Министерство образования и науки Российской Федерации

Тверской государственный технический университет

Кафедра прикладной физики

Физический практикум

Часть 3

Методические указания
к лабораторным работам
по волновой оптике

Тверь 2012

УДК 537.8 (075.8)
ББК 22.33.я7

Приведены описания экспериментальных установок, методов и порядка проведения лабораторных работ; методика обработки результатов экспериментов, соотношения между внесистемными единицами и единицами СИ, а также множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц (их наименования вынесены в приложения). В конце каждого описания работы даны рекомендуемая литература и контрольные вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы и ее защиты.

Предназначены для студентов, выполняющих лабораторные работы по разделу «Волновая оптика» курса общей физики.

Рекомендованы к печати кафедрой прикладной физики (протокол № 11 от 29 июня 2012 г.).

Составители: В.М. Алексеев, А.Н. Болотов, А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, А.В. Мишина, Ю.И. Морозова, В.Е. Никишин, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.В. Новоселова.

Под редакцией В.М. Алексеева.

Рецензент: Испирян С.Р.

© Тверской государственный
технический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 5-1
ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ …… 4

Лабораторная работа № 5-2
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА …… 10

Лабораторная работа № 5-3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ ……... 15

Лабораторная работа № 5-4
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЩЕЛИ …… 21

Лабораторная работа № 5-5
ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА …… 27

Лабораторная работа № 5-9
ИЗУЧЕНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СТИЛОСКОПА …… 35

Приложения
…… 42

Лабораторная работа № 5-1

ИЗУЧЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

Цели работы: изучение явления интерференции и определение длины световой волны, пропускаемой светофильтром.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, бипризма Френеля, ртутная лампа, раздвижная щель, окуляр-микрометр, линза, светофильтр.

Введение

Явление *интерференции* света заключается в пространственном перераспределении светового потока при наложении двух или нескольких световых волн, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других – минимумы интенсивности света. Наблюдение интерференции возможно лишь в том случае, когда складываемые световые волны *когерентны*, с одинаковыми частотами и имеют постоянную во времени разность фаз.

Излучение обычных (не лазерных) источников света является некогерентным. Однако можно осуществить различные схемы, в которых когерентные волны создаются путем разделения световой волны, исходящей из одного источника, на две части и последующего наложения их в определенной области пространства. В области перекрытия этих волн – зоне интерференции – возникает устойчивая интерференционная картина. При этом разделенные волны можно рассматривать исходящими из двух мнимых когерентных источников, на чем и основывается расчет интерференции.

Пусть имеются два когерентных источника – узкие параллельные щели S_1 и S_2 , расстояние между которыми равно d. Оба источника излучают монохроматический свет одинаковой длины волны λ. На расстоянии D от источников параллельно щелям поставлен экран (рис. 1), на котором наблюдается картина интерференции – чередующиеся светлые и темные параллельные полосы. В правой части рис. 1 изображено распределение интенсивности света J на экране вдоль оси x.

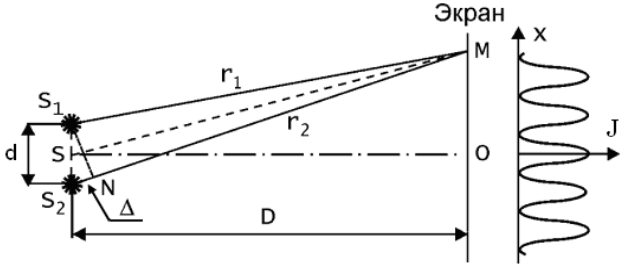


Рис. 1. Схема интерференции от двух когерентных источников

Интенсивность в произвольной точке экрана M определяется *оптической разностью хода* Δ; если обе волны распространяются в одинаковой среде, то оптическая разность хода равна геометрической $\Delta = r_2 - r_1$.

Максимум интенсивности света наблюдается в тех точках экрана, для которых разность хода лучей, пришедших от источников S_1 и S_2, равна целому числу длин волн. В этом случае колебания приходят в данную точку в одной фазе и, следовательно, максимально усиливают друг друга. *Условие интерференционного максимума* записывается в виде

$$\Delta = \pm m\lambda, \qquad (1)$$

где m – целое число (*порядок* максимума интерференции), которое принимает значения $m = 0, 1, 2, \ldots$.

Минимум интенсивности света наблюдается в тех точках экрана, для которых разность хода лучей, пришедших от источников S_1 и S_2, равна нечетному числу длин полуволн. В этом случае колебания приходят в данную точку в противофазе и, следовательно, максимально ослабляют друг друга. *Условие интерференционного минимума* записывается в виде

$$\Delta = \pm (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (2)$$

где $m = 0, 1, 2, \ldots$.

Лучи, приходящие в точку экрана с координатой $x = 0$, имеют разность хода $\Delta = 0$, что соответствует условию максимума с $m = 0$. Этот максимум называется центральным.

Координату x точки M, которой соответствует максимум (минимум) интенсивности света, найдем из подобия треугольников S_1S_2N и SMO (рис. 1). При условии $D >> d$ можно приближенно считать

$$x = \frac{D}{d}\Delta .$$

Подставляя в это выражение условие максимума (минимума) интерференции, получаем координаты максимумов (минимумов) на экране:

$$x_{\max} = \pm\frac{D}{d}m\lambda \;\text{ и }\; x_{\min} = \pm\frac{D}{d}(2m+1)\frac{\lambda}{2}. \qquad (3)$$

Найдем на основании формул (3) расстояние между соседними максимумами (расстояние между соседними минимумами) на экране, т.е. *ширину интерференционной полосы*:

$$P = \Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{D}{d}\lambda . \qquad (4)$$

Формула (4) позволяет по измеренным на опыте значениям P, D, d найти длину световой волны λ.

Описание экспериментальной установки и методики измерений

Основу экспериментальной установки составляет оптическая скамья, которая позволяет расположить необходимые оптические элементы на одной оптической оси. Раздвижную щель, светофильтр, бипризму Френеля, окуляр-микрометр ставят в данной последовательности на оптическую скамью.

В лабораторной работе разделение исходной световой волны осуществляется *бипризмой Френеля*. Это симметричная стеклянная призма с очень малыми, порядка долей градуса, преломляющими углами (рис. 2).

Источником света служит узкая светящаяся щель S, расположенная параллельно ребру тупого угла призмы (на рисунке – перпендикулярно к плоскости чертежа). Щель освещается светом ртутной лампы через светофильтр, пропускающий излучение в определенном диапазоне длин волн.

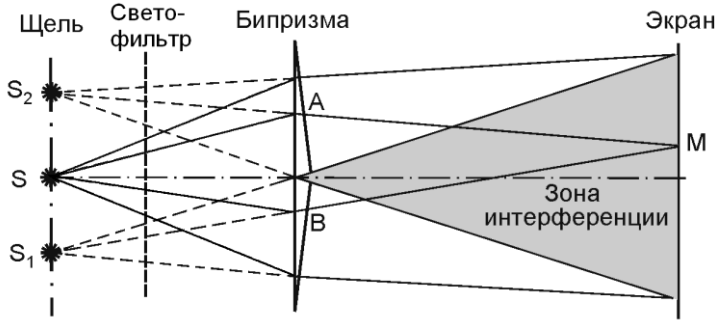


Рис. 2. Схема интерференции, получаемой с помощью бипризмы Френеля

Световая волна, идущая от источника S, в результате преломления в бипризме, разделяется на две когерентные волны, которые после прохождения через бипризму перекрываются, образуя зону интерференции. Свет от источника доходит до какой-либо точки M в области перекрытия волн по двум путям – SBM и SAM. Если продолжить лучи, ограничивающие пучки света, прошедшие через две половинки бипризмы, то они пересекутся в точках S_1 и S_2, которые можно рассматривать как два мнимых когерентных источника света.

На расстоянии 40…60 см от бипризмы устанавливается винтовой окуляр-микромер, в фокальной плоскости которого наблюдается интерференционная картина в виде чередующихся темных и светлых полос (рис. 3) и с помощью которого можно делать соответствующие измерения.

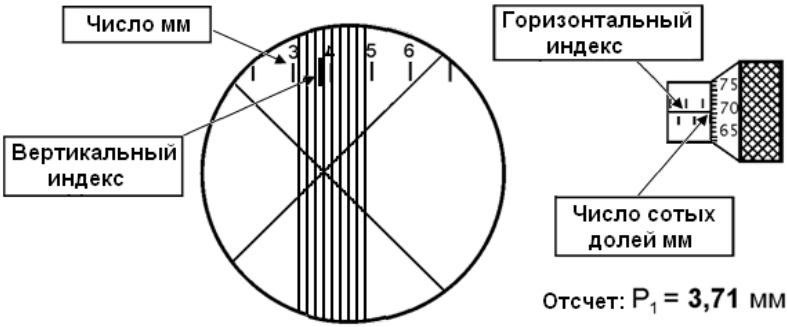


Рис. 3. Интерференционная картина, наблюдаемая через окуляр-микромер

Окно осветителя, середина щели бипризмы и окуляр-микрометр должны быть расположены на одной высоте. Правильность установки проверяется при достаточно широкой щели, чтобы был виден ход светового луча через оптическую систему.

Щель должна быть строго параллельна ребру бипризмы. Для этого, сделав щель достаточно узкой, слегка поворачивают бипризму вокруг горизонтальной оси, добиваясь такого положения, при котором интерференционная картина будет наиболее отчетливой.

Для измерения ширины интерференционной полосы P, вращая барабан, наводят фиксирующий крест на середину одной из темных полос в поле зрения окуляр-микрометра. Производят отсчет P_1 по шкале окуляр-микрометра, при этом отсчет целых миллиметров берут по линейной шкале в поле зрения окуляр-микрометра, а десятые и сотые доли отсчитывают по барабану микрометрического винта (см. рис. 3). Вращая барабан, перемещают фиксирующий крест на темную полосу, расположенную через N = 5...10 светлых полос от исходной. Производят отсчет по шкале окуляр-микрометра P_2. Очевидно, что ширина интерференционной полосы равна

$$P = \frac{P_2 - P_1}{N}, \qquad (5)$$

где N – число светлых полос между двумя выбранными темными полосами.

Чтобы измерить расстояние между мнимыми источниками d, на оптическую скамью между призмой и окуляр-микрометром помещают собирающую линзу с небольшим фокусным расстоянием, которая дает два действительных изображения щели S'_1 и S'_2 в поле зрения окуляр-микрометра (рис. 4).

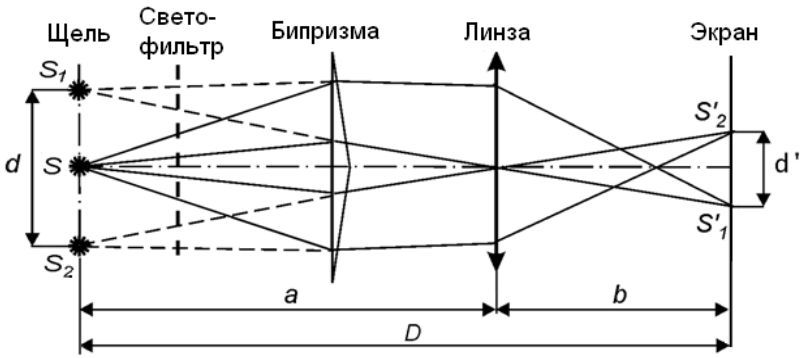


Рис. 4. Схема измерения расстояний

Передвигая линзу по скамье, добиваются того, чтобы изображения были отчетливо видны, в этом случае они лежат в той же плоскости, в которой наблюдалась интерференционная картина. С помощью окуляр-микрометра измеряют расстояние между изображениями щели:

$$d' = d_2 - d_1, \qquad (6)$$

где d_1 – отсчет при наведении фиксирующего креста окуляр-микрометра на изображение щели S'_1; d_2 – отсчет при наведении на изображение щели S'_2.

