2(n-1)\beta} \cdot \frac{1}{a} = k \frac{1}{a}, \quad (1)$$

где  $x_m$  - расстояние до  $m$  – го минимума на экране,  $(a + b)$  – расстояние от щели (источника) до экрана, а  $k$  – угловой коэффициент наклона прямой на графике зависимости ширины интерференционной полосы от обратного расстояния между щелью и бипризмой  $x_1 = f(1/a)$ . Через него легко вычислить длину волны излучения, усреднённую по многим измерениям.

$$\lambda = k \frac{2(n-1)\beta}{(a+b)}. \quad (2)$$

Перемещая бипризму, но оставляя неизменным расстояние между источником света и экраном  $(a + b)$ , можно убедиться в линейном характере зависимости ширины полосы от обратного расстояния до бипризмы.

Для каждого отдельного измерения длину волны можно вычислить по формуле:

$$\lambda = \frac{x_1 2(n-1)\beta a}{(a+b)}. \quad (3)$$

## Экспериментальная часть

Освещённая светом лазера узкая раздвижная щель устанавливается на удобной для начала отсчёта отметке, например, 0,2 м, а бипризма – на некотором, переменном, расстоянии перед щелью. Экран для наблюдения интерференционной картины устанавливается на большом расстоянии ( $a + b$ ), заранее измеренном с помощью рулетки.

**Задание 1.** Проверить, правильно ли указана величина преломляющего угла бипризмы. Для этого, убрать с оптической скамьи рейтер с регулируемой щелью (или раскрыть щель до предела), добиться (поперечным перемещением бипризмы) изображения на экране двух одинаковых светлых пятен. Измеряя расстояние  $Y$  между центрами этих пятен и зная расстояние  $L$  от бипризмы до экрана, можно вычислить преломляющий угол бипризмы  $\beta = \frac{Y}{L}$ , если показатель преломления  $n = (1,50 \pm 0,01)$  (см. Приложение).

**Задание 2.** Расстояния между щелью и бипризмой можно устанавливать любые, но для удобства построения графика лучше брать те расстояния, которые указаны в таблице, а для повышения точности измерения ширины интерференционной полосы  $x_1$  следует измерять на экране расстояние  $x_m$ , которое занимают  $m$  полос, беря их число как можно больше. Тогда  $x_1 = \frac{x_m}{m}$ . Все результаты измерений заносят в таблицу.

Таблица 1

№	$a$ , м	$m$	$x_m$ , мм	$x_1$ , мм	$\lambda \cdot 10^3$ , мм	$\Delta\lambda$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Сначала заполняются первые пять столбцов. Затем заполняют остальные.

**Задание 3.** При заполнении предпоследнего столбца таблицы лучше воспользоваться упрощённой, линеаризованной формулой для оценки относительной погрешности в косвенных измерениях

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta(a+b)}{(a+b)} + \frac{\Delta(n-1)}{(n-1)} + \frac{\Delta\beta}{\beta} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta x_1}{x_1},$$

где два последних слагаемых в сумме определяют относительную погрешность измерения углового коэффициента наклона на графике, а последнее слагаемое определяется из того правила, что при измерениях, производимых по интерференционным полосам, за абсолютную погрешность принимается ширина интерференционной полосы. Значит, последнее слагаемое в этой

формуле равно  $\frac{1}{m}$ . Отсюда ясно, что для повышения точности при измерениях следует брать как можно больше полос. Вклад в погрешность со стороны разных величин может отличаться по порядку величины. Зная относительную погрешность, легко найти абсолютную погрешность по формуле  $\Delta\lambda = \varepsilon \cdot \lambda$ .

**Задание 4.** Используя табличные данные, постройте график зависимости ширины интерференционной полосы  $x_1$  от обратной величины расстояния между источником света и бипризмой, то есть  $x_1 = f(1/a)$ . Поскольку значения  $x_1$  наносятся на график с учётом величины доверительного интервала, то через все эти интервалы будет проходить целый веер прямых, образуя усреднённый по ряду опытов «коридор погрешностей». Срединная прямая внутри этого коридора определяет искомый, графически усреднённый, угловой коэффициент наклона  $k$ , необходимый для нахождения усреднённой длины волны. Угол раскрытия этого «коридора» определяет погрешность.

Окончательный результат следует представить в виде:

$$\lambda = (\langle \lambda \rangle \pm \Delta\lambda) \text{ (единицы измерения).}$$

#### Обсуждение результатов и выводы

Сравните полученную в эксперименте расчётно-графическую зависимость с теоретически предсказываемой, сделайте вывод о применимости в данной работе представления об интерференции в

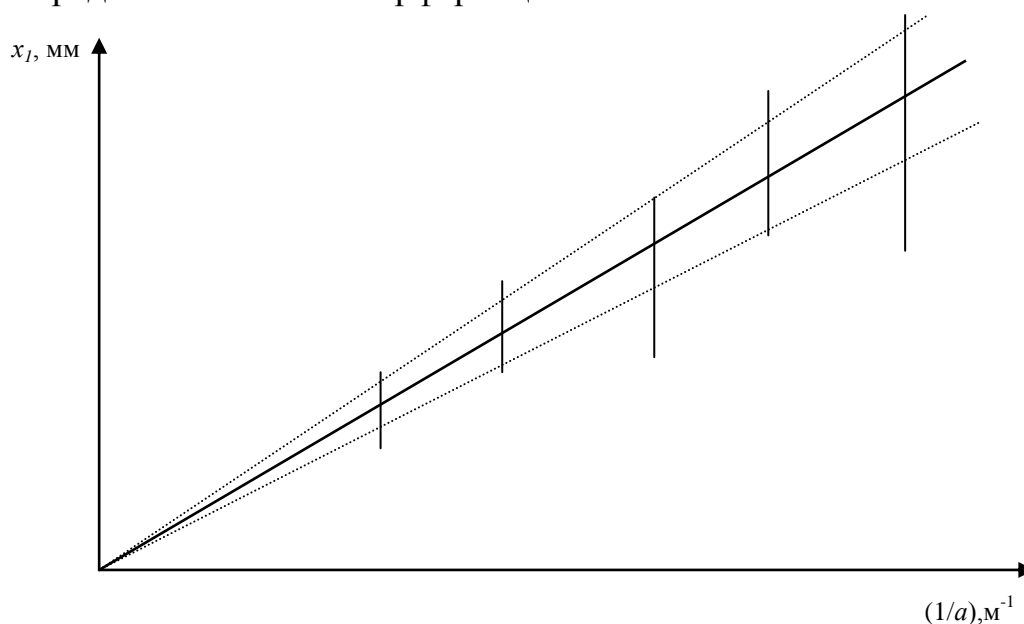


Рис.2.

