

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Факультет фундаментальной подготовки

Кафедра физики

КОЛЕБАНИЯ. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Лабораторный практикум К-303.4

по дисциплине «Физика» для студентов направления
20.03.01 «Техносферная безопасность»,
профиль «Безопасность технологических процессов и производств»,
всех форм обучения

Составители В. В. Дырдин
Т. В. Лавряшина
И. В. Цвеклинская

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 5 от 20.12.2016
Рекомендованы к изданию
учебно-методической комиссией
направления 20.03.01
Протокол № 9 от 17.02.2017
Электронная версия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Методические рекомендации студентам	2
Лабораторная работа № 1. Определение момента инерции диска с вырезом	3
Лабораторная работа № 2. Определение параметров гармонических колебаний физического маятника	9
Лабораторная работа № 3. Определение показателя преломления стекла по интерференционной картине полос равного наклона	14
Лабораторная работа № 4. Определение спектральных характеристик дифракционной решетки	19
Лабораторная работа № 5. Проверка закона Малюса	24
Лабораторная работа № 6. Определение степени поляризации света при отражении	26
Вопросы для самоподготовки	31
Список рекомендуемой литературы	33

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ СТУДЕНТАМ

В лабораторный практикум К-303.4 включены лабораторные работы по разделу физики «Колебания. Волновая оптика», предусмотренные Государственным образовательным стандартом и рабочей программой дисциплины «Физика» для студентов технических специальностей и направлений.

При выполнении лабораторного практикума студент не только получает элементарные навыки проведения эксперимента, но и учится самостоятельно анализировать физические явления, сопоставлять выводы теории и экспериментальные результаты, выделять главное, понимать роль идеализации, рассчитывать погрешности измерений.

Рекомендации студентам по организации самостоятельной работы в учебных лабораториях включают следующие положения:

1. На каждое занятие согласно графику выполнения лабораторных работ студент приходит подготовленным. На самостоятельную работу студентам по учебному плану отводится 50 % от объема часов, отводимых для изучения дисциплины, в том числе на подготовку к выполнению каждой лабораторной работы около 4 часов.

2. Подготовка включает изучение содержания лабораторной работы, проработку теоретического материала по учебным пособиям, заготовку краткого конспекта отчета предстоящей работы. Конспект отчета содержит название и цель работы, рисунок установки, поясняющий идею метода, рабочие формулы и таблицы для занесения в них измеряемых и вычисляемых величин. Конспект отчета может быть выполнен как в рукописном, так и в электронном варианте.

3. Для выполнения работы необходимо получить допуск, объяснив суть используемого метода, устройство установки, порядок измерений, алгоритм вычислений искомых величин и их погрешностей, а также ожидаемый характер исследуемых зависимостей.

4. Результаты эксперимента и отчет, содержащий вывод о проделанной работе, подписываются преподавателем.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ДИСКА С ВЫРЕЗОМ

1. Цель работы

Освоить экспериментальный метод определения момента инерции диска с вырезом относительно оси колебаний, не проходящей через центр масс диска.

2. Подготовка к работе

Ознакомиться с описанием лабораторной работы, прочитать в учебных пособиях [1] §§ 140–142; [2] 27.1–27.2; [3] §§ 63–65; ответить на вопросы самоподготовки 1–12.

В результате студент должен знать: а) дифференциальное уравнение свободных колебаний физического маятника и его решение; б) понятие момента инерции и теорему Штейнера; в) методику расчета положения центра масс тела; д) порядок работы с измерительными приборами и расчет погрешностей прямых и косвенных измерений.

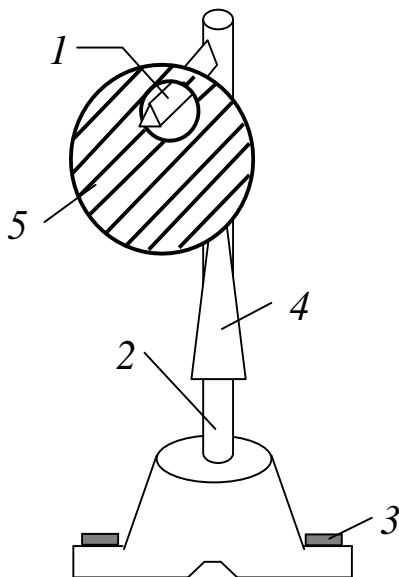


Рис. 1.1. Схема установки:
1 – призма; 2 – стойка на треноге; 3 – винты;
4 – планка; 5 – диск с вырезом

3. Выполнение работы

3.1. Описание установки

Установка (рис. 1.1) для определения момента инерции методом колебаний состоит из призмы 1, прикрепленной к вертикальной стойке 2, помещенной в треногу, две ножки которой снабжены винтами 3. Это позволяет регулировать установку так, чтобы опорное ребро призмы приняло горизонтальное положение. К стойке прикреплена планка 4 клиновидной формы с углом при вершине 4° . Планка служит визиром, позволяющим следить за тем, чтобы размах колебаний не превышал 5° .

На призму I устанавливается диск 5 с вырезом, колебания которого исследуются в данной работе.

3.2. Методика измерений и расчетов

Момент инерции твердого тела, масса которого непрерывно распределена по объему, определяется соотношением

$$J = \int_m r^2 dm = \int_V r^2 \rho dV ,$$

где r – функция положения точки с координатами x, y, z ; ρ – плотность вещества.

Если ось вращения не проходит через центр масс тела, то его момент инерции определяется по теореме Штейнера:

$$J = J_C + m \ell^2 , \quad (1.1)$$

где J_C – момент инерции тела относительно оси, проходящей через его центр масс параллельно оси вращения; ℓ – кратчайшее расстояние от оси вращения до оси, проходящей через центр масс тела.

Момент инерции диска с вырезом может быть определен экспериментально и теоретически. При экспериментальном определении момента инерции тела рассматриваются его свободные гармонические колебания. В данной работе тело – однородный диск радиусом R с отверстием радиусом r (рис. 1.2). Если диск с вырезом отклонить от положения равновесия на малый (около 5°) угол φ , то он может совершать гармонические колебания под действием силы тяжести относительно неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку D . Точка D пересечения оси колебаний маятника с вертикальной осью Y называется точкой подвеса. Если ось колебаний не проходит через центр масс (точка C), то тело называется физическим маятником.

Вращающий момент, возникающий под действием силы тяжести при отклонении маятника на угол φ :

$$M = -mg \ell \sin \varphi = -mg \ell \varphi ,$$

поскольку при малых углах отклонения ($\sim 5^\circ$) $\sin \varphi \approx \varphi$. Отклонения маятника против часовой стрелки считаются положительными, а по часовой стрелке – отрицательными.

Под действием изменяющегося вращающего момента диск совершает свободные гармонические колебания, дифференциальное уравнение которых записывается в виде:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{mg \ell}{J} \varphi = 0,$$

где m – масса маятника; ℓ – расстояние от оси вращения диска до оси, проходящей через его центр масс; J – момент инерции диска относительно оси колебаний.