Расстояние d между мнимыми источниками S_1 и S_2 определяют

по формуле увеличения линзы

$$d = \frac{a}{b} d', \tag{7}$$

где a – расстояние от щели до линзы; b – расстояние от линзы до фокальной плоскости окуляр-микрометра – места расположения действительных изображений щели.

Подставляя значение d из формулы (7) в выражение (4), получаем расчетную формулу для длины световой волны

$$\lambda = \frac{ad'}{bD} P. \tag{8}$$

Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть источник света – ртутную лампу – и повернуть на трансформаторе ручку регулировки накала до упора в ограничитель.

Внимание! Этот пункт выполняется лаборантом или преподавателем.

2. Убедиться в наличии отчетливой интерференционной картины в поле зрения окуляр-микрометра.

3. Навести фиксирующий крест на середину одной из темных полос в поле зрения окуляр-микрометра. Записать в таблицу отсчет P_1 по шкале окуляр-микрометра.

4. Вращая барабан, переместить фиксирующий крест на другую темную полосу, расположенную через N = 5...10 светлых полос от исходной, записать в таблицу отсчет P_2 по шкале окуляр-микрометра и число N светлых полос между выбранными темными полосами.

5. Не меняя положения щели и бипризмы, установить на скамью между призмой и окуляр-микрометром собирающую линзу. Передвигая ее по скамье, добиться в поле зрения окуляр-микрометра отчетливого изображения щели в виде двух узких вертикальных линий S_1' и S_2'.

6. С помощью окуляр-микрометра произвести отсчет d_1 при наведении фиксирующего креста на середину изображения щели S_1' и отсчет d_2 при наведении на середину изображения щели S_2'. Записать значения d_1 и d_2 в таблицу.

Результаты эксперимента

№ п/п	P_1, мм	P_2, мм	N	P, мм	d_1, мм	d_2, мм	$d,'$ мм	a, мм	b, мм	D, мм	λ, нм	$\Delta\lambda$, нм	$(\Delta\lambda)^2$, нм^2
1													
2													
3													
4													
5													

$\langle\lambda\rangle =$ $\Sigma\Delta\lambda^2 =$

7. Измерить значения расстояний a, b и D по миллиметровой линейке на оптической скамье. Полученные данные записать в таблицу.

8. Повторить измерения п. 2 – п. 7 еще 4 раза. В каждом новом опыте предварительно изменяют положение бипризмы и (или) окуляр-микрометра на 1…2 см по оптической скамье.

Обработка результатов эксперимента

1. Для каждого из пяти измерений рассчитать ширину интерференционной полосы P по формуле (5) и записать результаты в таблицу.

2. Для каждого из пяти измерений рассчитать расстояние между изображениями мнимых источников света d' по формуле (6) и записать результаты в таблицу.

3. Рассчитать для каждого из пяти измерений длину волны λ по формуле (8) и записать результаты в таблицу.

4. Рассчитать среднее значение длины волны $<\lambda>$, доверительный интервал Δ_λ и относительную погрешность E (см. приложение 1).

5. Сравнить полученное значение длины волны с длиной волны, соответствующей цвету светофильтра.

Результаты работы

1. Записать значение длины волны в виде

$$\lambda = \langle\lambda\rangle \pm \Delta_\lambda, \qquad E = \ldots\ \%.$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается явление интерференции света?
2. Какие источники колебаний называются когерентными?
3. Почему независимые источники света некогерентны?
4. Какими способами осуществляется когерентность источников света в оптике?
5. Вывести формулу зависимости интенсивности результирующего колебания от разности фаз между слагаемыми колебаниями. Записать условие минимума.
6. Что такое оптическая разность хода, и как она связана с разностью фаз? Разность хода двух интерферирующих лучей $\Delta = 0{,}3\lambda$. Найти разность фаз колебаний.
7. Сформулируйте условия максимума и минимума при интерференции.
8. Чем отличаются картины интерференции от источника белого света, наблюдаемые со светофильтром и без него?
9. От чего зависит ширина интерференционной полосы?
10. Как в работе увеличить ширину интерференционной полосы?
11. Почему преломляющий угол бипризмы должен быть очень малым?

Дополнительная литература

1. Савельев, И.В. Курс физики. Т.2 / И.В. Савельев. М.: Лань, 2008. §35, 39, 47–52.

2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. школа, 2008. §171–175.

Лабораторная работа № 5-2
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

Цели работы: изучение явления интерференции света в тонких пленках, измерение радиуса кривизны линзы и определение длины световой волны с помощью колец Ньютона.

Приборы и принадлежности: микроскоп, объект-микрометр, держатель со стеклянной пластинкой и плосковыпуклой линзой.

Введение

Явление *интерференции* света заключается в пространственном перераспределении светового потока при наложении двух или нескольких световых волн, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других – минимумы интенсивности света. Наблюдение интерференции возможно лишь в том случае, когда складываемые световые волны *когерентны*, с одинаковыми частотами и имеют постоянную во времени разность фаз. Так как естественные источники некогерентны, то для получения интерференционной картины когерентность световых волн достигается путем разделения световой волны, исходящей из одного источника, на две части. Последние, будучи когерентными волнами, в области перекрытия дают интерференционную картину в виде чередующихся максимумов и минимумов интенсивности света.

Один из способов наблюдения интерференции света – *кольца Ньютона* – осуществляется при отражении падающего света от верхней и нижней границ воздушной прослойки, образованной между поверхностью плоской стеклянной пластинки и соприкасающейся с ней выпуклой сферической поверхностью линзы с большим радиусом кривизны (рис. 1).

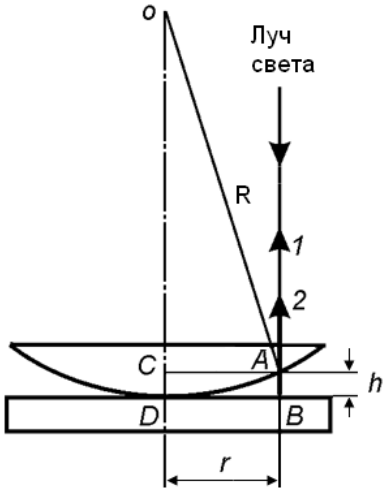


Рис. 1. Оптическая схема для наблюдения колец Ньютона

Пусть параллельный пучок света падает на плоскую поверхность линзы вдоль ее оптической оси. Поскольку кривизна линзы очень мала, то можно считать, что свет падает по нормали к поверхностям линзы и пластинки. Луч света в точке *A* частично испытывает отражение (луч *A1*), а частично проходит воздушную прослойку и, отразившись от поверхности стеклянной пластинки в точке *B*, вернется в точку *A* (луч *B2*), где будет наблюдаться интер-

ференция. При отражении от оптически более плотной среды (в точке B) происходит изменение фазы волны на π, что эквивалентно изменению пути волны на $\lambda/2$ – в половину длины волны.

Таким образом, между лучами $A1$ и $B2$ возникает оптическая разность хода

$$\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2}, \qquad (1)$$

где h – толщина прослойки в данном месте, λ – длина световой волны.

Практически линза и стеклянная пластинка могут соприкасаться в точке D неплотно, образуя дополнительный зазор величиной a. Может, напротив, оказаться, что линза будет слегка деформирована в точке D, тогда толщина воздушной прослойки уменьшится на величину a. С учетом этих обстоятельств выражение (1) запишем в виде

$$\Delta = 2h \pm a + \frac{\lambda}{2}. \qquad (2)$$

Если оптическая разность хода по формуле (2) соответствует условию интерференционного минимума

$$\Delta_{min} = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (3)$$

то, объединив (2) и (3), получим:

$$2h = m\lambda \pm 2a, \qquad (4)$$

где m – целое число, которое принимает значения $m = 0, 1, 2, \ldots$.

Так как установка симметрична относительно оптической оси линзы, то условию (4) удовлетворят все точки, лежащие на окружности радиуса r (см. рис. 1). Следовательно, интерференционная картина будет представлять собой систему чередующихся концентрических светлых и темных колец (рис. 3).

Выведем формулу для расчета радиусов колец. Из рис. 1 следует, что

$$R^2 = (R-h)^2 + r^2,$$

где R – радиус кривизны линзы. Принимая во внимание, что $R >> h$, получим:

$$r^2 = 2Rh. \qquad (5)$$

Радиусы темных колец определим, подставляя в (4) значение h из (5):

$$r_k^2 = m\lambda R \pm 2Ra. \qquad (6)$$

Величина a не может быть измерена, но ее можно исключить. Напишем выражение (6) для m-го и k-го темных колец и, исключая a, получим:

$$R = \frac{r_k^2 - r_m^2}{(m-k)\lambda}$$

или

$$R = \frac{d_k^2 - d_m^2}{4(m-k)\lambda}, \qquad (7)$$

где d_m и d_k – диаметры выбранных m-го и k-го темных колец.

По формуле (7) для известной длины волны λ можно, измерив диаметры темных колец, найти радиус кривизны линзы *R*. Наоборот, если известен радиус кривизны линзы *R*, то можно из размеров наблюдаемых колец найти длину световой волны λ.

Описание экспериментальной установки и методики измерений

Измерительный микроскоп (рис. 2), применяемый для наблюдения колец Ньютона, снабжен опак-иллюминатором, который служит для освещения объекта при работе с микроскопом в отраженном свете. Опак-иллюминатор состоит из *осветительной системы* 1 и полупрозрачной пластинки, расположенной между *объективом* 2 и *окуляром* 3 микроскопа и наклоненной под углом 45° к оптической оси микроскопа. Источником света служит электрическая лампа накаливания, включаемая в сеть через трансформатор. С помощью осветительной системы опак-иллюминатора свет направляется на полупрозрачную пластинку, отражается этой пластинкой и через объектив попадает на предметный столик 4, на который устанавливается держатель 10 со стеклянной пластинкой и прижатой к ней плосковыпуклой линзой так, что оптическая ось линзы располагается параллельно направлению распространению пучка света. Наблюдение колец Ньютона ведется через *светофильтр,* вставляемый в паз 5 и выделяющий узкий участок спектра.

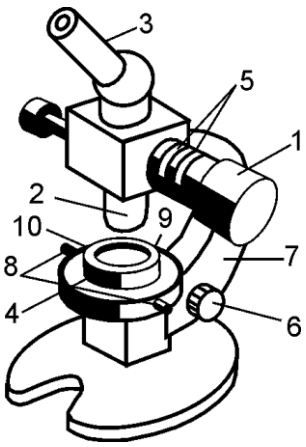


Рис. 2. Измерительный микроскоп

Вертикальное перемещение микроскопа относительно предметного столика 4 осуществляется *рукоятками фокусировки* 6, расположенными на тубусодержателе 7. Тонкое горизонтальное перемещение столика 4 можно производить центровочными винтами 8, закрепив столик винтом 9.