параллельных лучах. Вспомните, при каких значениях волнового числа Френеля  $N_{\text{Ф}} = d^2/R\lambda$  можно считать интерферирующие пучки света параллельными. Здесь  $R$  - расстояние от источника света до экрана,  $\lambda$  – длина волны,  $d$  – расстояние между источниками света (в нашем случае). В общем случае  $d$  есть оценочный размер дифракционного объекта.

#### Контрольные вопросы

1. Что такое интерференция световых волн?
2. Какие условия должны выполняться, чтобы наблюдать четкую интерференционную картину?

3. При какой разности хода двух когерентных волн при их интерференции будет наблюдаться максимум, а при какой – минимум интенсивности?
4. Какая должна быть разность фаз когерентных волн, чтобы при их интерференции наблюдался максимум? То же для минимума.
5. Как связаны разность хода и разность фаз?
6. Чему равно волновое число?
7. Чему равна разность хода волн, интерферирующих на экране?

### Список рекомендуемой литературы

1. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Т.4. Оптика. М.:Наука, 2013.
2. И.В. Савельев. Курс общей физики. Т.2. М.:Астрель, 2008. ГЛ. XVII, §121.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

При падении луча света на границу раздела двух сред согласно закону преломления (Снеллиуса) угол отклонения преломлённого луча относительно перпендикуляра к границе раздела сред (у нас он обозначен  $\alpha$ ) определяется по формуле:

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{n_0}{n},$$

где  $n_0$  - показатель преломления воздуха (который мы считаем равным 1),  $n$  – показатель преломления вещества бипризмы,  $\beta$  – угол падения луча на границу среда-воздух (при переходе луча из вещества в воздух), а  $\alpha$  - угол преломления на выходе из вещества в воздух.

В силу малости углов закон преломления принимает вид  $\alpha = n\beta$ .

Из Рис.3 видно, что полный угол отклонения первоначально распространявшегося в горизонтальном направлении луча после

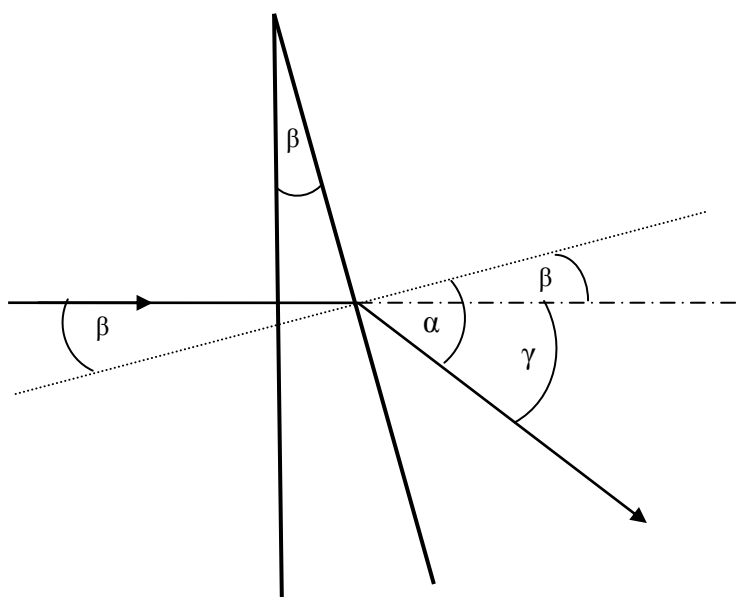


Рис.3.

прохождения через призму (с малым преломляющим углом  $\beta$  при вершине) находится как разность углов  $\alpha$  и  $\beta$ , то есть  $\gamma$

$$\gamma = \alpha - \beta = (n - 1)\beta.$$

Эта связь позволяет легко измерить преломляющий угол бипризмы, если убрать находящуюся перед бипризмой узкую щель (обеспечивающую пространственную когерентность идущего через бипризму излучения). В этом случае на экране видны два пятна, получающиеся в результате отклонения каждой из половинок бипризмы раздвоенного луча, то есть угол расхождения их волновых фронтов равен  $2\gamma$ . Обычно бипризму изготавливают из стекла с показателем преломления  $n = 1,5$ . В этом случае  $\beta = 2\gamma$ , и оказывается достаточно измерить угол расхождения прошедших через половинки бипризмы лучей, чтобы определить преломляющий угол бипризмы  $\beta$ .



## ДИФРАКЦИЯ

Упрощенно дифракцию можно определить как явление огибания волнами препятствий, т.е. нарушение закона прямолинейного распространения света. Более подробное рассмотрение показывает, однако, что этот закон нарушается и тогда, когда волны проходят в средах, содержащих частично поглощающие их предметы или предметы, отличающиеся от среды показателем преломления. Все перечисленные предметы объединяются термином “оптическая неоднородность”. Дифракция включает в себя комплекс явлений, происходящих при распространении волн в средах с оптическими неоднородностями.

Для математического описания явления дифракции удобно использовать модель процесса распространения световой волны, получившую название принципа Гюйгенса – Френеля. В соответствии с принципом Гюйгенса - Френеля, любая точка волнового фронта является источником вторичной сферической волны. Вторичные волны от различных точек фронта имеют одну и ту же частоту (ту же самую, что и у первичной волны), следовательно они когерентны, и в любой точке наблюдения, накладываясь друг на друга, интерferируют. Интерференция волн, образованных вторичными источниками, и создает картину распределения интенсивности, называемую дифракционной. В настоящих лабораторных работах исследуется дифракция в дальней (по отношению к предмету) зоне, называемая также дифракцией Фраунгофера. Она характеризуется тем, что для нее число Френеля

$$N_{\Phi} = \frac{d_{\max}^2}{\lambda L} \ll 1,$$

где  $D_{\max}$  – максимальный поперечный размер предмета,  $\lambda$  – длина волны,  $L$  – расстояние от предмета до плоскости наблюдения. В лекционной части курса показано, что именно в этой области дифракционная картина поддается наиболее простому математическому описанию в связи с тем, что кривизной волн от вторичных источников можно пренебречь и считать их практически плоскими.

## ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ЩЕЛИ

**Цель работы:** ознакомление с явлением дифракции света и использованием его для измерения и контроля размеров отверстий в деталях и изделиях.

При прохождении излучения через щель интенсивность света в любой точке экрана, расположенного в дальней зоне, зависит от числа зон Френеля, наблюдаемых в щели из этой точки. В случае дифракции Фраунгофера на щели зоны Френеля имеют вид узких прямолинейных полос, параллельных краям щели. Ширина зон Френеля  $\Delta$  зависит от угла наблюдения  $\theta$  (см. рисунок) и определяется из условия, чтобы разность хода волн от краев зоны равнялась  $\lambda/2$

$$\Delta = \lambda / 2\sin\theta. \quad (1)$$

Число наблюдаемых в щели зон Френеля равно  $b/\Delta$ , где  $b$  – ширина щели. Если это число четное, то интенсивность света в точке наблюдения равна нулю, так как волны от любых двух соседних зон Френеля приходят в противофазе. Если же число зон Френеля нечетное (кроме нуля), то излучение одной из зон остается некомпенсированным и на экране наблюдается максимум интенсивности.

Итак, условием наблюдения минимумов интенсивности на экране является  $b/\Delta = 2m$ , где  $m$  – целое число. Отсюда с учетом (1) получаем условие

$$b\sin\theta = m\lambda,$$

Соответственно, максимумы интенсивности получаются при условии

$$b\sin\theta = (m + \frac{1}{2})\lambda,$$

щели по дифракционной картине, целесообразно придать следующий вид:

$$b = 2m\lambda L / 2x_m, \quad (2)$$

где  $2x_m$  – расстояние между двумя симметричными минимумами порядка  $m$ .

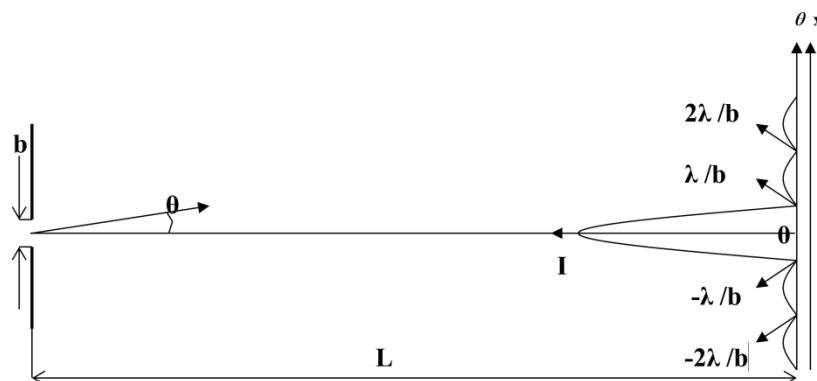


Рис. 1.

## Выполнение измерений

Лазер устанавливается на одном конце оптической скамьи, а экран наблюдения на другом конце так, чтобы расстояние  $L$  от щели до экрана составляло около 1м. Это расстояние  $L$  при каждом измерении следует фиксировать (можно вообще все время держать его постоянным).

После включения лазера и центрирования щели вращением микрометрического винта следует добиться закрытия щели, и при выполнении эксперимента производить вращение винта для открывания щели все время в одну сторону, чтобы исключить влияние люфта винта. По мере открывания щели ее дифракционная картина на экране будет становиться все более сжатой. Измерения следует начинать, когда расстояние между первыми минимумами будет составлять около 30 - 50мм, но, чтобы повысить точность измерений, измерять желательно расстояния между минимумами высоких порядков. Следует сразу оценивать и фиксировать погрешность  $\Delta(2x_m)$  при измерении расстояний  $2x_m$  между минимумами  $m$ -го порядка.

При снятии отчетов  $N$  по лимбу микрометрического винта шаг отсчета  $\Delta N$  от одного замера к другому должен составлять около десяти делений (5 – 20) с постепенным увеличением.

Экспериментальные данные заносятся в таблицу (первоначально заполняются первые пять столбцов).

$$\lambda=0,633 \text{ мкм}$$

№	$N, \text{дел}$	$m$	$2x_m, \text{мм}$	$\Delta(2x_m), \text{мм}$	$b, \text{мкм}$	$\Delta b, \text{мкм}$
1						
2						
3						
...						
10						

## Обработка результатов измерений

В связи с тем, что длина волны лазера известна с высокой точностью, а точность измерения  $L$  на порядок выше, чем точность измерения  $2x_m$ , относительная погрешность:

$$\Delta b = (b)' = 2m\lambda L \Delta(2x_m) / (2x_m)^2 \quad (3)$$

Знание  $\Delta(2x_m)$  и вычисление  $b$  и  $\Delta b$  позволяет полностью заполнить таблицу, после чего следует построить график зависимости ширины щели  $b$  как функцию отсчета по лимбу микрометрического винта, т.е.  $b=f(N)$ .

При хорошо отлаженном механизме подачи клина, раздвигающего створки щели, ширина щели  $b$  нарастает прямо пропорционально углу поворота микрометрического винта, т.е. прямо пропорционально отсчету  $N$  по круговой шкале. Следовательно, должна выполняться зависимость:  $b = \text{const} \cdot N$ .

Сравните полученную в эксперименте расчетно-графическую зависимость  $b = f(N)$  с ожидаемой из конструкции механизма линейной зависимостью, сделайте вывод о применимости в данной работе формулы (2), полученной в приближении френелевской дифракции.

Вычислите параметр Френеля для первого и последнего из ваших измерений и согласуйте выводы с экспериментальными данными. Оцените влияние точности измерений на ваши выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое дифракция Фраунгофера?
2. Какой параметр определяет границы применимости дифракции Фраунгофера?
3. Можно ли использовать данную установку для измерения длины световой волны и, если да, то, что для этого необходимо знать?
4. Определите по вашему графику, при каком отсчете  $N_0$  по лимбу микрометрического винта щель следует считать закрытой?
5. Оцените точность, с которой вы определяете  $N_0$ .
6. Как изменится масштаб дифракционной картины, если изменятся:
  - а) длина волны;
  - б) ширина щели;
  - в) расстояние  $L$ ?

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. М.:Астрель, 2008.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.4. Оптика. М.:Физматлит, 2013.

## ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРИОДА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

**Цель работы:** ознакомление с явлением дифракции света и использованием его для измерения периода дифракционной решетки.