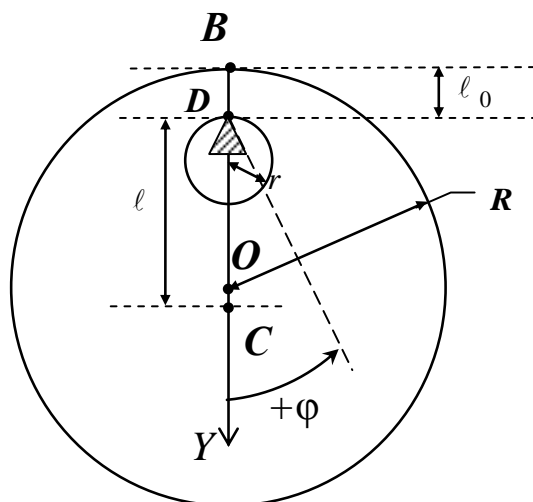


Рис. 1.2. Диск с вырезом

Обозначив $\frac{mg \ell}{J} = \omega_0^2$, получим однородное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \omega_0^2 \varphi = 0,$$

его решением будет уравнение вида

$$\varphi = \varphi_0 \cos(\omega_0 t + \alpha_0),$$

где ω_0 – циклическая частота собственных (свободных) колебаний физического маятника

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mg \ell}{J}}.$$

Период колебаний T физического маятника определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mg \ell}}. \quad (1.2)$$

Из формулы (1.2) выразим момент инерции $J_{\text{э}}$ данного физического маятника

$$J_{\text{Э}} = \frac{(m - m_0) g \ell T^2}{4\pi^2}, \quad (1.3)$$

где $(m - m_0)$ – масса диска с вырезом; T – период его колебаний, определяемый экспериментально; ℓ – расстояние между осью колебаний и параллельной ей осью, проходящей через центр масс.

Положение центра масс диска с вырезом определим из условия равенства моментов сил относительно оси, проходящей через точку O – центр масс диска без выреза (рис. 1.3). Представим, что диск радиусом R сплошной, а в точке A приложена обратная (по отношению к силе тяжести $m\vec{g}$) сила $\vec{F}_0 = m_0\vec{g}$ (m_0 – масса вырезанной части диска):

$$m g x = m_0 g [x + (R - \ell_0 - r)]. \quad (1.4)$$

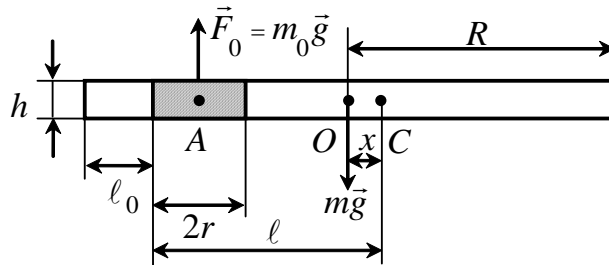


Рис. 1.3. Схема к расчету положения центра масс диска с вырезом

Массу m сплошного диска и массу m_0 вырезанной части рассчитаем по известным формулам:

$$m = \rho \pi R^2 h \quad \text{и} \quad m_0 = \rho \pi r^2 h, \quad (1.5)$$

где ρ – плотность материала диска; r – радиус вырезанной части; h – толщина диска.

Выразим x из уравнений (1.4) и (1.5)

$$x = \frac{r^2 (R - \ell_0) - r^3}{R^2 - r^2}$$

и получим соотношение для расчета расстояния ℓ между осью колебаний и осью, проходящей через центр масс физического маятника:

3.3.2. По формуле (1.6) рассчитайте расстояние ℓ от оси колебаний до центра масс диска.

3.3.3. Рассчитайте массу m сплошного диска и массу m_0 вырезанной части по соотношениям (1.5), приняв $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

3.3.4. Измерьте секундомером время 10 полных колебаний. Результаты измерений времени занесите в табл. 1.2. По формуле $T = \frac{t}{n}$ (где n – число полных колебаний) рассчитайте период колебаний T маятника.

3.3.5. Опыт повторите 5 раз и найдите среднее значение периода колебаний $\langle T \rangle$.

Таблица 1.2

Расчет момента инерции диска с вырезом

$$n = 10$$

№ п/п	t	T	$\langle T \rangle$	$J_{\text{э}}$	J_T	ε_J
	с	с	с	кг·м ²	кг·м ²	%
1						
2						
3						
4						
5						

3.3.6. По полученным значениям ℓ и $\langle T \rangle$ вычислите экспериментальное значение момента инерции $J_{\text{э}}$ диска, используя формулу (1.3).

3.3.7. По формуле (1.10) рассчитайте теоретическое значение момента инерции J_T диска с вырезом и сравните его с моментом инерции $J_{\text{э}}$ диска, определенного экспериментально.

3.3.8. Определите отклонение ε_J результатов экспериментального и теоретического значений момента инерции физического маятника

$$\varepsilon_J = \frac{|J_T - J_{\text{э}}|}{J_T} \cdot 100 \text{ \%}.$$

4. Сделайте вывод.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

1. Цель работы

Освоить метод определения периода колебаний и момента инерции физического маятника.

2. Подготовка к работе

Ознакомиться с описанием лабораторной работы, прочитать в учебных пособиях [1] §§ 140–142; [2] 27.1–27.2; [3] §§ 63–65; ответить на вопросы самоподготовки 1–12.

В результате студент должен знать: а) дифференциальное уравнение свободных колебаний физического маятника и его решение; б) понятие момента инерции и теорему Штейнера; в) методику расчета положения центра масс тела; д) порядок работы с измерительными приборами и расчет погрешностей прямых и косвенных измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

На рис. 2.1 представлена схема используемого в работе физического маятника. Он состоит из цилиндра массой m_1 и радиусом R , стержня длиной L и массой m_2 , двух грузов в виде тонких дисков массой m_3 каждый, которые закрепляются на стержне в нужном положении. Ось колебаний маятника проходит через точку O перпендикулярно чертежу. Грузы m_3 располагают на стержне симметрично относительно центра масс C стержня на расстоянии a от него.

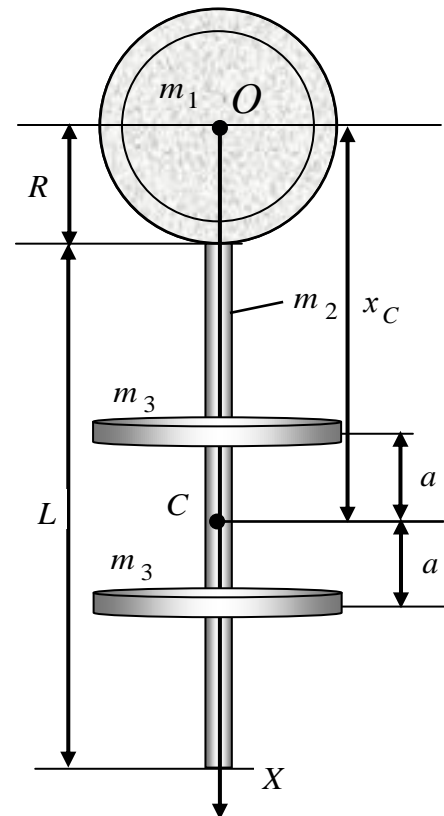


Рис. 2.1. Схема установки

3.2. Методика измерений и расчета

Момент инерции твердого тела, масса которого непрерывно распределена по объему, определяется соотношением

$$J = \int_m r^2 dm = \int_V r^2 \rho dV ,$$

где r – функция положения точки с координатами x, y, z ; ρ – плотность вещества.

Если ось вращения не проходит через центр масс тела, то его момент инерции определяется по теореме Штейнера:

$$J = J_C + m \ell^2 , \quad (2.1)$$

где J_C – момент инерции тела относительно оси, проходящей через его центр масс параллельно данной; ℓ – кратчайшее расстояние от произвольной оси до оси, проходящей через центр масс тела.