Для определения размеров изображения в поле зрения микроскопа имеется шкала *окуляр-микрометра*, цену деления которой надо определить в условиях опыта. Для этой цели используется *объект-микрометр*. Он представляет собой маленькое круглое зеркало, вмонтированное в металлическую пластинку. На зеркало нанесена шкала длиной 1 мм, состоящая из 100 штрихов.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Определение цены деления окуляр-микрометра

1. Включить осветитель 1 через трансформатор.

Примечание. Осветитель включать только на время измерений!

2. Поместить объект-микрометр на предметный столик 4 микроскопа.

3. Перемещая тубус микроскопа с помощью рукояток фокусировки 6 и передвигая объект-микрометр центровочными винтами 8 (предварительно закрепив столик винтом 9), добиться совмещения изображения шкалы объект-микрометра с изображением шкалы окуляр-микрометра. Определить количество малых делений шкалы окуляр-микрометра N_m, которое укладывается в шкале объект-микрометра длиной в 1 мм. Результаты занести в табл. 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента 1

Число делений шкалы окуляр-микрометра N_m	Цена деления шкалы окуляр-микрометра σ, мм/дел

4. Рассчитать и записать в таблицу 1 цену деления окулярного микрометра σ, мм/дел.

Упражнение 2. Определение радиуса кривизны плосковыпуклой линзы с помощью колец Ньютона

1. Расположить на предметном столике микроскопа 4 держатель со стеклянной пластинкой и плосковыпуклой линзой.

2. Получить отчетливое изображение колец Ньютона, перемещая тубус микроскопа с помощью рукояток фокусировки 6. Центр колец должен совпадать с центром поля зрения микроскопа, для точной наводки воспользоваться центровочными винтами 8.

3. В один из пазов для светофильтров поместить зеленый светофильтр (λ = *530 нм*).

4. Для измерения диаметров темных колец произвести отсчеты по шкале окуляр-микрометра справа $N_{прав}$ и слева $N_{лев}$ от центра картины (рис. 3). Диаметр кольца будет равен

$$d_k = (N_{прав} - N_{лев})\ \sigma.$$

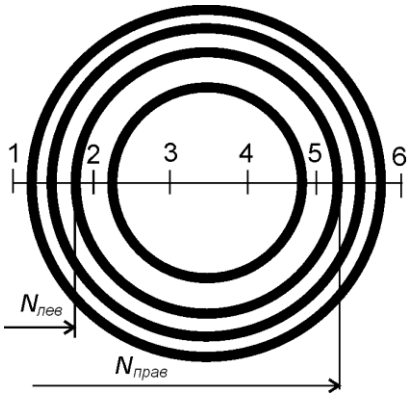


Рис. 3. Схема измерения диаметров

Измерить диаметры возможно большего числа темных колец. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2. Результаты эксперимента 2

№ кольца	Отсчеты по шкале окуляра		Диаметр кольца d, мм
	$N_{лев}$	$N_{прав}$	
1			
2			
3			
…			

Упражнение 3. Определение длины световой волны

1. Установить другой светофильтр, выбранный преподавателем.

2. Измерить диаметры возможно большего числа темных колец. Результаты измерений занести в табл. 3.

Таблица 3. Результаты эксперимента 3

№ кольца	Отсчеты по шкале диаметра кольца		Диаметр кольца d, мм
	$N_{лев}$	$N_{прав}$	
1			
2			
3			
…			

Обработка результатов эксперимента

1. Зная длину волны $\lambda = 530$ *нм* зеленого света, пропускаемого первым светофильтром, и группируя парами значения диаметров колец (из табл. 2), рассчитать по формуле (7) величину радиуса кривизны линзы R . Результаты занести в табл. 4.

2. Рассчитать среднее значение радиуса кривизны $\langle R \rangle$, доверительный интервал Δ_R и относительную погрешность E (см. приложение 1).

Таблица 4. Величина радиуса кривизны линзы

№ колец		Диаметры колец		Радиус линзы R, *мм*	ΔR, *мм*	$(\Delta R)^2$, *мм*^{2}
m	k	d_m, *мм*	d_k, *мм*			
1	3					
2	4					
…	…					

$\langle R \rangle =$ $\sum(\Delta R_i)^2 =$

4. Зная среднее значение радиуса кривизны линзы и группируя парами значения диаметров колец (из табл. 3), вычислить длину световой волны λ для второго светофильтра, используя формулу (7). Результаты занести в табл. 5.

5. Рассчитать среднее значение длины волны $\langle \lambda \rangle$, доверительный интервал Δ_λ и относительную погрешность E (см. приложение 1).

Таблица 5. Длина световой волны

№ колец		Диаметры колец		Длина волны λ, *мм*	$\Delta\lambda$, *мм*	$(\Delta\lambda)^2$, *мм*^{2}
m	k	d_m, *мм*	d_k, *мм*			
1	3					
2	4					
…	…					

$\langle \lambda \rangle =$ $\sum(\Delta\lambda_i)^2 =$

Результаты работы

1. Результат представить в виде

$$R = \langle R \rangle \pm \Delta_R, \quad E = \ldots \%.$$
$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta_\lambda, \quad E = \ldots \%.$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление интерференции?
2. Какие источники называются когерентными? Как можно получить когерентные волны?
3. Каким образом создается разность хода при наблюдении колец Ньютона?
4. Объясните различия интерференционной картины в отраженном и проходящем свете в опыте Ньютона.
5. Какой вид будет иметь интерференционная картина, если убрать светофильтр? Почему?
6. При наблюдении в отраженном свете центральный круг оказался светлым. Почему? Как устранить центральный светлый круг?
7. Где плотнее расположены интерференционные кольца, в центре или на периферии? Почему?
8. Почему интерференционная картина исчезает при увеличении расстояния между линзой и пластинкой?
9. Почему радиус кривизны линзы должен быть относительно велик?
10. Как изменится интерференционная картина, если линзу со сферической поверхностью заменить линзой с цилиндрической поверхностью?

Дополнительная литература

1. Савельев, И.В. Курс физики. Т.2 / И.В. Савельев. М.: Лань, 2008. §35, 39, 47–52.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. школа, 2008. § 171–175.

Лабораторная работа № 5-3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Цели работы: изучение дифракционной решетки как спектрального прибора, оценка ее разрешающей способности и угловой дисперсии.

Приборы и принадлежности: оптический гониометр, дифракционная решетка, источник света – ртутная лампа.

Введение

Дифракционная решетка представляет собой стеклянную пластинку, на которую алмазной иглой нанесено большое число параллельных непрозрачных штрихов через строго одинаковые интервалы. Величина d, равная

суммарной ширине прозрачной щели и непрозрачного промежутка между щелями, называется *постоянной (периодом) дифракционной решетки:*

$$d = \frac{L}{N}, \qquad (1)$$

где L – длина решетки, N – число штрихов решетки.

При падении плоской световой волны на решетку (*Д. р.*) каждая щель ее становится источником когерентных волн. Результирующее световое колебание в любой точке пространства определяется согласно принципу Гюйгенса-Френеля суммированием вторичных волн, приходящих в данную точку от всех элементов решетки, с учетом их амплитуд и фаз.

Если на пути дифрагированных волн поставить собирающую линзу (*Л*), то в ее фокальной плоскости (*Ф. пл.*) будет наблюдаться дифракционный спектр, состоящий из ряда отдельных максимумов (рис. 1).

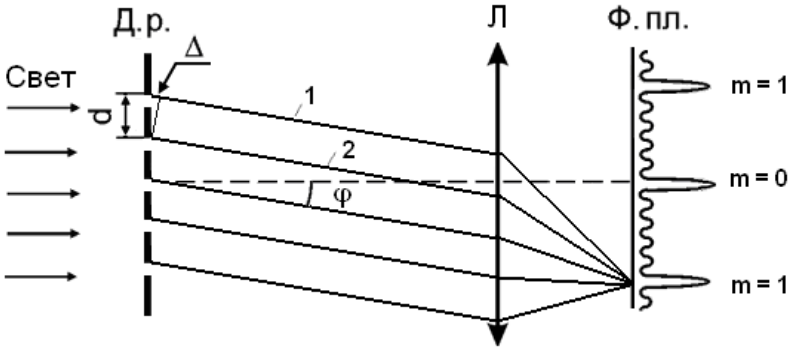


Рис. 1. Дифракция на дифракционной решетке

Дифракционные максимумы возникают в тех направлениях, для которых оптическая разность хода лучей от соседних щелей решетки равна целому числу длин волн. В этом случае колебания от всех щелей решетки приходят в данную точку фокальной плоскости линзы в одной фазе и, следовательно, максимально усиливают друг друга. На рис. 1 видно, что *оптическая разность хода* лучей 1 и 2

$$\Delta = d \cdot \sin\varphi,$$

где d – постоянная (период) решетки; φ – *угол дифракции.*

Углы дифракции, под которыми образуются максимумы интенсивности света, определяются условием

$$d \cdot \sin\varphi = \pm m\lambda, \qquad (2)$$

где m – *порядок дифракционного максимума* (m = 0, 1, 2, …); λ – длина волны света.

Из формулы (2) следует, что если падающий свет немонохроматический, то есть содержит несколько различных длин волн, то решетка разложит

его в спектр. В направлении $\varphi = 0$ возникает центральный максимум нулевого порядка ($m = 0$) для всех длин волн. Слева и справа от него возникнут спектры различных порядков ($m = 1, 2, \ldots$), в каждом из которых максимумы более коротких длин волн располагаются ближе к центральной полосе, максимумы более длинных волн – дальше. На этом основано использование дифракционной решетки в качестве спектрального прибора.

Качество спектра зависит от угловой дисперсии и разрешающей способности прибора.

Угловая дисперсия характеризует способность спектрального прибора пространственно разделить пучки лучей различных длин волн. Мерой угловой дисперсии является отношение $\delta\varphi / \delta\lambda$, где $\delta\varphi$ – угловое расстояние между спектральными линиями, отличающимися по длинам волн на $\delta\lambda$. Для дифракционной решетки угловая дисперсия

$$D = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda} = \frac{m}{d \cdot \cos\varphi} \approx \frac{m}{d}, \qquad (3)$$

где m – порядок спектра; d – период решетки; $\cos\varphi \approx 1$ при малых углах φ. Эту формулу легко получить, продифференцировав соотношение (2) по λ.

Разрешающая способность характеризует способность прибора разрешить (разделить) спектральные линии, мало отличающиеся по длинам волн. За меру разрешающей способности принимается отношение $\lambda/\delta\lambda$, где λ – длина волны, вблизи которой проводится измерение; $\delta\lambda$ – наименьшая разница в длинах волн двух разрешаемых спектральных линий. Значение $\delta\lambda$ обычно определяется условием Рэлея: две близкие спектральные линии считаются разрешенными, то есть воспринимаются глазом раздельно, если середина максимума одной из них совпадает с краем максимума другой. Отсюда можно показать, что разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = m \cdot N, \qquad (4)$$

где m – порядок спектра; N – число штрихов решетки.

Описание экспериментальной установки и методики измерений

Работу проводят на *гониометре* – приборе, предназначенном для точных измерений углов. Установка показана на рис. 2. Здесь 1 – источник света (ртутная лампа); 2 – коллиматор, в передней фокальной плоскости которого расположена узкая раздвижная щель, ее ширина может регулироваться с помощью микрометрического винта 3; дифракционная решетка 4 закреплена на столике 5. Зрительная труба укреплена на подвижной платформе, которую можно поворачивать вокруг вертикальной оси, проходящей через центр предметного столика. В окуляр зрительной трубы 6 наблюдают линейчатый спектр. *Поворот зрительной трубы осуществляется вместе с платформой от руки после освобождения стопорного винта 7*. При

закрепленном винте 7 можно производить тонкое перемещение платформы со зрительной трубой винтом 8.