Дифракционную решетку используют в качестве спектрального прибора для измерения длин волн излучения видимого диапазона. При этом она должна быть аттестована. Аттестация заключается в измерении периода дифракционной решетки  $d$  с помощью квазимонохроматического излучения, для которого средняя длина волны  $\lambda$  известна с точностью, превышающей точность спектральных измерений.

В данной работе период дифракционной решетки, изготовленной голографическим методом, измеряется с помощью излучения гелий-неонового лазера, для которого  $\lambda=0,6328$  мкм.

Принципиальная схема измерительной установки изображена на рис.1.

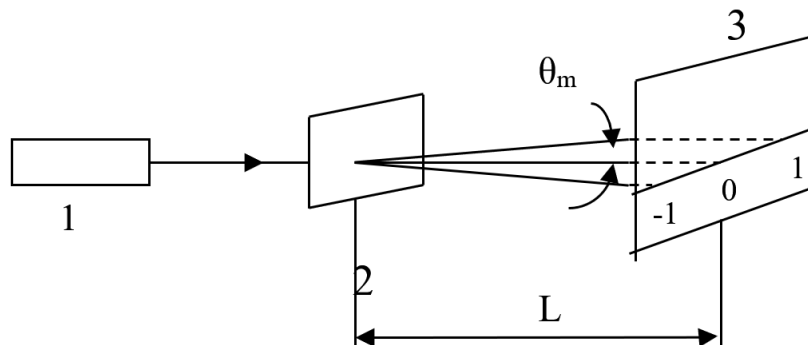


Рис.1. 1- гелий-неоновый лазер, 2 – голографическая дифракционная решетка, установленная на держателе, 3 – экран наблюдения с измерительной шкалой. Все элементы измерительной установки располагаются на оптической скамье.

На экране наблюдается дифракционная картина, получаемая после прохождения лазерного луча через дифракционную решетку и состоящая из ряда ярких точек, соответствующих максимумам порядков  $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Угловые положения максимумов описываются формулой, полученной из условия, чтобы разность хода от любых двух соседних щелей решетки до точки наблюдения была бы кратна длине волны:

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{d}, \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

Отсюда по известным значениям  $\lambda$ ,  $m$  и  $\sin \theta$  можно найти  $d$ .

Перед выполнением измерений необходимо провести юстировку (наладку) оптической системы. Экран наблюдения устанавливается таким образом, чтобы в отсутствие дифракционной решетки лазерный луч попадал в центр измерительной шкалы. После этого на оптическую скамью устанавливается держатель с дифракционной решеткой. Меняя расположение дифракционной решетки, следует добиться попадания луча лазера в ее центр.

Плоскость дифракционной решетки должна быть перпендикулярна лазерному лучу. При таком положении световой луч, отраженный от стеклянной подложки дифракционной решетки, распространяется строго по освещающему ее лазерному лучу.

### Выполнение измерений

1. Измерить расстояние  $L$  между дифракционной решеткой и экраном наблюдения.
2. Измерить расстояние  $r_m$  между максимумом нулевого порядка  $m=0$  и максимумами порядков  $m=0, \pm 1, \pm 2$ .
3. Вычислить  $\sin \theta_m = \frac{r_m}{\sqrt{r_m^2 + L^2}}$ .
4. Вычислить период дифракционной решетки  $d = \frac{m\lambda}{\sin \theta_m}$ .
5. Провести измерения для двух значений  $L$ .
6. Определить среднее значение  $d$  и оценить погрешность измерения  $\Delta d$ .
7. Полученные измерения занести в таблицу:

№	$L$	$m$	$r_m$	$\sin \theta_m$	$d$

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип Гюйгенса – Френеля.
2. Считая, что каждая щель дифракционной решетки является источником вторичных волн, выведите формулу (1).
3. Как объяснить уменьшение интенсивности дифракционных максимумов с ростом их порядкового номера  $m$ ?

### Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. М.:Астрель, 2008.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.4. Оптика. М.:Физматлит, 2013.

## ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

**Цель работы:** изучение законов внешнего фотоэффекта. Анализ процессов взаимодействия потока света с фотокатодом. Определение постоянной Планка.

**I. Внешний фотоэффект** – это испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Фотоэффект – квантовое явление. Классическая волновая теория света не может объяснить всех закономерностей фотоэффекта. Опытным путем были установлены следующие основные законы фотоэффекта (законы А.Г. Столетова).

1. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.
2. Число фотоэлектронов  $n$ , вырываемых из фотокатода за единицу времени, пропорциональна интенсивности света.
3. Для каждого вещества существует минимальная частота света  $\nu_0$ , при которой ещё возможен фотоэффект. Величина  $\nu_0$  зависит от химической природы вещества и состояния поверхностного слоя.

Теоретическое объяснение законов фотоэффекта на основе квантовой оптики было дано А. Эйнштейном в 1905 году. Энергетический баланс взаимодействия фотонов с веществом записывается следующим соотношением:

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

где  $h\nu$  - энергия поглощенного фотона,  $A$  - работа выхода электрона,  $E_{\max}$  - максимальная кинетическая энергия вылетевшего фотоэлектрона

Следует обратить внимание на то, что даже при монохроматическом освещении энергия электронов, вылетающих из материала, оказывается не одинаковой. Это связано с тем, что акт взаимодействия, результатом которого является испускание электронов, происходит не только на поверхности, но и внутри материала, и, следовательно, часть энергии электроном может быть потеряна. Распределение по энергиям фотоэлектронов, вышедших из материала фотокатода, приведено на рис. 1.

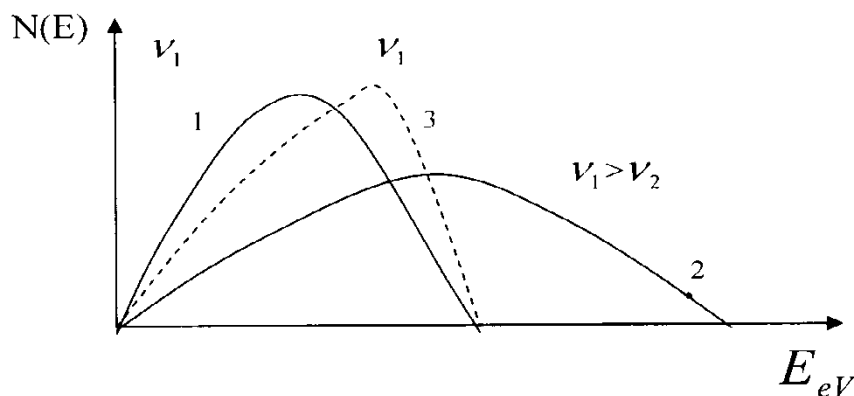


Рис. 1. Распределение фотоэлектронов по энергиям

Кривые 1 и 2 для случая «толстого» слоя материала («объёмный фотоэффект»), кривая 3 – для случая «тонкого» слоя материала («поверхностный фотоэффект»).