В данной работе тело представляет собой физический маятник, совершающий при малых углах отклонения гармонические колебания под действием силы тяжести относительно оси, проходящей через точку O . Ось колебаний не проходит через центр масс C .

Вращающий момент, возникающий под действием силы тяжести при отклонении маятника на угол φ :

$$M = -mg \ell \sin \varphi = -mg \ell \varphi ,$$

поскольку при малых углах отклонения ($\sim 5^\circ$) $\sin \varphi \approx \varphi$. Отклонения маятника против часовой стрелки считаются положительными, а по часовой стрелке – отрицательными.

Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела в проекции на ось вращения запишется в виде:

$$M = J \varepsilon = J \frac{d\omega}{dt} ,$$

где M – момент силы; J – момент инерции твердого тела относительно неподвижной оси; ε – угловое ускорение; ω – угловая скорость.

Под действием вращающего момента диск совершает свободные колебания, дифференциальное уравнение которых можно записать в виде:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{mg \ell}{J} \varphi = 0 ,$$

где m – масса маятника; ℓ – расстояние от оси вращения маятника до оси, проходящей через его центр масс; J – момент инерции относительно выбранной оси.

Обозначим $\frac{mg \ell}{J} = \omega_0^2$, тогда решением полученного однородного дифференциального уравнения второго порядка

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \omega_0^2 \varphi = 0$$

будет уравнение вида

$$\varphi = \varphi_0 \cos(\omega_0 t + \alpha_0),$$

где ω_0 – циклическая частота собственных незатухающих колебаний физического маятника

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mg \ell}{J}}.$$

Период колебаний T физического маятника массой m определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mg \ell}}, \quad (2.2)$$

в которую входит экспериментальное значение момента инерции данного физического маятника.

Для определения расстояния ℓ между осями найдем координату x_C центра масс физического маятника:

$$x_C = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i}, \quad (2.3)$$

где x_i – координата центра масс i -го тела массой m_i . Ось колебаний физического маятника проходит через точку O (рис. 2.1), и координаты отдельных частей маятника будут определяться следующими соотношениями.

Координата центра масс цилиндра $x_1 = 0$; координата центра масс стержня $x_2 = \frac{L}{2} + R$; координаты дополнительных грузов массой m_3 , расположенных симметрично относительно центра масс стержня на расстоянии $\pm a$ от его середины $x_3 = (L/2) + R - a$ и $x_4 = (L/2) + R + a$.

Подставляя координаты тел массами m_1, m_2, m_3 в формулу (2.3), получим координату x_C центра масс физического маятника

$$x_C = \frac{(m_2 + 2m_3)\left(\frac{L}{2} + R\right)}{m}, \quad (2.4)$$

где $m = m_1 + m_2 + 2m_3$ – масса физического маятника.

Так как неподвижная ось, относительно которой происходят колебания маятника, совпадает с координатой $x = 0$, то расстояние ℓ между осями равно координате x_C . Следовательно, решая систему уравнений (2.2) и (2.4), получаем формулу для экспериментального определения момента инерции физического маятника:

$$J_{\text{Э}} = \frac{gT^2}{4\pi^2} (m_2 + 2m_3)\left(\frac{L}{2} + R\right) = K T^2, \quad (2.5)$$

где K – постоянная для данного физического маятника, определяемая соотношением

$$K = \frac{g(m_2 + 2m_3)\left(\frac{L}{2} + R\right)}{4\pi^2}. \quad (2.6)$$

Момент инерции данного физического маятника можно изменять, варьируя симметричное положение дисков массой m_3 относительно середины стержня.

Момент инерции механической системы – величина аддитивная, следовательно, момент инерции физического маятника относительно оси, проходящей через точку O , равен сумме моментов инерции всех составляющих его тел

$$J_T = J_1 + J_2 + J_3 + J_4, \quad (2.7)$$

где $I_1 = \frac{1}{2}m_1R^2$ – момент инерции цилиндра массой m_1 ;

$$I_2 = \frac{1}{12}m_2L^2 + m_2\left(\frac{L}{2} + R\right)^2 \text{ – момент инерции стержня массой } m_2,$$

определенный по теореме Штейнера;

$$I_3 = \frac{m_3r^2}{4} + m_3\left(\frac{L}{2} + R - a\right)^2 \text{ и } I_4 = \frac{m_3r^2}{4} + m_3\left(\frac{L}{2} + R + a\right)^2 \text{ – моменты}$$

инерции дисков радиусом r и массой m_3 , рассчитанные по теореме Штейнера.

3.3. Определение момента инерции физического маятника

3.3.1. Заполните табл. 2.1 (характеристики физического маятника приведены на установке) и рассчитайте по формуле (2.6) постоянную K физического маятника.

Таблица 2.1

Характеристики установки

m_1	m_2	m_3	L	R	r	K
кг	кг	кг	м	м	м	кг·м ² ·с ⁻²

3.3.2. Поместите оба груза m_3 на расстоянии a от середины стержня. Отклоните маятник на угол $5 - 6^\circ$ и определите время $n = 5$ полных колебаний маятника. Данные занесите в табл. 2.2. Повторите опыт 5 раз, рассчитайте $\langle t \rangle$ и среднее значение периода колебаний при заданном положении грузов массой m_3 :

$$\langle T \rangle = \frac{\langle t \rangle}{n}.$$

Таблица 2.2

Определение периода колебаний физического маятника и расчет экспериментального значения его момента инерции

$$n = 5$$

№ п/п	a	t					$\langle t \rangle$	$\langle T \rangle$	$J_{\text{э}}$
	м	с					с	с	кг·м ²
1	0,05								
2	0,10								
3	0,15								
4	0,20								
5	0,25								

По формуле (2.5), используя среднее значение периода колебаний $\langle T \rangle$, рассчитайте экспериментальное значение $J_{\text{э}}$ момента инерции физического маятника при различных положениях грузов массой m_3 .

3.3.6. По соотношениям (2.7) рассчитайте теоретические значения моментов инерции частей физического маятника J_1, J_2, J_3, J_4 и их сумму J_T – теоретическое значение момента инерции физического маятника. Результаты расчетов запишите в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Расчет теоретического значения момента инерции физического маятника

Значение параметра a	Момент инерции цилиндра	Момент инерции стержня	Момент инерции верхнего диска	Момент инерции нижнего диска	Момент инерции физического маятника
	J_1	J_2	J_3	J_4	J_T
	кг · м ²	кг · м ²	кг · м ²	кг · м ²	кг · м ²
0,05					
0,10					
0,15					
0,20					
0,25					

3.3.7. Постройте график зависимости $J_{\text{э}} = f(J_T)$ экспериментального и теоретического значений момента инерции физического маятника.

4. Сделайте вывод.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЕ ПОЛОС РАВНОГО НАКЛОНА

1. Цель работы

Освоить метод определения показателя преломления плоско-параллельной стеклянной пластины.

2. Подготовка к работе

Ознакомиться с описанием лабораторной работы, прочитать в учебных пособиях [1] §§ 171–175; [2] 31.1–31.3, 31.5; [3] §§ 85–87, 89; ответить на вопросы самоподготовки 13–20.

В результате студент должен знать: а) понятие когерентности волн и методы их получения; б) понятия геометрической и оптической разности хода интерферирующих волн; в) условия возникновения максимумов и минимумов в интерференционной картине; г) ход лучей в стеклянной пластинке при образовании интерференционных картин: полосы равной толщины и полосы равного наклона; д) вывод рабочей формулы; е) порядок измерений и расчета; ж) методику расчета погрешностей эксперимента.