Лимб (круговая шкала) гониометра снабжена делениями (двойными штрихами). Оцифровка делений произведена через каждый градус.

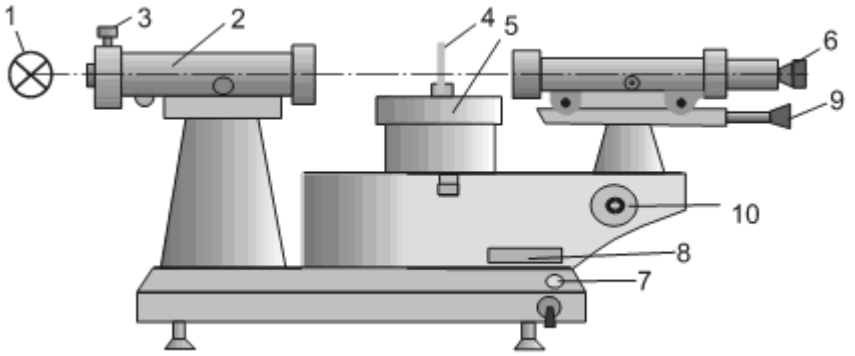


Рис. 2. Гониометр

Измерение угла производят по лимбу через лупу 9. Для этого надо повернуть маховичок 10 настолько, чтобы верхние и нижние двойные штрихи лимба в левом окне поля зрения лупы точно совпали, как показано на рис. 3.

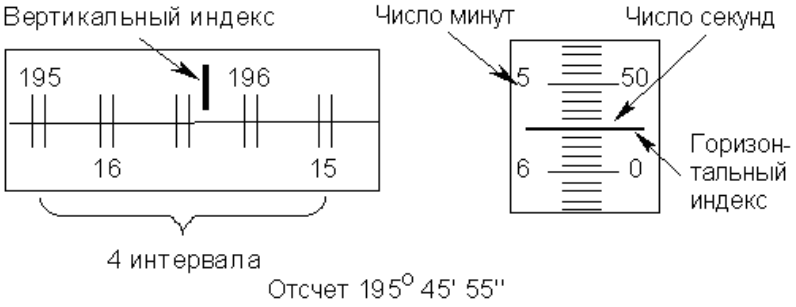


Рис. 3. Пример отсчета показаний гониометра

Число ***градусов*** будет равно ближайшему левому от вертикального индекса числу верхней шкалы. Число ***десятков минут*** равно числу ***интервалов***, заключенных между верхним двойным штрихом, соответствующим отсчитанному числу градусов, и нижним оцифрованным двойным штрихом, отличающимся на 180°. Число ***единиц минут*** отсчитывается в правом окне поля зрения по левому ряду чисел, число ***секунд*** – напротив неподвижного горизонтального индекса по шкале в том же окне и правому ряду чисел.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Определение спектральных характеристик решетки

1. Включить в сеть источник света – ртутную лампу – и повернуть на трансформаторе ручку регулировки накала до упора в ограничитель.

Внимание! Этот пункт выполняется лаборантом или преподавателем.

2. Проверить, чтобы входная щель коллиматора 2 гониометра была хорошо освещена. Для этого отведите зрительную трубу в сторону и посмотрите на дифракционную решетку – должны отчетливо наблюдаться: центральный максимум (яркая белая полоса) и несколько порядков спектра справа и слева от нее.

3. Верните зрительную трубу в исходное положение, при котором ее оптическая ось направлена по нормали к решетке. Посмотрите в окуляр зрительной трубы 6. В поле зрения должна располагаться белая полоса – центральный (нулевой) максимум. Дайте некоторое время (5…10 с) приспособиться глазу к изображению. Вращением оправы окуляра добейтесь четкого изображения визирного креста в поле зрения.

4. Включите тумблер подсветки лимба. Посмотрите в лупу 9, дайте некоторое время (5…10 с) приспособиться глазу к изображению. Вращением оправы лупы добейтесь четкого изображения измерительных шкал (см. рис. 3) в поле зрения.

5. Поворачивая зрительную трубу влево и вправо от центрального максимума, изучите расположение цветных линий в спектрах первого и второго порядков, сопоставляя их с таблицей основных спектральных линий паров ртути.

6. Поверните зрительную трубу до совмещения визирного креста с первой линией спектра вправо от центрального максимума. Закрепите трубу стопорным винтом 7, а затем проведите точную наводку центра визирного креста на выбранную спектральную линию, вращая барабанчик микрометрического винта 8. Снимите через лупу 9 отсчет угла $\alpha_{пр}$ с точностью до секунд (см. рис. 3). Результат запишите в табл. 1. *Освободите стопорный винт 7.*

7. Проведите подобные измерения (п. 6) для других видимых линий в спектрах *первого* и *второго* порядка *вправо* от центрального максимума. Результаты отсчета углов $\alpha_{пр}$ занести в табл. 1.

8. Проведите аналогичные измерения (п. 6) для соответствующих линий в спектрах *первого* и *второго* порядка *влево* от центрального максимума. Результаты отсчета углов $\alpha_{лев}$ занести в табл. 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента

№ п/п	Цвет линии	λ, нм	m	$\alpha_{пр}$	$\alpha_{лев}$	φ	$\sin\varphi$
1							
2							
3							
…							

Обработка результатов эксперимента

1. Рассчитать углы дифракции по формуле

$$\varphi = \frac{\left|\alpha_{пр} - \alpha_{лев}\right|}{2}.$$

Рассчитать значения $\sin\varphi$, записать результаты в табл. 1.

2. Для каждой строки табл. 1 рассчитать по формуле (2) постоянную дифракционной решетки d. Полученные значения записать в табл. 2.

3. Рассчитать среднее значение $\langle d \rangle$, доверительный интервал Δ_d и относительную погрешность E (см. приложение 1).

4. Зная длину решетки L (см. указания на лабораторном столе) и среднее значение постоянной решетки $\langle d \rangle$, рассчитать по формуле (1) число штрихов N. Полученное значение записать в табл. 2.

5. Для первого $m = 1$ и второго $m = 2$ порядков рассчитать угловую дисперсию D по формуле (3) и разрешающую способность R по формуле (4). Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики дифракционной решетки

$L =$ мм

№	d, мм	Δd, мм	$(\Delta d)^2$, мм^2
1			
2			
...			

$\langle d \rangle =$ $\Sigma(\Delta d)^2 =$

N	m	D, рад/мм	R
	1		
	2		

Результаты работы

1. Результат представить в виде

$$d = \langle d \rangle \pm \Delta_d, \qquad E = \ldots \%.$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип Гюйгенса – Френеля?

2. В чем отличие дифракционной картины, даваемой одной щелью и решеткой?

3. Объяснить дифракционную картину, возникающую при прохождении света через решетку.

4. Что называется разрешающей способностью решетки, и от чего она зависит?

5. Что называется угловой дисперсией решетки, от чего она зависит? Выведите формулу угловой дисперсии дифракционной решетки.

6. Чем отличается дифракционный спектр от спектра, даваемого призмой?

7. Как изменится дифракционная картина при изменении постоянной решетки?

8. Как изменится дифракционная картина при изменении числа штрихов решетки?

Дополнительная литература

1. Савельев, И.В. Курс физики. Т.2 / И.В. Савельев. М.: Лань, 2008. §35, 39, 47–52.

2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. школа, 2008. §176–179.

Лабораторная работа № 5-4

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЩЕЛИ

Цели работы: изучение дифракции света на щели, определение толщины тонкой нити и длины волны лазерного излучения.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, лазер, щель, рамка с тонкой нитью, экран, снабженный миллиметровой шкалой.

Введение

Дифракцией света называется совокупность явлений, связанных с непрямолинейным распространением светового луча, если они не относятся к отражению и преломлению света. Дифракция приводит к огибанию световыми волнами препятствия и захождению света в область геометрической тени. Наиболее ярко дифракция выражена, когда размер препятствий соизмерим с длиной волны падающего света.

Объясняется дифракция с помощью принципа *Гюйгенса – Френеля,* согласно которому каждый элемент волновой поверхности (волнового фронта) служит источником вторичных сферических волн, которые распространяются не только в направлении падающей волны, но и заходят в область геометрической тени. Вторичные волны когерентны и интерферируют между собой. Поэтому дифракционные явления можно рассматривать как результат интерференции волн множества вторичных источников.

Рассмотрим дифракцию параллельных лучей монохроматического света с длиной волны λ, падающих нормально на узкую щель шириной b. Плоскость щели совпадает с фронтом падающей волны, где образуются вторичные сферические источники света. В результате интерференции вторичных волн (рис. 1) на экране за щелью возникает *дифракционная картина* в виде чередующихся светлых и темных полос – максимумов и минимумов интенсивности светового потока. *Угол дифракции* φ – угол отклонения лучей вправо или влево от прямого направления лежит в пределах: $0 \le \varphi \le \pi/2$.

Для объяснения явления и получения количественных соотношений воспользуемся *методом зон Френеля*. Разобьем щель на зоны, параллельные ее краям. Ширина каждой зоны выбирается так, чтобы геометрическая разность хода лучей от краев соседних зон до исследуемой точки была равна $\lambda/2$ (рис. 1). В плоскости щели все точки волнового фронта имеют одинаковую фазу и амплитуду колебаний. В точку наблюдения световые волны из двух соседних зон будут приходить в противофазе, поэтому суммарная интенсивность колебаний от двух любых соседних зон Френеля равна нулю. Пусть на ширине щели укладывается $N_ф$ зон Френеля, тогда на отрезке $\Delta = b \cdot \sin\varphi$ отложится такое же число половинок длин волн, следовательно:

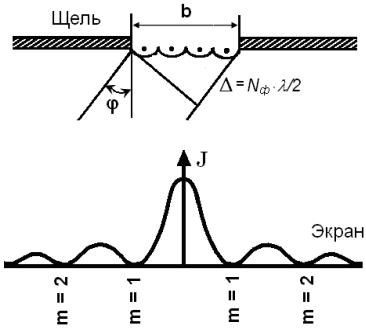


Рис. 1. Дифракция на щели

$$b \cdot \sin\varphi = N_ф \cdot \lambda/2. \qquad (1)$$

Если число зон Френеля четное $N_ф = 2m$, то волны, приходящие в точку наблюдения от каждой соседней пары зон Френеля, погасят друг друга, давая минимум освещенности при любом целом значении числа m. *Условие минимума* при дифракции монохроматического света на узкой щели примет вид

$$b\sin\varphi = \pm m\lambda, \qquad (3)$$

где m – *порядок* дифракционного минимума (m = 1, 2, …).

Если число зон Френеля нечетное $N_ф = 2m + 1$, то избыточная зона даст в точке наблюдения максимум освещенности при любом целом значении числа m. Условие максимума при дифракции монохроматического света на узкой щели примет вид

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

где m – *порядок* дифракционного максимума (m = 1, 2, …).

В направлении $\varphi = 0$ вся щель действует как одна зона Френеля, и свет распространяется с наибольшей интенсивностью; напротив щели в прямом направлении располагается центральный максимум (m = 0).