**II. Принципиальная схема опыта** приведена на рис. 2, а, б.

Поток света от источника  $S$  падает на катод  $K$  фотоэлемента  $\Phi$ . В качестве источника света служат светодиоды с повышенной яркостью. Длины волн излучения  $\lambda_1=624$  нм,  $\lambda_2=522$  нм,  $\lambda_3=469$  нм. Светодиоды включаются поочередно. Стабильность работы фотоэлемента, включая его спектральные характеристики, определяется как типом фотокатода, так и многими его конструктивными особенностями (материалом подложки, вакуумом, темновыми токами, временем работы и т.д.).

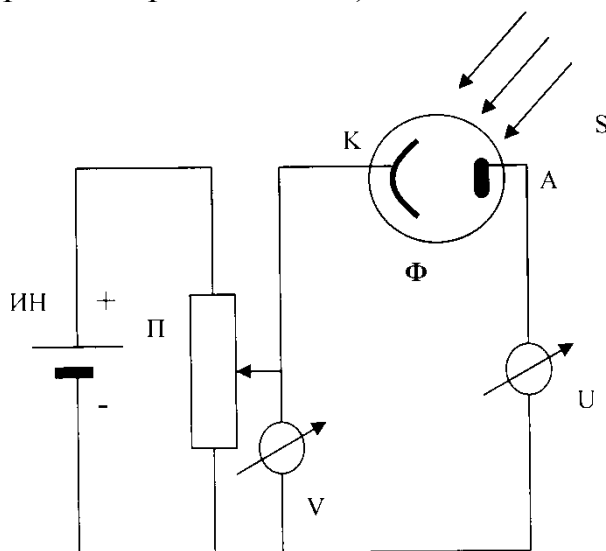


Рис. 2а. Принципиальная схема установки:  $\Phi$  – вакуумный фотоэлемент,  $K$  – катод фотоэлемента;  $A$  – анод фотоэлемента;  $S$  – источник света;  $П$  – потенциометр;  $ИН$  – источник напряжения;  $V$  и  $U$  – вольтметры

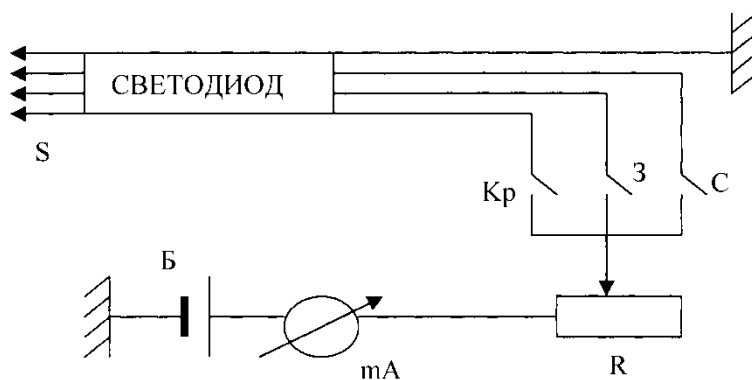


Рис. 2б. Принципиальная схема установки:  $S$  – светодиод;  $R$  – реостат;  $mA$  – миллиамперметр;  $Б$  – источник питания светодиода (батарея)

Величина фотопотока в фотоэлементе зависит от интенсивности света, падающего на катод, и от приложенного напряжения между анодом и катодом. При  $V = 0$  фотопоток отличен от 0, т.к. электроны покидают катод с некоторой



скоростью. Чтобы не было фотопотока («задержать» электроны), надо приложить между анодом и катодом задерживающее отрицательное напряжение («задерживающий потенциал»)<sup>2</sup>. Напряжение на фотоанодерегулируется потенциометром П, а его значение определяется по показателям вольтметра V.

Наличие фототока в цепи фотоэлемента и его величина регистрируется вольтметром  $U(I_{\text{ф(отн.ед.)}} \sim V)$ .

Электрическая схема установки смонтирована в специальном блоке (рис. 2б).

### III. Измерения. Опыт 1. Проверка законов Столетова

Выполнение измерений проводится в следующем порядке. После проверки правильности собранной схемы и подключения электрического блока установки к сети нажать кнопку «Кр». В этом случае будет включен «Красный источник света» с  $\lambda_1=624$  нм. По миллиамперметру «mA» реостатом R установить ток через светодиод 20 мА. Изменяя потенциометром П напряжение V на катоде фотоэлемента, снять зависимость  $I_{\text{ф.(отн.ед.)}} = f(V)$ . Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица

**Зависимость фототока от напряжения катода для разных длин волн**

$\lambda$ , нм	$I_{\text{светодиода}}$ , мА							$V_3$ , В
		V, В						
624	20	$I_{\text{ф.(отн.ед.)}}$						
522	5	V, В						
		$I_{\text{ф.(отн.ед.)}}$						
469	5	V, В						
		$I_{\text{ф.(отн.ед.)}}$						

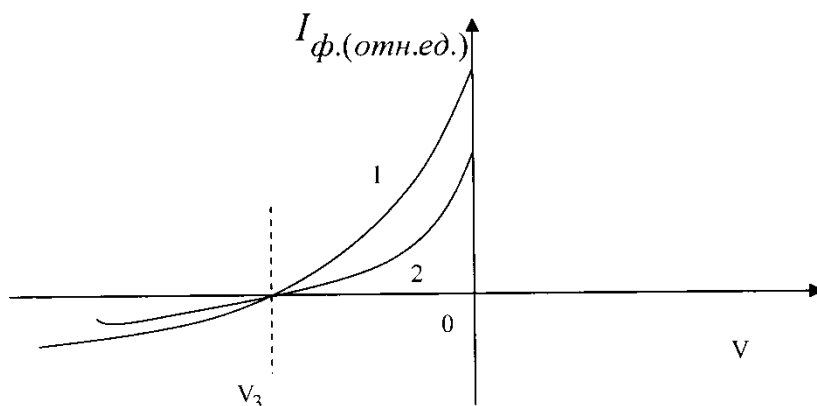


Рис. 3. Зависимость фототока от напряжения.  $\lambda = 624$  нм. Кривая 1 получена при  $i_{\text{светодиода}} = 30$  мА, кривая 2 получена при  $i_{\text{светодиода}} = 20$  мА