3. Описание экспериментальной установки и методика расчета показателя преломления

В качестве источника света используется гелий-неоновый лазер типа ЛГН-208А, длина волны излучения – 632,8 нм, мощность – 10 мВт. Свет, излучаемый лазером, обладает высокой когерентностью. Световой пучок лазера 1 (рис. 3.1) падает на короткофокусную линзу 2 с фокусом S и, становясь расходящимся, освещает плоскопараллельную стеклянную пластину 3, находящуюся на подставке оптической скамьи. Отражаясь от передней (точки O, A, C) и задней (точка B) поверхности стеклянной пластины, световые волны становятся когерентными и интерферируют между собой. На экране Э, поставленном перед пластиной, наблюдается интерференционная картина (ИК) в виде чередующихся светлых и темных колец, называемых полосами равного наклона.

Результат суперпозиции когерентных волн определяет оптическая разность хода лучей $SABC S'$ и $SO S'$ (рис. 3.2):

$$\Delta = 2(AB)n - 2(MO) \pm \lambda / 2, \quad (3.1)$$

где n – относительный показатель преломления; $\lambda / 2$ – изменение разности хода при отражении луча SO от оптически более плотной среды (стекла).

Если d – толщина пластины, α и β – углы падения и преломления, то $(AB) = d / \cos \beta$, $(AO) = d \operatorname{tg} \beta$, $(MO) = (AO) \sin \alpha$. Используя закон преломления $\sin \alpha = n \sin \beta$, выражение (3.1) можно переписать в виде

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \lambda / 2. \quad (3.2)$$

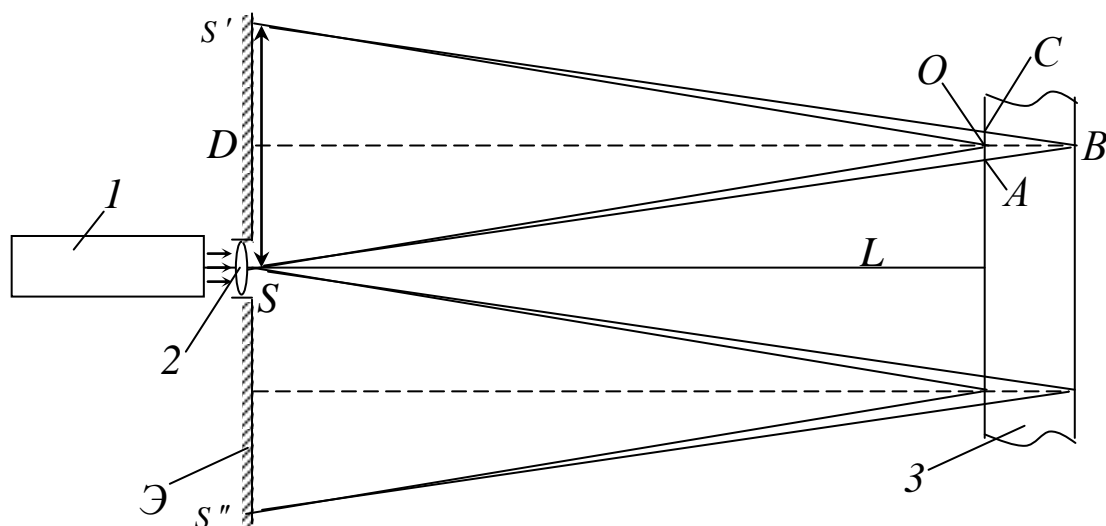


Рис. 3.1. Схема получения интерференционной картины:
1 – лазер; 2 – линза; 3 – стеклянная пластина; 4 – экран

Темные кольца наблюдаются, если разность хода Δ равна

$$\Delta = (2m \pm 1)\lambda / 2, \quad (3.3)$$

где $m = 1, 2, 3 \dots$ – порядок интерференционного минимума.

Сравнивая (3.2) и (3.3), получим условие наблюдения темных колец

$$2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = m \lambda. \quad (3.4)$$

Из рис. 3.1 и 3.2 видно, что кольцу большего радиуса соответствует и большее значение угла

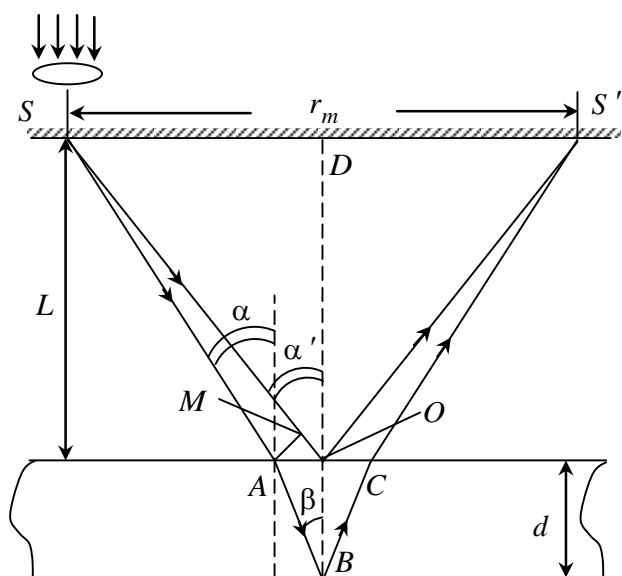


Рис. 3.2. К выводу соотношения, связывающего показатель преломления пластины с величиной радиуса темного кольца

падения α . С увеличением угла падения α , согласно (3.4), уменьшается интерференционный порядок m кольца. Следовательно, самый большой интерференционный порядок m_0 имеет кольцо, находящееся в центре ИК. При угле падения $\alpha = 0$

$$2 d n = m_0 \lambda,$$

и в центре ИК находится темное кольцо с самым большим номером

$$m_0 = \frac{2 d n}{\lambda}. \quad (3.5)$$

Кроме него в центральном темном пятне скрыты темные кольца с номерами от m_0 до k , а первое наблюдаемое имеет номер $m_1 = k - 1$, второе — $m_2 = k - 2$, ..., N -е — $m_N = k - N$.

Радиус r_m темного кольца выразим из $\triangle SOD$, учитывая, что для центральной части ИК угол падения α мал и можно принять $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$ и $\alpha' \approx \alpha$:

$$\sin \alpha \approx \frac{r_m / 2}{OD} \approx r_m / 2L,$$

где L — расстояние от источника S до пластины, причем $L^2 \gg \left(\frac{r_m}{2}\right)^2$.

Используя формулу приближенных вычислений при $x \ll 1$

$$n \sqrt{1 - x} \approx n \left(1 - \frac{1}{2}x\right),$$

соотношение (3.4) можно записать в виде:

$$2 dn \left(1 - \frac{1}{2} \frac{r_m^2}{n^2 4L^2}\right) = m \lambda. \quad (3.6)$$

Откуда следует

$$r_m^2 = 8n^2 L^2 - \frac{4m n \lambda L^2}{d}. \quad (3.7)$$

Запишем условие (3.7) для минимума $(k - N)$ -го порядка

$$r_{k-N}^2 = 8n^2 L^2 - \frac{(k - N) 4n \lambda L^2}{d} \quad (3.8)$$

и для минимума k -го порядка

$$r_k^2 = 8n^2 L^2 - k 4n \lambda L^2 / d. \quad (3.9)$$

Вычитая уравнение (3.9) из (3.8), получим

$$r_{k-N}^2 - r_k^2 = N 4n \lambda L^2 / d.$$

Отсюда следует что, квадрат радиуса кольца *линейно* зависит от его номера N :

$$r_{k-N}^2 = r_k^2 + C N, \quad (3.10)$$

где

$$C = 4n \lambda L^2 / d. \quad (3.11)$$

Обозначим $r_{k-N} = r_N$ и запишем соотношение (3.10) в виде

$$r_N^2 = r_k^2 + C N . \quad (3.12)$$

Построив линейную зависимость $r_N^2 = f(N)$, можно найти значение C как тангенс угла наклона прямой к оси N :

$$C = \frac{\Delta r_N^2}{\Delta N} ,$$

и рассчитать среднее значение показателя преломления стеклянной пластины, используя соотношение (3.11):

$$\langle n \rangle = \frac{d}{4\lambda L^2} C . \quad (3.13)$$

4. Выполнение работы

4.1. Включите гелий-неоновый лазер в сеть 220В.