На рис. 1 и 2 изображено распределение интенсивности света J на экране. Основная часть световой энергии сосредоточена в центральном максимуме. Справа и слева от него расположены боковые максимумы, интенсивность которых убывает от центра к периферии.

Выразим из формулы (3) углы, в направлении которых будут наблюдаться минимумы интенсивности:

$$\sin\varphi = \frac{m\lambda}{b}. \qquad (4)$$

Обозначив расстояние между минимумами m-го порядка на экране через x_m (рис. 2), а расстояние от щели до экрана через L и учитывая, что $x_m << L$, найдем:

$$sin\varphi \approx tg\varphi = \frac{x_m}{2L}. \quad (5)$$

Приравнивая выражения (4) и (5), получим формулу для определения длины волны падающего излучения λ:

$$\lambda = \frac{x_m b}{2 \cdot L \cdot m}. \quad (6)$$

Таким образом, наблюдая устойчивую дифракционную картину от источника света, можно найти из опыта неизвестную длину волны λ, измерив значения x_m, L и b при заданном значении m.

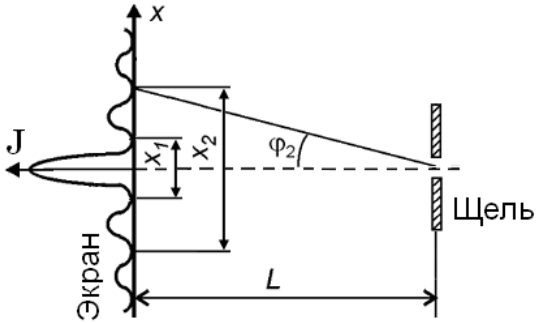


Рис. 2. Схема для расчета длины волны падающего излучения

Можно решить и обратную задачу: по известной длине волны λ определить ширину щели b по формуле

$$b = \frac{2 \cdot L \cdot m \cdot \lambda}{x_m}. \quad (7)$$

В теории дифракции показано, что дифракционная картина от узкой щели и тонкой нити, толщина которой равна ширине щели, вне области прямого пучка идентична. Поэтому по дифракционной картине на тонкой нити можно определить ее толщину b, используя формулу (7).

Описание экспериментальной установки и методики измерений

Установка для наблюдения дифракции (рис. 3) состоит из гелий-неонового лазера 1, микрометрической щели 2 и белого прямоугольного экрана с миллиметровой шкалой 3, установленных на оптической скамье 4. Микрометрическая щель может заменяться рамкой с тонкой нитью.

Оптическая скамья представляет собой горизонтальную направляющую, позволяющую расположить приборы на одной оптической оси. Лазер и экран уже зафиксированы на ней. Стойку с микрометрической щелью (или стойку с тонкой нитью) можно перемещать вдоль скамьи и закреплять в заданном положении стопорными винтами. Скамья снабжена сантиметровой

линейкой, по которой измеряется расстояние L от экрана до щели (или до рамки с нитью).

В качестве источника излучения используется гелий-неоновый лазер, дающий узкий пучок монохроматического света с очень малым углом расхождения. Малая расходимость пучка позволяет использовать его как пучок практически параллельных лучей, которые падают на узкую щель по направлению нормали к ее плоскости. В результате на экране возникает дифракционная картина в виде чередующихся максимумов и минимумов интенсивности света.

Ширину щели b регулируют вращением микрометрического винта 5. Отсчет ширины щели производят по основной шкале на корпусе винта и по круговой шкале на барабане микрометрического винта. Рядом со шкалой указана цена ее деления.

Расстояние x_m между минимумами m-го порядка на экране определяют как разность отсчетов их положений слева и справа от центрального максимума, измеряемых путем наведения курсора 6 подвижной шкалы 7 на заданный минимум и снятия отсчета соответствующих координат под стрелкой 8 (рис. 3, вид А).

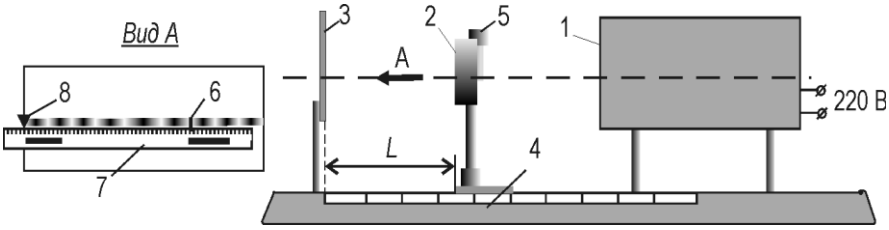


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Определение зависимости расстояния между минимумами от ширины щели

1. Поставить раздвижную щель на оптическую скамью на расстоянии $L = 0{,}3 \ldots 0{,}5$ м от экрана, предварительно немного раскрыв ее. Измеренное по линейке расстояние L от щели до экрана занести в табл. 1.

2. Включить лазер.

Внимание! Попадание в глаза прямого лазерного пучка опасно для зрения. При работе с лазером его свет можно наблюдать только после отражения от рассеивающих поверхностей.

Направить пучок излучения точно на середину щели. При этом на экране должна возникнуть дифракционная картина. При необходимости подкорректировать с помощью установочных винтов положение щели или направление лазерного луча.

3. Вращая микрометрический винт, т.е. меняя ширину щели, проследить за изменением дифракционной картины на экране. Изучить, как выглядит картина дифракции: а) при очень широкой щели; б) при узкой щели.

4. Установить минимальную ширину щели, при которой на экране возникает дифракционная картина, содержащая четкие минимумы m-го порядка. *Порядок минимума m задается преподавателем*, запишите его в табл. 1.

5. По шкале микрометрического винта измерить ширину щели b и записать ее в табл. 1.

6. На экране произвести отсчеты положения заданного m-го минимума справа и слева от центрального максимума. Данные занести в табл. 1.

7. Увеличивая ширину щели 5…7 раз, повторить измерения пп. 5 и 6, занося данные в табл. 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента 1

$L =$ *м,* $m =$

№ п/п	Ширина щели b, *мм*	Отсчет положения минимума, *мм*		Расстояние между m-ми минимумами x_m, *мм*
		справа	слева	
1				
2				
…				

Упражнение 2. Определение длины волны лазерного излучения

1. Установить такую ширину щели b, чтобы на экране хорошо просматривалось по *5…8* минимумов справа и слева от центрального максимума. Измерить ширину b щели и расстояние от щели до экрана L, результаты занести в табл. 2.

2. Для данной ширины щели произвести отсчеты положения справа и слева первого, второго и т.д. минимума, для которых: $m = 1, 2, 3, ..., 5$. Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2. Результаты эксперимента 2

$L =$ *м,* $b =$ *мм.*

№ п/п	m	Отсчет положения минимума, *мм*		x_m, *мм*	λ, *нм*	$\Delta\lambda$, *нм*	$(\Delta\lambda)^2$, *нм*^{2}
		справа	слева				
1	1						
2	2						
…	…						
5	5						

$\langle\lambda\rangle =$ $\Sigma(\Delta\lambda_i)^2 =$

Упражнение 3. Определение толщины тонкой нити

1. Снять микрометрическую щель с оптической скамьи и установить на этом же месте рамку с тонкой нитью. Вращением установочных винтов рамки добиться попадания луча лазера на нить, при этом на экране возникает картина, аналогичная дифракции на щели.

2. Измерить положение m-го минимума справа и слева от центрального максимума (порядок минимума m такой же, как в упражнении 1). Данные занести в табл. 3.

Таблица 3. Результаты эксперимента 3

L	m	Отсчет положения минимума, *мм*		x_m, *мм*	$\langle\lambda\rangle$, *нм*	Толщина нити, *мм*	
		справа	слева			по графику	по формуле (7)

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 1 рассчитать и занести в таблицу расстояние x_m между минимумами m-го порядка как разность отсчетов их положений слева и справа от центрального максимума. Используя полученные результаты построить график зависимости x_m от ширины щели: $x_m = f(b)$.

2. В табл. 2 рассчитать расстояния x_1, x_2, … x_5 между минимумами *1, 2, … 5*-го порядка как разность отсчетов их положений слева и справа от центрального максимума. По формуле (6) рассчитать для каждого из пяти измерений длину волны лазерного излучения. Результаты занести в табл. 2.

3. Найти среднее значение длины волны $\langle\lambda\rangle$, доверительный интервал Δ_λ и относительную погрешность E (см. приложение 1).

4. В табл. 3 рассчитать расстояние x_m между минимумами m-го порядка как разность отсчетов их положений слева и справа от центрального максимума. Занести в таблицу рассчитанное по п. 3 среднее значение длины волны $\langle\lambda\rangle$.

5. Толщину тонкой нити b определить двумя способами: измерить по графику $x_m = f(b)$, полученному в п. 1, и рассчитать по формуле (7). Результаты занести в табл. 3.

Результат работы

1. Записать значение длины волны лазерного излучения в виде

$$\lambda = \langle\lambda\rangle \pm \Delta\lambda, \qquad E = \ldots\%.$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип Гюйгенса – Френеля? Почему свет от источника заходит в область геометрической тени за препятствием?

2. Изобразить схему опыта и ход лучей при дифракции на щели.

3. Объяснить дифракционную картину, возникающую при прохождении света через щель.

4. Как изменяется дифракционная картина при увеличении ширины щели, толщины нити?

5. Что будет наблюдаться на экране при падении на щель пучка белого света?

7. Как можно по результатам эксперимента рассчитать ширину интерференционной полосы?

8. Каковы характерные особенности лазерного излучения?

Дополнительная литература

1. Савельев, И.В. Курс физики. Т.2 / И.В. Савельев. М.: Лань, 2008. §35, 39, 47–52.

2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. школа, 2008. §176–179, 233.

Лабораторная работа № 5-5
ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Цели работы: ознакомиться с явлением поляризации света, проверить выполнение законов Малюса и Брюстера.

Приборы и принадлежности: установка для исследования зависимости интенсивности поляризованного света от угла между плоскостями поляризатора и анализатора; установка для исследования поляризации при отражении света.

Введение

Согласно волновой теории свет представляет собой *электромагнитную волну*, т.е. распространяющиеся в пространстве периодически изменяющиеся электрическое и магнитное поля. Световая волна является *поперечной*: векторы напряженности электрического поля $\vec{E}$ и индукции магнитного поля $\vec{B}$ перпендикулярны друг к другу и направлению распространения волны x (рис. 1).

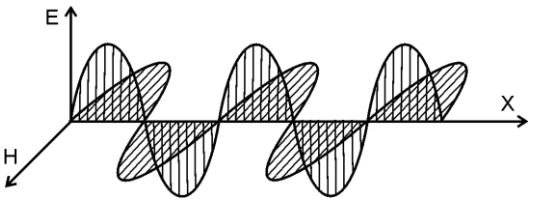
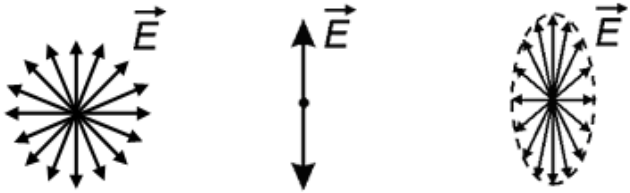


Рис. 1. Моментальная «фотография» плоской электромагнитной волны

Экспериментально было показано, что на сетчатку глаза или фотоэмульсию оказывает действие практически только электрическое поле $\vec{E}$, поэтому при наблюдении и анализе явлений, в которых проявляются волновые свойства света, обычно рассматривают только колебания вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$, который называют ***световым вектором.***

Световая волна представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества независимо излучающих атомов, поэтому все направления колебаний в ней равновероятны. Свет со всевозможными равновероятными ориентациями плоскостей колебаний вектора $\vec{E}$ называется ***естественным*** (рис. 2а).