<sup>2</sup> Отрицательное напряжение между анодом и катодом

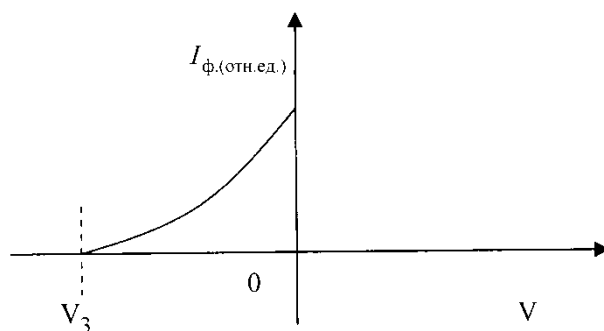


Рис. 3. Зависимость фототока от напряжения.  $\lambda = 522 \text{ нм}$ .

То же проделать и при токе через светодиод 20 мА. Аналогичные измерения (поочередно) проделать и для зеленого света (кнопка «З») и синего света (кнопка «С»). Значения тока в этих случаях установить равным  $\approx 3 \text{ мА}$ . При значениях  $V = V_3$  величины фототока  $I_{\phi, (отн. ед.)} \approx 0$  (показания вольтметра  $U \approx 0$ ). Наличие отрицательного фототока связано с темновыми токами.

По результатам измерений построить соответствующие графики (рис. 3, 4, 5).

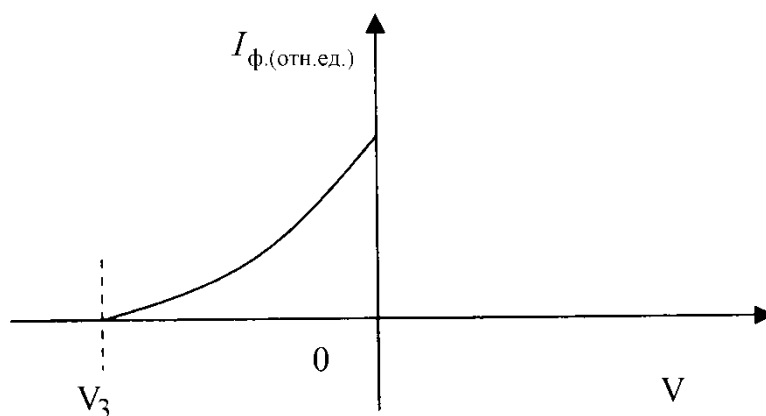


Рис. 5. Зависимость фототока от напряжения.  $\lambda = 469 \text{ нм}$ .

## Опыт 2. Определение (оценка) постоянной Планка

Максимальная кинетическая энергия  $E_{\max}$  фотоэлектронов связана с задерживающим потенциалом  $V_3$  следующим соотношением:

$$E_{\max, e} = eV.$$

Используя результаты измерений,, полученные в опыте 1, построить график зависимости  $E_{\max} = f(V)$  (рис. 6). При проведении экспериментальных измерений использовать метод наименьших квадратов.

Постоянную Планка определить из соотношения

$$h = \frac{dE_{\max}}{d\nu}.$$

Работу выхода электрона из материала фотокатода определить по частоте  $\nu_0$  (красная граница фотоэффекта)<sup>3</sup>.

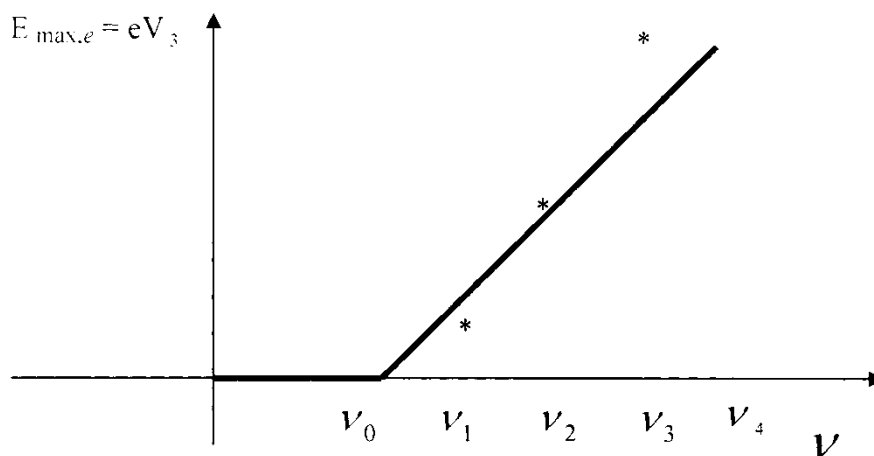


Рис. 6. Зависимость максимальной энергии фотоэлектрона от частоты фотонов.

$$A = h\nu_0, \quad \lambda = \frac{c}{\nu_0}.$$

### Контрольные вопросы

1. Корпускулярные свойства света.
2. Внешний фотоэффект. Основные закономерности.
3. Фотоэффект и законы сохранения энергии и импульса.
4. Объяснить работу экспериментальной установки.
5. Провести анализ погрешностей при измерении постоянной Планка.

### Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. М.:Астрель, 2008., т.3, гл.2.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. ч.1, М.:Физматлит, 2013, гл.1.

<sup>3</sup> Для уточнения значения постоянной Планка предлагается самостоятельно провести анализ полученных результатов с учетом темнового тока и распределения по энергиям фотоэлектронов. (Эта часть не обязательна.)

**УЧЕБНЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ФИЗИКЕ**  
**по курсу «Физика колебаний и волн.**  
**Квантовая физика»**

**Задание 1.**

**1. Электромагнитные волны**

1. Электрический дипольный момент, направленный вдоль оси  $x$ , изменяется во времени согласно выражению

$$P(t) = P_0 \cos \omega t \cdot e^{-\gamma t},$$

где  $P_0$  - постоянная,  $\omega$  - частота колебаний и  $\gamma$  - коэффициент затухания ( $\gamma \ll \omega$ ). Определить зависимость мощности излучения от времени, среднюю за период колебания мощность и нарисовать диаграмму направленности излучения диполя.