4.2. Укрепите на экране с помощью прищепок лист миллиметровой бумаги. Сделайте в нем отверстие, совпадающее с центром лазерного луча. Расположите пластину 3 так, чтобы луч, отражаясь от нее, попадал в центр отверстия на бумаге. Получите ИК в виде концентрических колец.

4.3. Перерисуйте на бумагу или сфотографируйте цифровой камерой ИК.

4.4. Пронумеруйте наблюдаемые темные кольца в порядке возрастания их радиусов: $N = 1, 2, 3 \dots$

4.5. Измерьте диаметры темных колец по горизонтали D_1 и по вертикали D_2 , определите среднее значение $\langle D \rangle$ диаметра измеряемого кольца

$$\langle D \rangle = \frac{D_1 + D_2}{2} .$$

4.6. Рассчитайте радиусы темных колец $\langle r_N \rangle = \frac{\langle D \rangle}{2}$, а затем их квадраты $\langle r_N \rangle^2$. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 3.1.

4.7. Постройте график зависимости r_N^2 от номера кольца N . Определите тангенс угла наклона линии графика, равный значению C .

4.8. По формуле (3.13) найдите среднее значение показателя преломления $\langle n \rangle$ стеклянной пластины.

Результаты измерений диаметров темных колец
и расчета интерференционной картины

N	D_1	D_2	$\langle D \rangle$	$\langle r_N \rangle$	$\langle r_N \rangle^2$	C	$\langle n \rangle$	m_0	k
	М	М	М	М	М ²	М ²			
1									
2									
3									
4									
5									
6									

4.9. Вычислите максимальный порядок m_0 интерференционного минимума, используя соотношение (3.5).

4.10. Вычислите порядок k интерференционного кольца, за которым все последующие кольца были пронумерованы, продолжив линию графика зависимости r_N^2 от номера кольца N до пересечения с вертикальной осью, найдите r_k^2 . Из соотношения (3.6) с учетом (3.5) и принимая m равным k , получим формулу для расчета номера кольца, начиная с которого все последующие кольца были пронумерованы:

$$k = m_0 \left(1 - \frac{r_k^2}{8n^2L^2} \right).$$

4.11. Рассчитайте погрешности прямых и косвенных измерений.

5. Сделайте вывод.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

1. Цель работы

Освоить метод определения основных спектральных характеристик дифракционной решетки.

2. Подготовка к работе

Ознакомиться с описанием лабораторной работы, прочитать в учебных пособиях [1] §§ 176–180, 183; [2] 32.1–32.4, 32.7; [3] §§ 90–95; ответить на вопросы самоподготовки 21–25.

Для выполнения работы студент должен знать: а) суть явления дифракции, виды дифракции; б) особенности дифракции в сходящихся и параллельных лучах; в) принцип Гюйгенса-Френеля; г) зоны Френеля, их радиус, построение и площадь; д) условие наблюдения максимумов и минимумов дифракции на щели и дифракционной решетке; е) спектральные характеристики дифракционных решеток; ж) расчет погрешностей.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Для определения характеристик дифракционной решетки (ДР) используется установка, представленная на рис. 4.1.

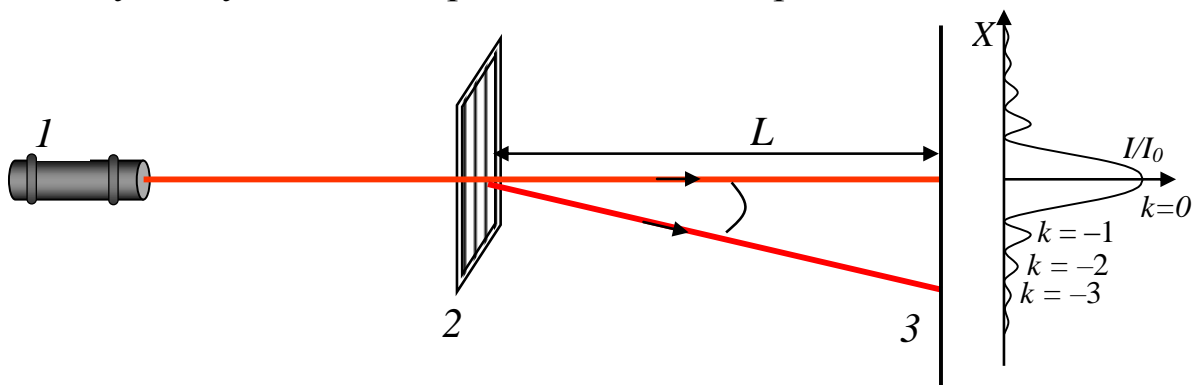


Рис. 4.1. Блок-схема лабораторной установки:

1 – гелий-неоновый лазер; 2 – дифракционная решетка; 3 – экран

В качестве источника света используется гелий-неоновый лазер типа ЛГН-208А, длина волны излучения – 632,8 нм, мощность – 10 мВт. Свет, излучаемый лазером, обладает высокой когерентностью, поэтому не требует дополнительных оптических устройств для наблюдения дифракции.

Свет от лазера 1 падает на дифракционную решетку 2. На экране 3 создается дифракционная картина. Координату k -го максимума (расстояние x между центральным максимумом и максимумом k -го порядка) измеряют по шкале экрана.

3.2. Методика измерений и расчета

Дифракционная решетка – оптический прибор, представляющий собой совокупность большого числа параллельных щелей (штрихов), разделенных непрозрачными промежутками. Основное

свойство дифракционной решетки – давать дифракционную картину, с помощью которой можно анализировать спектральный состав падающего на дифракционную решетку некогерентного света.

Условие возникновения главных максимумов дифракционной картины, полученной с помощью ДР имеет вид:

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4.1)$$

где $d = a + b$ – период или постоянная дифракционной решетки; a – ширина щели; b – ширина непрозрачного промежутка между щелями решетки.

В центре дифракционной картины наблюдается яркий максимум нулевого порядка ($\varphi = 0, k = 0$), вправо и влево от которого располагаются максимумы первого, второго и последующих порядков дифракции (рис. 4.1).

Соотношение (4.1) позволяет рассчитать период дифракционной решетки d :

$$d = \frac{k\lambda}{\sin \varphi}. \quad (4.2)$$

Угол дифракции определяется расстоянием от решетки до экрана L и расстоянием x между максимумами нулевого и m -го порядка:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{L}. \quad (4.3)$$

Одной из основных характеристик дифракционной решетки является ее дисперсия.

Угловой дисперсией D_φ решетки называется величина

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda}, \quad (4.4)$$

где $d\varphi$ – угловое расстояние между спектральными линиями, отличающимися по длине волны на $d\lambda$.