а б в

Рис. 2. Возможные варианты колебания светового вектора

Свет, в котором вектор $\vec{E}$ колеблется в одной проходящей через световой луч плоскости называется ***плоскополяризованным*** (рис. 2б). Эта плоскость называется ***плоскостью поляризации.*** Если имеется преимущественное направление колебаний вектора $\vec{E}$, то свет называется ***частично поляризованным*** (рис. 2в). На рис. 2а, 2б и 2в направление распространения света (направление светового луча) перпендикулярно к плоскости рисунка.

Получить плоскополяризованный свет из естественного можно с помощью устройства, называемого ***поляризатором.*** Это устройство способно свободно пропускать колебания вектора $\vec{E}$ параллельно плоскости, которую называют ***плоскостью пропускания поляризатора***, и задерживать колебания, перпендикулярные к этой плоскости.

Глаз не может отличить поляризованный свет от естественного. Это можно сделать при помощи любого поляризатора, называемого в данном случае ***анализатором.*** Если пропустить частично поляризованный свет через анализатор, то при вращении устройства вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет изменяться в пределах от J_{max} до J_{min}, причем переход от J_{max} до J_{min} совершается при повороте на угол, равный $\pi/2$.

Если пропустить через анализатор плоскополяризованный свет, то при вращении устройства интенсивность прошедшего света будет изменяться в пределах от J_{max} до $J_{min} = 0$.

Если пропустить через анализатор (т.е. поляризатор) естественный свет, то интенсивность прошедшего поляризатор света $J_П$ при вращении устройства не будет изменяться и составит $J_П = ½ J_0$, где J_0 – интенсивность падающего естественного света.

Степень поляризации определяется выражением

$$P = \frac{J_{max} - J_{min}}{J_{max} + J_{min}}.$$

Для плоскополяризованного света ($J_{min} = 0$) степень поляризации $P = 1$.
Для естественного света ($J_{max} = J_{min} = J_{П}$) степень поляризации $P = 0$.

Поляризация света при прохождении через анизотропные среды

В качестве поляризаторов используют среды, анизотропные в отношении колебаний вектора $\vec{E}$. Анизотропные кристаллы обладают свойством *двойного лучепреломления.* Преломляясь в таком кристалле, естественный световой луч разделяется на два пространственно разделенных луча с взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний: в случае одноосного кристалла эти лучи называют *обыкновенным* (*o*) и *необыкновенным* (*e*). Отклоняя один из лучей в сторону, например отражением, можно на выходе из кристалла получить плоскополяризованный свет. Так устроена, например, поляризационная призма Николя (рис. 3). На рисунке направления колебаний светового вектора обозначены точками и двусторонними стрелками: луч *e* поляризован в плоскости рисунка, луч *o* – перпендикулярно плоскости рисунка.

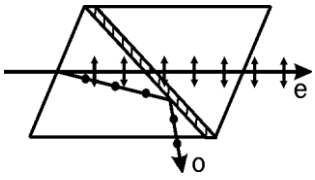


Рис. 3. Поляризационная призма Николя

У некоторых двоякопреломляющих кристаллов (например, у турмалина) коэффициенты поглощения света для двух взаимно перпендикулярных поляризованных лучей отличаются настолько сильно, что уже при небольшой толщине кристалла один из лучей гасится практически полностью. Это явление носит название *дихроизма.* Оно используется для изготовления поляризационных устройств в виде тонких пленок – *поляроидов.*

Закон Малюса

Если на анализатор падает плоскополяризованный свет с амплитудой $E_{П}$, которая составляет угол φ с *плоскостью пропускания анализатора*, то анализатор пропустит составляющую светового колебания, параллельную этой плоскости, с амплитудой E_A (рис. 4):

$$E_A = E_{П} \cos\varphi.$$

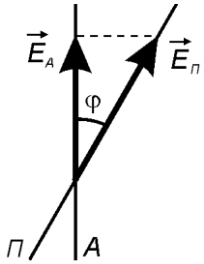


Рис. 4. Схема световых векторов

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды светового вектора, $J \sim E^2$. Отсюда следует, что интенсивность света, прошедшего последовательно через поляризатор и анализатор, пропорциональна квадрату косинуса угла между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора:

$$J_A = J_П \, Cos^2 \varphi \,, \qquad (1)$$

где $J_П$ – интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего поляризатор и падающего на анализатор; J_A – интенсивность света, вышедшего из анализатора.

Соотношение (1) носит название *закона Малюса.*

Поляризация света при отражении от поверхности диэлектрика

Свет, падающий на границу раздела двух прозрачных диэлектриков, испытывает преломление и отражение, причем отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными (рис. 5). В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные к плоскости падения (на рисунке они изображены точками), в преломленном луче – колебания, параллельные плоскости падения (они изображены двусторонними стрелками). Степень поляризации зависит от угла падения.

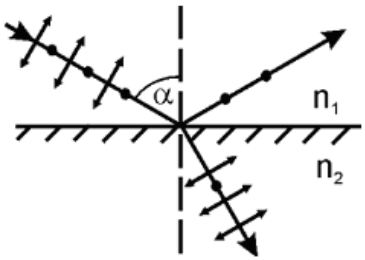


Рис. 5. Поляризация света при отражении от границы диэлектрика

При падении света под *углом Брюстера,* тангенс которого равен относительному показателю преломления второй среды относительно первой,

$$tg\alpha = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \qquad (2)$$

достигается полная поляризация отраженного света, т.е. отраженный луч плоскополяризован. Преломленный луч в этом случае поляризуется максимально, но не полностью. При этом отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны. Соотношение (2) носит название *закона Брюстера.*

Упражнение 1. Проверка закона Малюса

Описание экспериментальной установки и методики измерений

На рис. 6 приведена схема прибора для проверки закона Малюса.

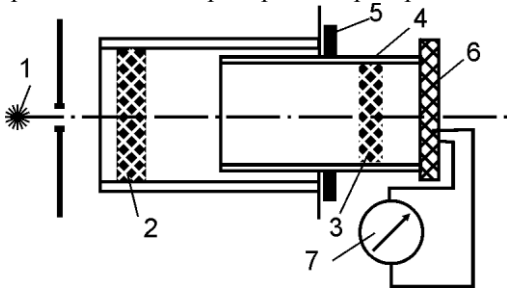


Рис. 6. Схема прибора для проверки закона Малюса

Свет от источника 1 проходит через поляризатор 2 и попадает на анализатор 3, закрепленный в тубусе 4, который может вращаться вокруг оптической оси установки вместе с лимбом 5 (круглая шкала), позволяющим делать отсчет угла поворота анализатора относительно поляризатора. За анализатором располагается фотоэлемент 6. ЭДС, возникающая в фотоэлементе под действием света, измеряется гальванометром 7.

Возникающая в фотоэлементе *ЭДС пропорциональна интенсивности света*, прошедшего через систему поляризатор – анализатор J_A, следовательно, согласно закону Малюса, она должна быть пропорциональна квадрату косинуса угла φ между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора. В экспериментальном подтверждении этой зависимости заключается проверка закона Малюса в данной лабораторной работе.

Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть переменного тока напряжением 220 В лампочку поляризационной установки и гальванометр.

2. Вращая тубус прибора 4, установить угол между плоскостями поляризатора и анализатора 90°.

3. Поворачивая тубус прибора 4 вправо, записать в табл. 1 показания гальванометра u_1 в делениях через каждые 15° угла поворота анализатора в пределах от 90° до 0°. Измерения повторить еще два раза. Показания гальванометра u_2 , u_3 в делениях записать в табл. 1.

4. Поворачивая тубус прибора 4 в противоположную сторону, записать в табл. 1 показания гальванометра u_4 в делениях через каждые 15° угла поворота анализатора в пределах от 90° до 180°. Измерения повторить еще два раза. Показания гальванометра u_5 , u_6 в делениях записать в табл. 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента 1

Отсчет угла по лимбу при повороте анализатора вправо		90°	75°	60°	45°	30°	15°	0°
Показания гальванометра, *дел*	u_1							
	u_2							
	u_3							
Отсчет угла по лимбу при повороте анализатора влево		90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
Показания гальванометра, *дел*	u_4							
	u_5							
	u_6							

Угол между плоскостями поляризатора и анализатора φ	90°	75°	60°	45°	30°	15°	0°
$\cos\varphi$							
$\cos^2\varphi$							
Показания гальванометра средн., *дел* $\langle u \rangle$							

Обработка результатов эксперимента

1. Для каждого значения угла φ в табл. 1 вычислить $\cos\varphi$ и $\cos^2\varphi$, а также среднее значение показаний гальванометра $\langle u \rangle$.

2. Для проверки закона Малюса построить график зависимости $\langle u \rangle$ от $\cos^2\varphi$.

Упражнение 2. **Проверка закона Брюстера**

Описание экспериментальной установки и методики измерений

На рис. 7 приведена схема прибора для проверки закона Брюстера.

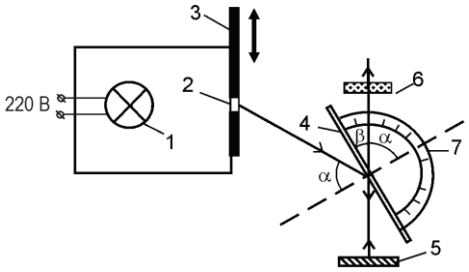


Рис. 7. Схема прибора для проверки закона Брюстера

Свет от электрической лампочки 1 проходит через отверстие 2 в стенке осветителя 3 и падает на стеклянную пластинку 4, которая является поляризатором. Отраженный от пластинки поляризованный свет падает на зеркальце 5, которое отражает луч и направляет его в глаз наблюдателя (вверх). На пути луча ставится анализатор 6. Если свет частично поляризован, то при

вращении анализатора вокруг направления светового луча интенсивность будет изменяться от J_{max} до J_{min}. Для полностью поляризованного света $J_{min} = 0$. Переход от J_{max} до J_{min} совершается при повороте анализатора на угол, равный $\pi/2$.

Угол падения луча на поляризатор 4 можно менять, поворачивая стеклянную пластинку 4 и одновременно сдвигая стенку осветителя 3 с отверстием по вертикали так, чтобы пучок света из отверстия 2 попадал в центр зеркальца 5. Угол падения света α на поляризатор 4 измеряют по транспортиру 7, прикрепленному к стеклянной пластинке.

Наблюдая отраженный свет через анализатор, можно подобрать такой угол падения α на стеклянную пластинку, при котором наступает полная поляризация отраженного луча, т.е. определить угол Брюстера. Тогда по формуле (2), считая показатель преломления первой среды – воздуха – равным единице, можно вычислить показатель преломления второй среды – стекла – как

$$n = tg\alpha\,. \qquad (3)$$

Порядок выполнения работы

1. Установить систему поляризатор – анализатор как можно ближе к отверстию 2 в стенке 3.

2. Визируя глазом через анализатор нижнее зеркальце, повернуть стеклянную пластинку так (см. рис. 7), чтобы свет от осветителя попадал на зеркальце, а изображение отверстия совпадало с центром зеркальца.

3. Вращая анализатор 6, добиться максимального затемнения поля зрения.