2. Импульс лазерного излучения в вакууме имеет длину волны  $\lambda = 1$  мкм, длительность  $\tau = 1$  мкс, площадь поперечного сечения  $\delta = 1$  мм<sup>2</sup> и энергию  $W = 1$  Дж. Рассматривая излучение как ограниченную плоскую монохроматическую волну, определить:

- а) плотность энергии,
- б) интенсивность,
- в) амплитуду электрического поля,
- г) амплитуду магнитного поля.

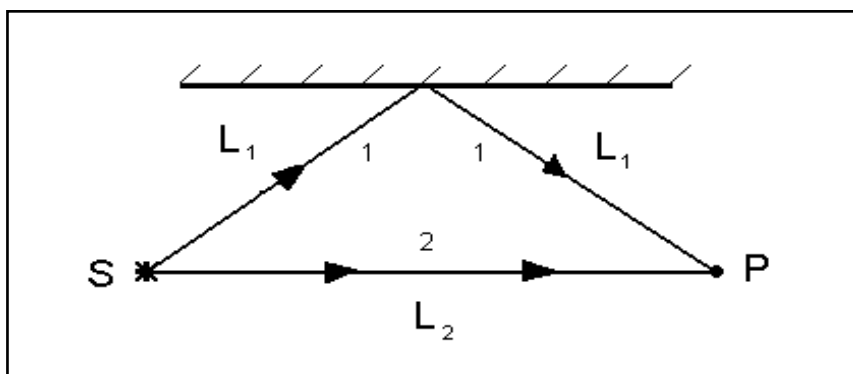
3. Определить интенсивность плоской монохроматической волны в вакууме, если амплитуда

- а) электрического поля  $A_e = 10$  В/м,
- б) магнитного поля  $A_m = 1$  А/м.

**2. Интерференция плоских волн**

4. Определить амплитуду и фазу результирующих колебаний в точке, где происходит наложение трех плоских монохроматических волн с одинаковыми частотами и поляризациями, если амплитуды всех волн равны  $A$ , а их фазы в данной точке  $\Phi_1$ ,  $\Phi_1 + \pi/2$  и  $\Phi_1 + 3\pi/2$ .

5. При какой разности хода лучей 1 и 2 в точке наблюдения  $P$  будет: а) максимум интенсивности, б) минимум интенсивности? Длина волны излучения  $\lambda$  и поляризации лучей в точке  $P$  одинаковые. Означает ли уменьшение интенсивности в точке  $P$ , что энергия излучения превращается в другую форму энергии?



6. На плоский экран падают две плоские монохроматические волны, имеющие одинаковую частоту  $\nu$  и поляризацию. Волновые векторы этих волн  $\vec{K}_1$  и  $\vec{K}_2$  ориентированы симметрично относительно нормали к экрану и образуют с нормалью угол  $\alpha$ . Найти ширину интерференционных полос, наблюдаемых на экране.

### 3. Интерференция сферических волн

7. Построить диаграмму направленности излучения системы из двух источников сферических монохроматических волн одинаковой мощности и частоты, если расстояние между источниками  $d = \frac{\lambda}{2}$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения.

8. Как изменится диаграмма направленности излучения системы, описанной в задаче 8, если источники сдвинуты по фазе на  $\Delta\Phi_0 = \pi$ ?

### 4. Дифракция плоской волны в приближении Фраунгофера

9. Плоская монохроматическая волна с длиной волны  $\lambda$  нормально падает на непрозрачный экран с двумя параллельными щелями шириной  $b$ , находящимися на расстоянии  $d$  друг от друга. При каком условии дифракционный минимум первого порядка для отдельной щели совпадает с интерференционным максимумом порядка  $m$ ?

10. Как изменится интерференционная картина, наблюдаемая при нормальном освещении монохроматическим светом двух длинных параллельных щелей в непрозрачном экране, если

- расстояние  $d$  между щелями увеличить в 2 раза,
- ширину  $b$  каждой щели уменьшить в два раза?

### 5. Дифракционная решетка

11. На дифракционную решетку с периодом  $d=3$  мкм нормально падает монохроматическая волна с длиной волны  $\lambda=5890\text{Å}$ . Оценить возможный наибольший порядок, получаемый с помощью данной дифракционной решетки,

используя а) закономерности интерференции и б) закономерности дифракции, если ширина щели  $b=1,5$  мкм.

12. Желтая линия спектра излучения натрия представляет собой две спектральные линии с длинами волн  $\lambda_1=589,9$  нм и  $\lambda_2=589,66$  нм. Можно ли разрешить эти две линии с помощью дифракционной решетки шириной 5 см, имеющей 100 штрихов на 1 мм?

13. Могут ли перекрываться спектры первого и второго порядков при нормальном освещении дифракционной решетки видимым светом с длинами волн в диапазоне  $4000 \div 7000$  А?

## Задание 2.

### 6. Внешний фотоэффект и эффект Комптона

14. Работа выхода электрона для никеля  $A_{\text{вых}} = 4,84$  эВ. Определить длину волны, соответствующую красной границе фотоэффекта.

15. Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вылетающих из медного электрода, освещаемого излучением с длиной волны  $\lambda = 250$  нм. Работа выхода электрона для меди  $A_{\text{вых}} = 4,17$  эВ.

16. Определить импульс фотона с энергией  $E_{\text{ф}} = 3,2 \cdot 10^{-19}$  Дж, если скорость света  $C = 3 \cdot 10^8$  м/с.

17. Фотон с длиной волны  $\lambda = 0,07$  нм рассеивается на свободном покоящемся электроде под углом  $\theta = \pi/2$ . Определить долю энергии, потерянной фотоном, и скорость электрона, полученную в результате рассеяния фотона.

### 7. Энергетический спектр атома водорода

18. Определить минимальную частоту излучения, необходимую для ионизации атома водорода в первом возбужденном состоянии.

19. Определить длину волны фотона, излучаемого атомом водорода при переходе с первого возбужденного уровня в основное состояние

а) без учета отдачи атома,

б) с учетом отдачи атома.

### 8. Соотношение неопределенностей

20. Найти волновые функции стационарных состояний свободной частицы массой  $m$ .

21. Определить длину волны де Бройля для стационарного состояния свободной частицы массой  $m$  с энергией  $E$ .

22. Используя соотношение неопределенностей, оценить энергию основного состояния электрона в бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $d=10^{-8}$  см. Сравнить полученное значение с энергией основного состояния атома водорода.