Линейной дисперсией D_ℓ называют величину

$$D_\ell = \frac{d\ell}{d\lambda},$$

где $d\ell$ – расстояние на экране между линиями, длины волн которых отличаются на $d\lambda$.

Дисперсия характеризует степень растянутости спектра вблизи данной длины волны. Формула для расчета угловой дисперсии имеет вид:

$$D_{\varphi} = \frac{k}{d \cos \varphi}. \quad (4.5)$$

У решетки с большим периодом ширина спектра одного и того же порядка меньше, чем у решетки с меньшим периодом. Дисперсия в пределах одного и того же порядка почти не меняется.

Разрешающей способностью R решетки принято называть способность решетки разделять линии, близкие по длине волны от λ до $\lambda + \Delta\lambda$. Чем больше разрешающая способность решетки, тем выше ее способность разделять близкие по длине волны линии. Разрешающая способность дифракционной решетки R определяется порядком спектра k и полным числом штрихов решетки N :

$$R = kN. \quad (4.6)$$

3.3. Измерение основных характеристик дифракционной решетки

3.3.1. Включите лазер. Генерация лазера типа ЛГН-208А наступает практически мгновенно. Дифракционная картина, состоящая из ряда ярких и четких изображений первого, второго и последующих порядков по обе стороны от центрального яркого максимума ($k = 0$), наблюдается на внешней стороне шкалы.

3.3.2. Измерьте расстояние L между дифракционной решеткой и шкалой.

3.3.3. Измерьте расстояние x_{ki} между максимумами интенсивности для первых четырех порядков по обе стороны от главного максимума $k = 1, 2, 3, 4$.

3.3.4. Рассчитайте координату соответствующего максимума

$$x_k = \frac{x_{+ki} + x_{-ki}}{2}.$$

3.3.5. Рассчитайте $\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_k}{L}$, определите φ и $\sin \varphi$ угла, под которым наблюдается максимум соответствующего порядка.

3.3.6. По формуле $d = \frac{k \lambda}{\sin \varphi}$ рассчитайте период дифракционной решетки и его среднее значение $\langle d \rangle$. Результаты запишите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

*Результаты измерений и расчета периода
дифракционной решетки*

$$L = \quad \text{м}; \quad \lambda = 6,328 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

k	x_{+ki}	x_{-ki}	x_k	$\text{tg } \varphi$	φ	$\sin \varphi$	d	$\langle d \rangle$	d_T	ε_d
	м	м	м		град		м	м	м	%
1										
2										
3										
4										

3.3.7. Рассчитайте период d_T дифракционной решетки по данным завода-изготовителя.

3.3.8. Определите отклонение ε_d результатов экспериментального и гарантированного заводом-изготовителем значений периода ДР

$$\varepsilon_d = \frac{|\langle d \rangle - d_T|}{d_T} \cdot 100 \% .$$

3.3.9. Измерьте длину ℓ ДР и рассчитайте число штрихов N_Δ этой решетки

$$N_\Delta = \frac{\ell}{\langle d \rangle} .$$

3.3.10. Результаты занесите в табл. 4.2.

Таблица 4.2

*Результаты расчета характеристик
дифракционной решетки*

k	φ	$\cos \varphi$	$\langle d \rangle$	ℓ	N_Δ	D_φ	R
	град		м	м		рад/м	
1							
2							
3							
4							

3.3.11. Рассчитайте угловую дисперсию D_φ решетки по соотношению (4.5), используя среднее значение $\langle d \rangle$ периода ДР и ее разрешающую способность R , рассчитанную по формуле (4.6).

3.3.12. Рассчитайте погрешность прямых и косвенных измерений.

4. Сделайте вывод.

Лабораторная работа № 5

ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

1. Цель работы

Экспериментальная проверка закона Малюса.

2. Подготовка к работе

Ознакомится с описанием лабораторной работы и изучить в учебных пособиях: [1] §§ 190–194; [2] 34.1, 34.2; [3] §§ 98–100; ответить на вопросы самоподготовки 26–29.

Для выполнения работы студент должен знать: а) отличие естественного света от поляризованного; б) способы и устройства получения поляризованного света; в) степень поляризации света; г) закон Малюса; д) понятие «фотосопротивление»; е) порядок измерения и методику расчета.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка (рис. 5.1) состоит из источника естественного света 1 – лампы накаливания, двух поляроидных пленок 2 и 3 (поляризатора и анализатора), фотосопротивления 4

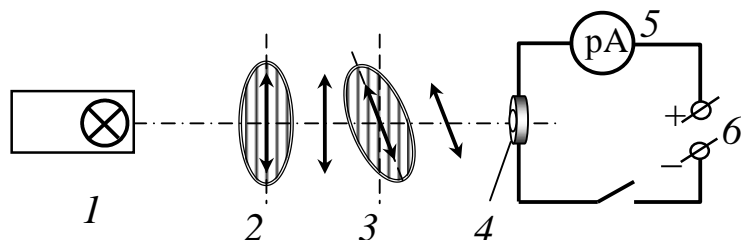


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки:

1 – лампа накаливания; 2 – поляризатор;

3 – анализатор; 4 – фотосопротивление;

5 – миллиамперметр; 6 – источник питания

(ФСД-1), включенного в цепь источника постоянного напряжения. Ток в цепи фотосопротивления измеряется миллиамперметром 5. Анализатор можно вращать вокруг оптической оси, изменяя угол φ между плоскостью поляризации падающего луча и плоскостью пропускания анализатора \mathcal{Z} от 0° до 360° .

Световой поток интенсивностью I , вышедший из анализатора, попадает на фотосопротивление и вызывает фототок i , который регистрируется миллиамперметром. Величина фототока i пропорциональна интенсивности I светового потока. Поэтому об интенсивности света I можно качественно судить по показаниям миллиамперметра.

3.2. Порядок выполнения измерений и расчетов

3.2.1. Изучите установку для проверки закона Малюса.

3.2.2. Вращая анализатор \mathcal{Z} , определите по шкале миллиамперметра величину максимального отклонения стрелки. Это положение анализатора будет соответствовать углу $\varphi = 0$, при котором направления плоскостей поляризации поляроидов совпадают.

3.2.3. Поворачивая анализатор на 10° , 20° и т. д. до 360° , измерьте величину тока i в цепи фотосопротивления. Данные 37 измерений i внесите в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты измерений для подтверждения закона Малюса
и определения степени поляризации света

φ				i				$\langle i \rangle$	$\langle i \rangle_{\max}$	$\langle i \rangle_{\min}$	P	$\frac{\langle i \rangle - \langle i \rangle_{\min}}{\langle i \rangle_{\max}}$	$\cos^2 \varphi$
град				дел				дел	дел	дел	%	дел	
0	180	–	360										1,0000
10	170	190	350										0,9702
20	160	200	340										0,8836
30	150	210	330										0,7499
40	140	220	320										0,5868
50	130	230	310										0,4134
60	120	240	300										0,2500
70	110	250	290										0,1170
80	100	260	280										0,0303
90	–	270	–										0,0000

3.2.4. Для одинаковых значений $\cos^2 \varphi$ рассчитайте среднее значение фототока $\langle i \rangle$ в делениях шкалы прибора, а также максимальное $\langle i \rangle_{\max}$ и минимальное $\langle i \rangle_{\min}$ значения фототока в цепи фотосопротивления.