4. Перемещая стенку 3 осветителя по вертикали и одновременно поворачивая стеклянную пластинку 4, удерживая тем самым изображение отверстия 2 в центре зеркальца, добиться полного затемнения поля зрения.

5. При этом положении стеклянной пластинки произвести по транспортиру отсчет угла β_1 (рис. 7) и записать его в табл. 2.

6. Сбить настройку, произвольно повернув стеклянную пластинку 4 и сдвинув стенку 3. Повторить измерения (п. 2 – п. 5) еще два раза. Отсчет углов β_2, β_3 записать в табл. 2.

Таблица 2. Результаты эксперимента 2

Отсчет угла по транспортиру (*в градусах*)				Угол Брюстера (*в градусах*)	Показатель преломления стекла		*E*, %
β_1	β_2	β_3	$<\beta>$	α	$n = tg\alpha$	$n_{таб}$	

Обработка результатов эксперимента

1. В табл. 2 вычислить среднее значение отсчета по транспортиру $<\beta>$ и угол падения света $\alpha = 90° - <\beta>$, для которого наблюдается полная поляризация отраженного луча (угол Брюстера).

2. Для проверки закона Брюстера вычислить по формуле (3) показатель преломления стекла n и сравнить его с табличным значением $n_{таб.}$, рассчитав относительную погрешность

$$E = \frac{|n - n_{таб}|}{n_{таб}} \cdot 100\%.$$

Результаты работы

1. Сделать вывод о выполнении закона Малюса.
2. Сделать вывод о выполнении закона Брюстера.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит отличие естественного света от поляризованного? Какой свет называется плоскополяризованным?
2. Какое свойство световых волн подтверждает явление поляризации света?
3. Какими способами можно получить поляризованный свет из естественного?
4. Как практически отличить плоскополяризованный и частично поляризованный свет от естественного?
5. Что такое степень поляризации света?
6. В чем суть закона Малюса?
7. Интенсивность естественного света, прошедшего последовательно через поляризатор и анализатор, уменьшилась в четыре раза. Чему равен угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора?
8. В чем состоит явление двойного лучепреломления?
9. Как объяснить явление поляризации света при отражении от диэлектрика?
10. В чем суть закона Брюстера? Чем замечателен угол Брюстера?
11. Какова степень поляризации отраженного луча, если угол падения светового луча на границу раздела двух диэлектриков равен углу Брюстера?

Дополнительная литература

1. Савельев, И.В. Курс физики. Т.2 / И.В. Савельев. М.: Лань, 2008. §35, 39, 47–52.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова М.: Высш. школа, 2008. §190–193.

Лабораторная работа № 5-9

ИЗУЧЕНИЕ ЛИНЕЙЧАТЫХ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СТИЛОСКОПА

Цель работы: ознакомление с явлением дисперсии света, со спектрами испускания; градуировка стилоскопа и определение длин волн спектральных линий.

Приборы и принадлежности: стилоскоп, ртутная лампа, определяемый источник света (неоновая лампа).

Введение. Дисперсия света

Практически все прозрачные среды являются диэлектриками. Из уравнений Максвелла следует, что скорость распространения электромагнитных волн в среде зависит от диэлектрических свойств среды и

$$\upsilon = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}},$$

где c – скорость световой волны в вакууме, ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Показателем преломления среды (вещества) n называется отношение скорости световой волны в вакууме к фазовой скорости υ в этой среде:

$$n = \frac{c}{\upsilon}.$$

Таким образом, показатель преломления волн в среде также зависит от диэлектрических свойств среды и

$$n = \sqrt{\varepsilon}.$$

Дисперсией света называют явление зависимости фазовой скорости света в среде и показателя преломления от частоты или длины волны света. Эта зависимость объясняется на основе электромагнитной теории и электронной теории вещества как результат взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами вещества. Дисперсия присуща всем средам, кроме абсолютного вакуума, при этом различные диэлектрики обладают различной дисперсией.

Диэлектрическая проницаемость ε обусловлена поляризацией диэлектрика, то есть смещением заряженных частиц внутри атома и молекул. Под действием переменного электрического поля световой волны заряды в диэлектрике (например, электроны в атомах и молекулах) совершают вынужденные колебания. Так как атомы и молекулы обладают собственными частотами колебаний, то амплитуды и фазы вынужденных колебаний электронов зависят от частоты переменного электрического поля световой волны. Особенно сильную зависимость следует ожидать в тех случаях, когда частота внешнего поля близка к одной из собственных частот атомов и молекул (ре-

зонанс). Совершающие колебания электроны излучают вторичные волны, отстающие по фазе от первичных. Складываясь с первичными волнами, они меняют их фазовую скорость, а значит, и показатель преломления. Чем ближе частота пришедшей волны к собственной частоте электронов, тем больше амплитуда колебаний и изменение показателя преломления.

Электронная теория дисперсии позволяет получить аналитическую зависимость показателя преломления от частоты $n = f(\nu)$ (или от длины световой волны $n = f(\lambda)$, так как между частотой и длиной волны существует соотношение $\nu = \upsilon/\lambda$). Примерное графическое выражение этой зависимости приведено на рис. 1. Участки кривой 1–2 и 3–4 соответствуют так называемой нормальной дисперсии, а участок 2–3 – аномальной дисперсии.

Величину

$$D = dn/d\lambda,$$

характеризующую быстроту изменения показателя преломления с изменением длины волны, называют ***дисперсией вещества***. При ***нормальной дисперсии*** $(dn/d\lambda) < 0$, то есть показатель преломления убывает с увеличением λ, а при ***аномальной дисперсии,*** для которой $(dn/d\lambda) > 0$, с увеличением λ показатель преломления возрастает.

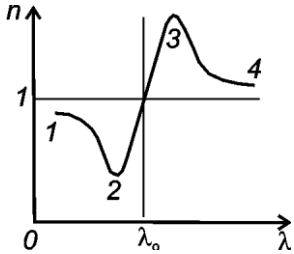


Рис. 1. Зависимость показателя преломления от длины волны

Участки аномальной дисперсии наблюдаются в области резонансного поглощения, когда частота падающего света ν_i приближается к частоте собственных колебаний ν_0 электрических зарядов в веществе (соответственно $\lambda = \lambda_0$).

Для всех прозрачных бесцветных веществ в видимой области спектра дисперсия является нормальной (участок 3–4). На явлении нормальной дисперсии основано действие призменных спектроскопов, применяемых для спектрального анализа. Основная деталь таких спектроскопов – стеклянная призма – является диспергирующей системой: она разлагает исследуемый свет в спектр по длинам волн. Это свойство призмы обусловлено тем, что вследствие зависимости показателя преломления стекла, из которого изготовлена призма, от длины волны света свет разных длин волн, проходя через призму, отклоняется на разные углы. При этом свет с большей длиной волны отклоняется на меньший угол: например, фиолетовые лучи отклоняются от первоначального направления сильнее, чем красные.

Спектры излучения

По классической теории причиной излучения света является движение заряженных частиц в атомах и молекулах вещества: излучение возникает при колебательном движении электрических зарядов. По квантовой теории излучение и поглощение света происходит вследствие изменения энергетического состояния заряженных частиц.

Хаотическое тепловое движение частиц происходит всегда (вплоть до температуры абсолютного нуля), поэтому все тела излучают электромагнитные волны. При низких температурах тепловое излучение происходит в длинноволновой инфракрасной части спектра, а при высоких – в видимой и ультрафиолетовой частях спектров.

Спектры испускания бывают трех видов: линейчатые, полосатые и сплошные (непрерывные). Пары металлов и газы в атомарном состоянии испускают *линейчатый спектр.* Возбужденные молекулы испускают серии очень близких линий, которые группируются на отдельных участках спектра в полосы – *полосатый спектр*. Твердые и жидкие тела испускают *сплошной спектр.*

Рассмотрим подробнее механизм возникновения линейчатого спектра испускания. Элементарное объяснение происхождения линейчатых спектров построено на квантовых постулатах Бора, содержание которых сводится к следующему.

1. Атом может находиться только в некоторых «разрешенных» *стационарных состояниях*, в которых он не излучает энергии: эти состояния характеризуются определенными значениями энергии, образующими дискретный ряд $E_1, E_2,\ldots,E_n$.

2. При переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое с энергией E_m излучается или поглощается квант света (фотон), частота которого определяется уравнением

$$h\nu = E_n - E_m,$$

где $h = 6{,}626\cdot10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Поглощая энергию, атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией; при переходе из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией происходит излучение фотона. Бесконечно долго каждый атом может находиться лишь в стационарном состоянии с минимальной энергией E_1, которое называется *основным состоянием*. Остальные стационарные состояния с энергиями E_2, $E_3\ldots$, E_n называются *возбужденными.* Пребывание атомов в возбужденном состоянии длится всего около 10^{-8} с.

На рис. 2 показана для примера энергетическая диаграмма простейшего атома – атома водорода, содержащего всего один электрон. На диаграмме каждое стационарное состояние электрона в атоме (уровень энергии) отмечается горизонтальной линией и определяется значением квантового числа n, принимающего целочисленные значения: $n = 1, 2, 3\ldots$. Ниже всех находится основной уровень $n = 1$, энергия которого равна $E_1 = -13{,}6$ эВ.

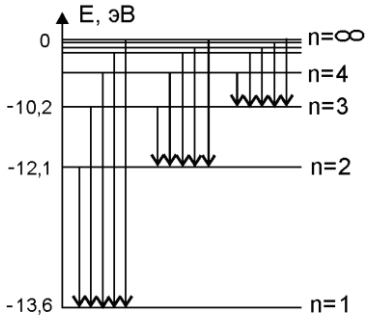


Рис. 2. Энергетическая диаграмма

Возбужденному уровню $n = 2$ соответствует энергия $E_2 = -3{,}4$ эВ, третьему уровню – $E_3 = -1{,}5$ эВ и т.д. При $n \to \infty$ энергия $E_n \to 0$. Если атом получил энергии больше, чем 13,6 эВ, то электрон преодолевает притяжение ядра и происходит ионизация атома.

Переходам с верхних уровней: $n = 2, 3, 4, \ldots$ на основной уровень $n = 1$ соответствует система спектральных линий, лежащая в ультрафиолетовой части спектра водорода (серия Лаймана). Переходам с верхних уровней: $n = 3, 4, 5, \ldots$ на уровень $n = 2$ соответствует видимая часть спектра водорода (серия Бальмера), а переходам с уровней: $n = 4, 5, 6, \ldots$ на уровень $n = 3$ – инфракрасные лучи спектра водорода (серия Пашена).

Более сложные атомы имеют, естественно, и более сложную систему энергетических уровней. В зависимости от структуры энергетических уровней каждый химический элемент дает характерный только для него спектр, что позволяет по виду спектра определить присутствие данного элемента, т.е производить *качественный спектральный анализ.*

Линии в спектре данного элемента имеют разную интенсивность. Измерение интенсивности спектральных линий позволяет применить спектральный метод и для *количественного анализа.*

Вид линейчатого спектра не зависит от способа возбуждения атома. В плазме пламени, электрической дуги, искрового разряда или тлеющего разряда в газоразрядной трубке атом получает энергию, и происходит переход внешних (иначе называемых валентными или оптическими) электронов атома на высшие энергетические уровни. Процесс возвращения электронов с высоких энергетических уровней на более низкие сопровождается испусканием света.