23. Используя соотношение неопределенностей, оценить кинетическую энергию нуклона в ядре радиусом  $r=10^{-13}$  см.

24. Пучок электронов, летящих со скоростью  $V=103$  м/с вдоль оси  $z$ , проходит через щель шириной  $b=0,1$  мм в экране, расположенном перпендикулярно оси  $z$ . Определить ширину  $\Delta x$  центрального дифракционного максимума, наблюдаемого на расстоянии  $L=1$  м от экрана. Щель расположена параллельно оси  $y$ .

### Дополнительные задачи

1. Определить, при каких постоянных  $A$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  функция  $\phi(x, t) = A \cos(\alpha \cdot x + \beta \cdot t)$  есть решение волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0.$$

2. Определить, при каких постоянных  $A$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  функция  $\phi(x, t) = A e^{i(\alpha \cdot x + \beta \cdot t)}$ , где  $i = \sqrt{-1}$  - мнимая единица, есть решение волнового уравнения, приведенного в задаче №1.

3. Найти фазовую скорость и волновой вектор плоской монохроматической волны  $\phi(x, t) = A e^{i(kx - \omega t + \Phi_0)}$ , где  $A$ ,  $k$ ,  $\omega$  и  $\Phi_0$  - постоянные, длина волны  $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$  м и период колебаний  $T = 10^{-15}$  с.

4. Определить амплитуду колебаний молекул воздуха для звука интенсивности  $I=10$  Вт/м<sup>2</sup> (порог болевых ощущений человека), если плотность воздуха  $\rho=1,3$  кг/м<sup>3</sup>, частота звука  $\nu=103$  Гц и скорость звука в воздухе  $V=330$  м/с.

5. Определить амплитуду колебаний молекул воздуха для звука интенсивности  $I=10-12$  Вт/м<sup>2</sup> (порог слышимости человека) и сравнить полученную амплитуду с характерным размером молекул воздуха, используя параметры задачи №4.

6. При какой интенсивности звуковая волна создает в воде амплитуду давления  $P=100$  Па, если скорость звука в воде  $V=1500$  м/с и плотность воды  $\rho=1$  г/см<sup>3</sup>?

7. Какую максимальную долю энергии звуковой волны можно передать через границу раздела воздух-вода, если удельный акустический импеданс для воды  $Z_{\text{вод}} = 1,4 \cdot 10^6$  Па · с/м, а для воздуха  $Z_{\text{воз}} = 430$  Па · с/м?

8. Оценить давление лазерного пучка мощностью  $P=10^3$  Вт на металлическую поверхность при его полном отражении в случае нормального падения, если площадь поперечного сечения пучка  $\delta=1$  мм<sup>2</sup> и скорость света в вакууме  $C = 3 \cdot 10^8$  м/с.

9. Две плоские монохроматические волны  $\phi_1(x, t) = a \cos(kx - \omega t)$  и  $\phi_2(x, t) = a \cos(kx + \omega t)$  распространяются навстречу друг другу. Определить максимальную и минимальную амплитуды колебаний, а также расстояние между соседними максимумами.

10. В каком случае кольца Ньютона видны более отчетливо: в отраженном или проходящем свете?

11. Определить число лепестков в диаграмме направленности излучающей системы из двух источников сферических монохроматических волн одинаковой мощности, если длины волн излучений одинаковы и равны  $\lambda$ , расстояние между источниками  $d = \lambda$  и источники сдвинуты по фазе на  $\Phi_0 = \pi/2$ .

12. Оценить максимальную разность хода, при которой возможно наблюдение интерференции квазимонохроматического света со средней длиной волны  $\lambda_{cp}$  и спектральной шириной  $\Delta\lambda \ll \lambda_{cp}$ .

13. При каких условиях интенсивность двух электромагнитных волн при их перекрывании в пространстве равна сумме интенсивностей этих волн?

14. Плоская монохроматическая волна с длиной волны  $\lambda$  падает под углом  $\theta$  на плоский непрозрачный экран с двумя параллельными щелями. Определить углы наблюдения, для которых в дальней зоне дифракции будут максимумы интенсивности, если расстояние между щелями равно  $d$ .

15. Прозрачный диск из стекла с показателем преломления  $n$  закрывает для точки наблюдения Р первую зону Френеля. Определить минимальную толщину  $h_{min}$  диска, при которой интенсивность света в точке наблюдения Р достигает максимума. Показатель преломления воздуха  $n_g = 1$ , длина волны света в воздухе  $\lambda$ .

16. Непрозрачный экран в форме полудиска закрывает половину первой зоны Френеля. Определить интенсивность света в точке наблюдения Р, если в отсутствие экрана интенсивность света в этой точке  $I_0$ .

17. Как согласовать с законом сохранения энергии тот факт, что увеличение отверстия в экране может привести к уменьшению интенсивности прошедшего света в точке наблюдения? Ведь при увеличении отверстия мощность светового потока, проходящего через отверстие, возрастает.

18. Определить, при каких параметрах дифракционной решетки интенсивность света для  $m$ -го главного максимума равна нулю.

19. Как изменится распределение интенсивности света, прошедшего через дифракционную решетку, если число щелей решетки увеличить в два раза? Свет падает нормально к плоскости решетки.

20. Оценить максимальное число наблюдаемых интерференционных полос при освещении плоского экрана с двумя одинаковыми параллельными щелями нормально падающим квазимонохроматическим светом.



21. До какого потенциала  $\phi$  можно зарядить алюминиевый шарик ( $\phi(\infty) = 0$ ), если его облучать излучением с длиной волны  $\lambda = 200$  нм? Работа выхода электрона для алюминия  $A_{\text{вых}} = 3,7$  эВ.

22. Определить максимальное изменение длины волны при рассеивании фотона на покоящемся свободном электроне. Оценить минимальную разрешающую способность спектрального прибора, необходимую для наблюдения эффекта Комптона при использовании излучения с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм.

23. Разреженные пары ртути бомбардируются пучком электронов с энергией  $\varepsilon_0 = 4,88$  эВ. Определить минимальную длину волны излучения паров ртути, если считать, что при столкновениях вся кинетическая энергия электронов передается атомам ртути.

24. Определить энергии стационарных состояний частицы массы  $m$  в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме шириной  $L$ . Чему равно среднее значение импульса частицы в стационарном состоянии? Оценить силу давления, которую оказывает частица на стенки ямы в основном состоянии.