3.2.5. Учитывая, что величина фототока i в цепи фотосопротивления пропорциональна интенсивности I света, падающего на фотосопротивление, определите степень поляризации P света по формуле

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

где $I_{\min} \sim \langle i \rangle_{\min}$ – интенсивность света, прошедшего через оба поляризатора при $\varphi = 90^\circ$; $I_{\max} \sim \langle i \rangle_{\max}$ – интенсивность света, прошедшего через оба поляризатора при $\varphi = 0^\circ$.

3.2.6. Рассчитайте погрешность определения степени поляризации.

3.2.7. Проверьте справедливость закона Малюса. Для этого постройте зависимость $(\langle i \rangle - \langle i \rangle_{\min}) = f(\cos^2 \varphi)$.

4. Сделайте вывод.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА ПРИ ОТРАЖЕНИИ

1. Цель работы

Освоить экспериментальный метод определения степени поляризации света и проверить закон Брюстера.

2. Подготовка к работе

Ознакомится с описанием лабораторной работы и изучить в учебных пособиях: [1] §§ 190–194; [2] 34.1, 34.2; [3] §§ 98–100; ответить на вопросы самоподготовки 26–28, 30–33.

В результате подготовки студент должен знать: а) основные характеристики электромагнитной волны; б) отличие поляризованного света от естественного; в) методы преобразования естественного света в поляризованный; г) способ определения степени поляризации; д) законы отражения и преломления электромагнитных волн на границе раздела двух сред; е) закон Брюстера; ж) расчет погрешностей измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 6.1.

В трубку 1 помещен источник естественного света 2 и линза 3 для получения параллельного пучка лучей. Пучок лучей падает на отполированную диэлектрическую пластинку 4 и частично поляризуется. После отражения от пластины пучок лучей попадает в трубку 5, в которой расположен анализатор 6 с рукояткой для его поворота, собирающая линза 7 и фотосопротивление 8, изменяющее свою величину при попадании на него света.

Сила фототока i в цепи фотосопротивления пропорциональна интенсивности I света, падающего на фотосопротивление.

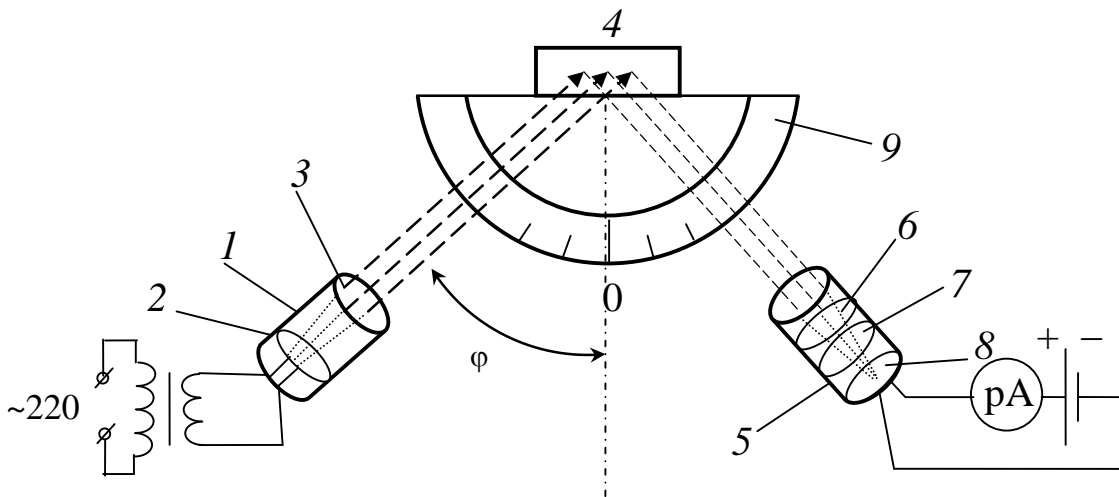


Рис. 6.1. Схема экспериментальной установки: 1, 5 – трубки для крепления элементов оптической схемы; 2 – лампа накаливания; 3, 7 – линзы; 4 – пластинка из диэлектрика; 6 – анализатор; 8 – фотосопротивление; 9 – шкала для измерения углов

К осветительной лампе подводится напряжение от понижающего трансформатора. По шкале 9 задается угол φ падения лучей естественного света и под таким же углом (отражения) необходимо располагать трубку 5 для приема лучей, поляризованных при отражении от пластинки.

3.2. Методика измерений и расчетов

Уравнение плоской монохроматической электромагнитной волны имеет вид:

$$\begin{aligned}\vec{E}_y &= \vec{E}_0 \sin(\omega t - kx), \\ \vec{H}_z &= \vec{H}_0 \sin(\omega t - kx),\end{aligned}\tag{6.1}$$

где \vec{E}_y – вектор напряжённости электрического поля (световой вектор); \vec{H}_z – вектор напряжённости магнитного поля; \vec{E}_0 и \vec{H}_0 – их амплитудные значения; ω – циклическая частота; k – волновое число, связанное с длиной волны λ и фазовой скоростью v соотношением

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

где x – координата точки, до которой дошла волна в момент времени t . Векторы \vec{E}_y и \vec{H}_z колеблются в одинаковой фазе во взаимно перпендикулярных плоскостях и перпендикулярно вектору скорости \vec{v} распространения волны (рис. 6.2).

Источниками световых электромагнитных волн являются возбужденные атомы вещества, излучающие независимо друг от друга. Поэтому любая естественная световая волна представляет собой суперпозицию элементарных световых волн со всевозможными и равновероятными направлениями колебаний векторов \vec{E} и \vec{H} .

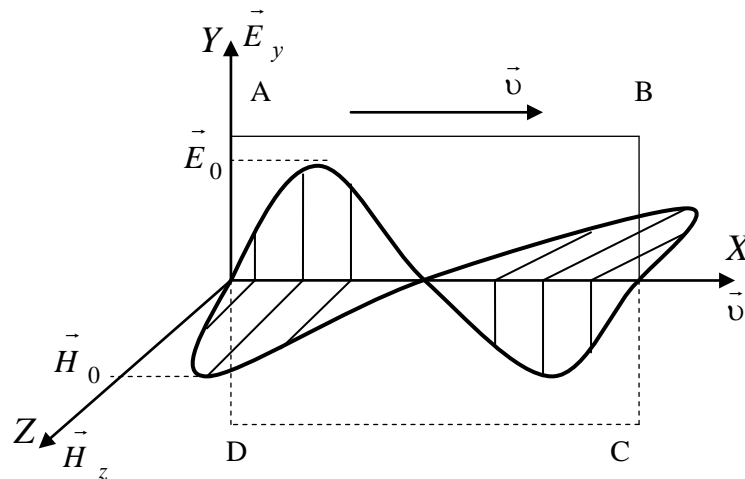


Рис. 6.2. Векторы \vec{E}_y и \vec{H}_z плоской линейно поляризованной монохроматической волны

Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора \vec{E} называется *естественным* (рис. 6.3, а).

Существует также *линейно* поляризованный свет, в котором вектор \vec{E} колеблется только в одной плоскости (рис. 6.3, б). На рис. 6.3 вектор скорости \vec{v} распространения световой волны перпендикулярен плоскости рисунка.



Рис. 6.3. Колебания электрического вектора в естественном (а) и линейно-поляризованном (б) свете

Плоскость, проходящая через направление колебаний вектора \vec{E} плоско поляризованной волны и направление распространения этой волны, называется *плоскостью поляризации* волны.