Описание экспериментальной установки

Стилоскоп – это одна из разновидностей спектроскопа, оптический прибор, с помощью которого можно изучать спектры испускания веществ. В частности, он широко применяется для определения состава сталей путем наблюдения искрового разряда (отсюда его название).

Прибор (рис. 3) состоит из коллиматора 1, призмы 2 и зрительной трубы 3. Чтобы наблюдать спектр испускания, нужно направить на коллиматорную щель спектроскопа 4 свет, идущий от источника S. Луч света, пройдя щель, попадает на линзу 5. Так как щель коллиматора находится в фокусе линзы, то после линзы лучи света пойдут далее параллельным пучком. В призме вследствие явления дисперсии света белый свет, преломляясь, распадается на цветные пучки лучей. Все лучи с одинаковой длиной волны выйдут

из призмы параллельно друг другу и соберутся линзой 6 в одну точку, которая лежит в фокальной плоскости линзы-окуляра 7. В поле зрения окуляра 7 будет видна спектральная полоска, если спектр сплошной, или система цветных линий, если спектр излучения линейчатый.

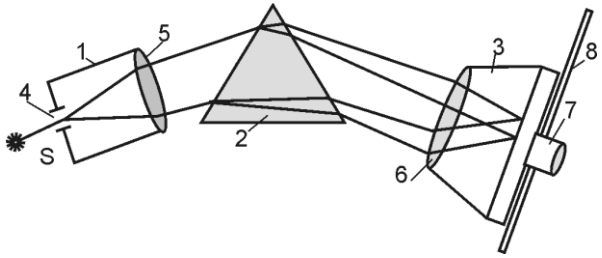


Рис. 3. Стилоскоп

Окуляр 7 жестко связан со шкалой 8 и перемещается так, что визирный указатель окуляра 9 (рис. 4) может быть совмещен с любой линией спектра. По шкале 8, напротив указателя 10, можно снять отсчет положения этой спектральной линии, что позволяет установить соответствие между показаниями отсчетного устройства и длиной волны визируемой линии, т.е. проградуировать спектроскоп.

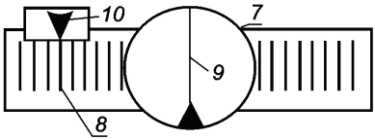


Рис. 4. Шкала отсчета

Важнейшей характеристикой качества спектроскопа является *линейная дисперсия* D_λ. Она характеризует расстояние по шкале прибора ΔN между спектральными линиями, отличающимися по длинам волн на $\Delta\lambda$:

$$D_\lambda = \Delta N / \Delta\lambda, \text{ (дел/нм)}.$$

Линейная дисперсия прибора зависит от угла падения лучей от источника света на призму, длины световой волны, вещества, из которого сделана призма, и фокусного расстояния линзы 7. Используемый в данной работе стилоскоп имеет три призмы вместо одной, что способствует увеличению линейной дисперсии.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Градуировка стилоскопа

Градуировка стилоскопа производится с помощью линейчатого спектра, длины волн которого известны, – спектра ртути.

1. Включить в сеть источник света – ртутную лампу.

Внимание! Этот пункт выполняется лаборантом или преподавателем.

2. Установить стилоскоп на столе таким образом, чтобы свет от источника (ртутной лампы) падал на щель 4 коллиматора (см. рис. 3).

3. Фокусировкой окуляра 7 добиться отчетливой видимости спек-

тральных линий. Передвигая окуляр влево и вправо, изучите расположение цветных линий в спектре, сопоставляя их с таблицей основных спектральных линий паров ртути (табл. 1).

4. Совмещая визир 9 окуляра с линиями в спектре, снять отсчеты N_1 их положения по шкале 8 прибора против указателя 10 (см. рис. 4). Значения N_1 занести в табл. 1.

5. Повторить измерения еще два раза. Значения N_2 и N_3 занести в табл. 1.

Таблица 1. Результаты эксперимента 1

№ п/п	Цвет наблюдаемой линии	Длина волны λ, нм	Отсчет по шкале			
			N_1	N_2	N_3	<N>
1	Красная (очень слабая)	623				
2	Желтая	578				
3	Желтая	579				
4	Зеленая (очень яркая)	546				
5	Голубая (слабая)	492				
6	Синяя	436				
7	Фиолетовая (яркая)	408				
8	Фиолетовая (слабая)	405				

Упражнение 2. Определение длин волн, наблюдаемых в спектре газа

1. Поместить новый источник света (неоновую лампу) перед щелью 4 коллиматора (см. рис. 3). Включить лампу.

2. Согласно пп. 3 и 4 упражнения 1 снять отсчеты N_1 положения для 4…5 наиболее ярких линий спектра. Полученные значения записать в табл. 2.

3. Повторить измерения еще два раза. Значения N_2 и N_3 занести в табл. 2.

Таблица 2. Результаты эксперимента 2

№ п/п	Цвет наблюдаемой линии	Отсчет по шкале				Длина волны		E, %
		N_1	N_2	N_3	<N>	по графику, λ, нм	из таблиц, $\lambda_{таб}$, нм	
1								
2								
…								

Обработка результатов эксперимента

1. В табл. 1 и 2 рассчитать для каждой линии спектра среднее значение отсчета <N>.

2. Построить по данным табл. 1 градуировочный график стилоскопа, откладывая по оси абсцисс длины волн λ, а по оси ординат – соответ-

ствующие средние значения отсчетов <*N*>.

3. Используя построенный градуировочный график, определить по средним значениям отсчетов <*N*> в табл. 2 длины волн, излучаемые исследуемым газом (неоном). Полученные значения записать в табл. 2.

4. В табл. 2 записать значения длин волн наиболее ярких линий неона из приложения 4. Сравнить табличные значения длин волн $\lambda_{таб}$ с полученными в опыте значениями λ и убедиться в том, что исследуемый газ действительно неон. Оценить величину ошибки при измерении длин волн с помощью стилоскопа:

$$E = \frac{\left|\lambda - \lambda_{таб}\right|}{\lambda_{таб}} \cdot 100\%$$

Полученные значения E записать в табл. 2.

5. Определить линейную дисперсию стилоскопа D_λ по тангенсу угла наклона касательной к зависимости $N(\lambda)$. Для этого выбрать на линии градуировочного графика 4…5 точек, определить для этих точек значение длины волны λ_i (где i – номер точки), и в каждой точке на глаз построить касательную к линии графика. Построить вспомогательные прямоугольные треугольники с гипотенузами, лежащими на построенных касательных. Для каждой касательной, определив в масштабе графика размеры катетов ΔN_i и $\Delta\lambda_i$, рассчитать тангенс угла наклона $tg\ \alpha_i = \Delta N_i / \Delta\lambda_i = D_{\lambda,\,i}$. Результаты записать в табл. 3.

Таблица 3. Линейная дисперсия стилоскопа

№	λ_i, *нм*	ΔN_i	$\Delta\lambda_i$	$D_{\lambda,\,i} = \Delta N_i / \Delta\lambda_i$
1				
2				
…				

6. По полученным значениям $D_{\lambda,\,i}$ и λ_i построить график зависимости линейной дисперсии спектроскопа D_λ от длины волны λ.

Результат работы

Сформулировать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл показателя преломления?
2. В чем заключается явление дисперсии света?
3. Какая величина является мерой дисперсии?
4. Можно ли наблюдать дисперсию света в вакууме?
5. Какая дисперсия называется нормальной, аномальной?
6. Какие вещества дают линейчатые, полосатые и сплошные спектры?
7. Объяснить устройство спектроскопа. Начертить ход лучей в спектроскопе.
8. Какая величина называется линейной дисперсией спектроскопа? От чего зависит линейная дисперсия?

9. Каким образом осуществляется спектральный анализ? Как применить стилоскоп для определения состава стали?

Дополнительная литература

1. Савельев, И.В. Курс физики. Т.2 / И.В. Савельев. М.: Лань, 2008. §102.

2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. школа, 2008. §185, 186, 209, 210, 212, 231.

Приложения

Приложение 1

Расчет ошибки эксперимента

Пусть в результате эксперимента получено n значений измеряемой величины u: $u_1, u_2,...u_i,\ldots,u_n$.

Расчет ошибки эксперимента включает в себя этапы:

1. Рассчитывается среднее значение измеряемой величины:

$$< u > = \frac{\Sigma u_i}{n} = \frac{u_1 + u_2 + \ldots u_i + \ldots u_n}{n} .$$

2. Рассчитывается абсолютная погрешность каждого результата:

$$\Delta u_i = \left| u_i - < u > \right| .$$

3. Рассчитываются квадраты абсолютных погрешностей Δu_i^2 и находится их сумма:

$$\Sigma(\Delta u_i)^2 = \Sigma(u_i - < u >)^2 .$$

4. Рассчитывается доверительный интервал

$$\Delta_u = t_{\alpha,n} \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta u_i)^2}{n(n-1)}} ,$$

где $t_{\alpha,n}$ – коэффициент Стьюдента, значение которого определяется по таблице в зависимости от числа значений n и доверительной вероятности α. Чем выше вероятность α, тем больше будет доверительный интервал. Рекомендуется брать α = 0,95.

α	n												
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,70	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,95	4,3	3,2	2,8	2,6	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1
0,99	9,9	5,8	4,6	4,0	3,7	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0	3,0

5. Рассчитывается относительная погрешность результата

$$E = \frac{\Delta_u}{< u >} \cdot 100\%.$$

Результат работы представляется в виде

$$u = <u> \pm \Delta_u, \qquad E = \ldots \%.$$

Приложение 2

Основные физические постоянные

Скорость света в вакууме – c = 299 792 458 *м/с* ≈ $3 \cdot 10^8$ *м/с*;
Постоянная Планка – $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;
Электрическая постоянная – $\varepsilon_o = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ *Ф/м*;
Магнитная постоянная – $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *Гн/м;*
Элементарный заряд – $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *Кл.*
Электрон-вольт – $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *Дж.*

Приложение 3

Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

Множитель	Приставки	
	Наименование	Обозначение
10^9	гига	Г
10^6	мега	М
10^3	кило	к
10^2	гекто	г
10^1	дека	да

Множитель	Приставки	
	Наименование	Обозначение
10^{-1}	деци	д
10^{-2}	санти	с
10^{-3}	милли	м
10^{-6}	микро	мк
10^{-9}	нано	н
10^{-12}	пико	п
10^{-15}	фемто	ф

Приложение 4

Значение длин волн основных спектральных линий неона

Цвет линии	Длина волны, λ, *нм*
Красная яркая	640
Красно-оранжевая	614
желтая яркая	594
светло-зеленая	576

Значение длин волн основных линий в спектре ртути

Цвет линии	Длина волны, λ, *нм*
Красная (очень слабая)	623
Желтая	578
Желтая	579
Зеленая (очень яркая)	546
Голубая (слабая)	492
Синяя	436
Фиолетовая (яркая)	408
Фиолетовая (слабая)	405

Физический практикум

Часть 3

Методические указания
к лабораторным работам по волновой оптике

Составители: В.М. Алексеев, А.Н. Болотов, А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, А.В. Мишина, Ю.И. Морозова, В.Е. Никишин, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.В. Новоселова.

Под редакцией В.М. Алексеева

Корректор Т.С. Самборская
Технический редактор А.Н. Безрукова

Подписано в печать
Формат 60x84 /16 Бумага писчая
Физ. печ. л. Усл. печ. л. Уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. Заказ №

Редакционно-издательский центр ТвГТУ
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22