Одним из способов получения поляризованного света является отражение света от границы двух диэлектриков (например, воздуха и стекла). При этом отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными (рис. 6.4, а). Колебания вектора \vec{E} в отраженном луче происходят преимущественно в плоскости, перпендикулярной плоскости падения луча (на рис. 6.4 изображены точками). Колебания вектора \vec{E} в преломленном луче – в плоскости падения луча (на рис. 6.4 изображены стрелками). При изменении угла φ падения луча степень поляризации обоих лучей изменяется. Шотландский физик Брюстер установил закон, согласно которому при угле падения, равном углу Брюстера φ_B , определяемом соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi_B = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (6.2)$$

где n_{21} – показатель преломления второй среды относительно первой; отраженный луч полностью поляризован, преломленный – частично, отраженный и преломленный взаимно перпендикулярны (рис. 6.4, б).

Степенью поляризации называется величина

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (6.3)$$

где I_{\max} , I_{\min} – максимальная и минимальная интенсивности света.

Отражение под углом Брюстера дает простейший способ получения поляризованного света, но имеет существенный недостаток

– малую интенсивность отраженного луча. Так, для стекла эта интенсивность составляет $\sim 10\%$ интенсивности падающего луча.

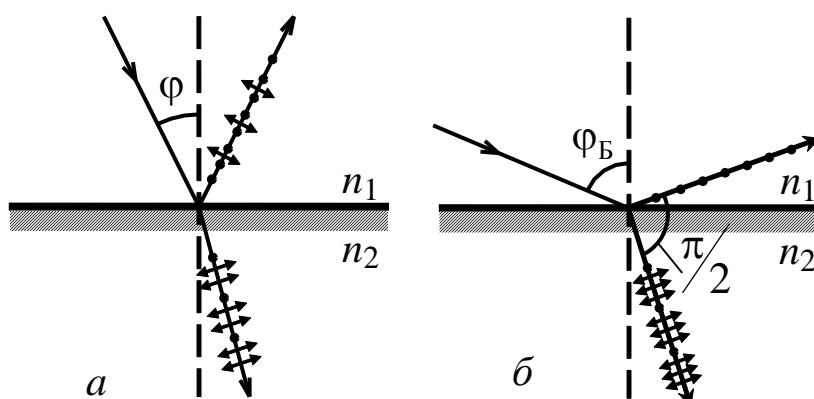


Рис. 6.4. Поляризация естественного света при отражении от границы двух диэлектриков:

- а) при произвольном угле падения;
б) при падении под углом Брюстера*

3.3. Порядок выполнения работы

3.3.1. Включите лампу накаливания и подайте напряжение в цепь фотосопротивления.

3.3.2. Установите трубку 1 под углом $\varphi = 40^\circ$ от нулевого указателя шкалы 9, трубку 5 – под таким же углом по другую сторону от нулевого указателя шкалы.

3.3.3. Измерьте максимальное значение фототока i_{\max} , подберите соответствующее положение анализатора путем его поворота относительно горизонтальной оси.

3.3.4. Поверните ручку анализатора на 90° и измерьте i_{\min} .

Поиск максимального и минимального значений фототока производите не торопясь, учитывая значительные инерционные явления в фотосопротивлении.

Все последующие значения угла φ падения лучей рекомендованы в табл. 6.1. Для каждого из этих углов измерьте i_{\max} и i_{\min} , результаты измерений занесите в табл. 6.1.

3.3.5. Рассчитайте степень поляризации для всех углов по формуле (6.3).

3.3.6. Постройте график зависимости степени поляризации от угла падения $P = f(\varphi)$ и укажите максимальное значение степени поляризации P_{\max} и соответствующий ей угол Брюстера (φ_B).

Таблица 6.1

Результаты измерения фототока при изменении угла падения и расчета степени поляризации и угла Брюстера при отражении

Угол падения φ , град	Фототок, мкА		P	P_{\max}	φ_B , град	n_{21}
	i_{\max}	i_{\min}				
40						
45						
50						
52						
54						
56						
58						
60						
65						
70						
75						

3.3.7. Определите по формуле (6.2) относительный показатель преломления n_{21} второй среды диэлектрической пластины относительно первой (воздуха) и, принимая для воздуха значение показателя преломления $n_1 = 1$, определите показатель преломления диэлектрической пластинки. Какому материалу соответствует этот показатель преломления?

4. Сделайте вывод.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Какие колебания называются гармоническими?
2. Как определить координату, скорость и ускорение материальной точки, совершающей гармонические колебания?
3. Приведите примеры колебательных систем.

4. Какие колебания называются собственными незатухающими? Затухающими?
5. При каком условии колебания механической системы можно считать гармоническими?
6. Как записывается решение дифференциального уравнения свободных незатухающих колебаний?
7. Какой физический смысл имеет момент инерции твердого тела?
8. Как можно рассчитать момент инерции тела относительно произвольной оси?
9. Что называется центром масс механической системы? Как определить координату центра масс системы?
10. Какие измерения необходимо произвести, чтобы определить расстояние от оси вращения до центра масс механической системы?
11. Как определяется период колебаний физического маятника в выполняемой работе?
12. Как рассчитывается отклонение экспериментального значения момента инерции физического маятника от рассчитанного теоретически?
13. Что такое интерференция света и каковы условия ее наблюдения?
14. Какие источники света называются когерентными? Каковы способы их получения?
15. Что такое оптическая длина пути, геометрическая и оптическая разности хода интерферирующих лучей?
16. Запишите условие максимума и минимума интенсивности света при интерференции.
17. Каковы условия получения интерференционной картины «полосы равного наклона» и «полосы равной толщины»?
18. Как определить ширину интерференционной полосы? От чего она зависит?
19. Будет ли наблюдаться интерференция в белом свете? Опишите ее особенности.
20. Приведите примеры практического использования явления интерференции света.
21. В чем суть явления дифракции?

22. Объясните особенности наблюдения дифракции Френеля? Дифракции Фраунгофера?

23. Запишите условия наблюдения максимумов и минимумов дифракции на щели и на дифракционной решетке.

24. Что понимается под угловой дисперсией дифракционной решетки?

25. Что называют разрешающей способностью спектрального прибора? Как определить разрешающую способность дифракционной решетки?

26. Какой свет называется естественным, поляризованным, частично поляризованным?

27. Какими способами можно получить поляризованный свет?

28. Как определяется степень поляризации света?

29. Сформулируйте закон Малюса.

30. Сформулируйте закон Брюстера.

31. Как изменится угол Брюстера (φ_B), если границу раздела «воздух – стекло» заменить границей раздела «вода – стекло»? Абсолютные показатели преломления сред: $n_{\text{воздух}} = 1$; $n_{\text{ст}} = 1,5$; $n_{\text{воды}} = 1,33$.

32. Как будет изменяться сила фототока при повороте анализатора от 90° до 360° .

33. Проанализируйте экспериментальные значения степени поляризации и сделайте вывод: частично или полностью поляризован отраженный луч при угле Брюстера.

Список рекомендуемой литературы

1. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 17-е изд., стереотип. – Москва : Академия, 2008. – 560 с.

2. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2007. – 720 с.

3. Савельев, И. В. Курс физики : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по техн. и технолог. направлениям и специальностям : в 3 т. Т. 2 : Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика – 4-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 352 с.

Составители

Валерий Васильевич Дырдин
Таисия Васильевна Лавряшина
Ирина Валентиновна Цвеклинская

КОЛЕБАНИЯ. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Лабораторный практикум К-303.4
по дисциплине «Физика» для студентов направления
20.03.01 «Техносферная безопасность»,
профиль «Безопасность технологических процессов и производств»,
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 13.03.2017. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 1,9.

Тираж 34 экз. Заказ

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.