Государственный комитет Российской Федерации
по высшему образованию

Российский государственный гидрометеорологический институт

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

Оптика и ядерная физика

Курс II

Санкт-Петербург
1994

Российский государственный
гидрометеорологический
институт
БИБЛИОТЕКА
195196, СПб, Малоохтинский пр., 98

УДК 551.46(075.8)

Лабораторный практикум по физике. Оптика и ядерная физика. СПб, РГГМИ, 1994. - 115 с.

Лабораторный практикум содержит описание 15 лабораторных работ по разделам "Оптика" и "Ядерная физика" курса общей физики.

Практикум предназначен для студентов второго курса океанологического, гидрологического, метеорологического факультетов РГГМИ.

Одобрено методической комиссией РГГМИ.

Составители: В.Г.Сирота, И.В.Недзвецкая, Т.Ю.Яковлева, Н.В.Дьяченко, П.П.Хлябич, С.С.Тибилов, М.М.Белов, А.Л.Скобликова.

Ответственный за выпуск: П.П.Хлябич.

Ответственный редактор: А.П.Бобровский.

© Российский государственный гидрометеорологический институт (РГГМИ), 1994.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторные работы данного практикума студенты должны выполнять в Ш и IУ семестрах.

Каждая работа рассчитана на два академических часа. Студент допускается к выполнению лабораторной работы после самостоятельного домашнего изучения необходимых сведений из теории, ознакомления с существом и порядком выполнения основных операций и только при наличии должным образом оформленного рабочего журнала. Выполнив измерения и произведя необходимые расчеты, студент заполняет бланки отчета, который представляет преподавателю. При этом студент должен показать понимание физического содержания проведенных измерений и дать оценку их достоверности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 301

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

I. Задача работы

Определение радиуса кривизны линзы.

2. Предварительные сведения

С точки зрения волновой теории свет – это электромагнитная волна, т.е. электромагнитное поле, распространяющееся в вакууме со скоростью $c = 3.10^8$ м/с. Электромагнитное поле характеризуется векторами напряженности электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей. Эти векторы колеблются по синусоидальному закону перпендикулярно друг другу и перпендикулярно вектору скорости $\vec{c}$.

Интерференция света – это сложение когерентных волн, в результате которого происходит уменьшение или увеличение амплитуды результирующего колебания, а следовательно, усиление или ослабление интенсивности света.

Пусть две волны распространяются в одном направлении, причем частота (период колебаний) и амплитуда одинаковые. Тогда

$$x_1 = A \sin \omega \left(t - \frac{y_1}{c}\right) = A \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{y_1}{c}\right) = A \sin \frac{2\pi}{\lambda}(c\,t - y_1),$$

$$x_2 = A \sin \omega \left(t - \frac{y_2}{c}\right) = A \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{y_2}{c}\right) = A \sin \frac{2\pi}{\lambda}(c\,t - y_2),$$

где x_1 и x_2 – мгновенные значения колеблющейся величины (это может быть вектор $\vec{E}$ или вектор $\vec{H}$); A – амплитуда; ω – циклическая частота ($\omega = \frac{2\pi}{T}$); t – время; y_1 и y_2 – пути, пройденные волнами к моменту времени t; c – скорость распространения волн; $\lambda = T \cdot c$ – длина волны.

Если пути, пройденные волнами, мало отличаются, то можно считать, что их разность $\Delta = y_2 - y_1$, называемая разностью хода, мала по сравнению с $y = (y_1 + y_2)/2$.

Разность хода может возникнуть даже, если лучи проходят один и тот же геометрический путь ℓ. Дело в том, что для световых лучей характерен оптический путь. Оптическим путем называется произведение геометрического пути на показатель преломления $y = \ell \times n$. В этом случае разность хода будет равна: $\Delta = \ell_2 \times n_2 - \ell_1 \times n_1$. В частном случае для вакуума $n_1 = n_2 = 1$,

$\Delta = \ell_2 - \ell_1$.

Если волны встречаются, то они складываются, интерферируют:

$$x = x_1 + x_2 = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (C t - y_1) + A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (C t - y_2) =$$

$$= 2A \cos \frac{\pi\Delta}{\lambda} * \sin \frac{2\pi}{\lambda} (C t - y).$$

Результирующая волна, как и интерферирующие волны, синусоидальна, но имеет новую амплитуду $A_{рез}$, зависящую от разности хода Δ :

$$A_{рез.} = 2A \cos \frac{\pi\Delta}{\lambda} .$$

Световая энергия, проходящая в единицу времени через единицу площади, называется интенсивностью света. Энергия колебаний пропорциональна квадрату амплитуды, следовательно, интенсивность света от двух пространственно разделенных источников зависит от разности хода лучей Δ , а именно, интенсивность будет максимальная, когда $\cos^2 \pi\Delta/\lambda = 1$, и равна нулю, когда $\cos^2 \pi\Delta/\lambda = 0$. Иначе говоря, можно сформулировать условия максимума и минимума при интерференции волн.

Условие максимума - разность хода равна четному числу полуволн:

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2} \quad , \text{где } k = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Условие минимума - разность хода равна нечетному числу полуволн:

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad , \text{где } k = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Устойчивую интерференционную картину могут дать только когерентные волны, т.е. такие, частоты колебаний которых одинаковы, а разность фаз сохраняется постоянной в течение времени наблюдений.

Все искусственные и естественные источники света (за исключением лазеров) излучают некогерентные волны.

В целях практического получения когерентных волн надо сконструировать установку, в которой луч от одного источника разделится на два интерферирующих когерентных луча. Принцип получения когерентных волн разделением на две части одного луча может быть практически осуществлен различными способами: с помощью экранов, щелей, зеркал, преломляющих и отражающих тел.

3. Метод исследования и описание установки

В предлагаемой работе интерферируют волны, отраженные от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора, образованного выпуклой поверхностью линзы малой кривизны, соприкасающейся с плоской поверхностью хорошо отполированной пластины. Этот зазор постепенно утолщается от точки их соприкосновения к краям (рис. I).

На плоскую поверхность линзы падает перпендикулярно пучок параллельных лучей монохроматического света. Часть света отражается от верхней поверхности АС воздушного зазора, часть - от нижней поверхности ВС. Ввиду весьма малой кривизны линзы можно считать, что угол падения, а следовательно, и угол преломления в точке А равны нулю, тогда оптическая разность хода интерферирующих лучей, отраженных в точке А и в точке В, будет

$$\Delta = 2 d n + \frac{\lambda}{2},$$

где d - толщина воздушного зазора; n - показатель преломления воздуха.

Второй член суммы ($\frac{\lambda}{2}$) появляется потому, что в точке В свет отражается от оптически более плотной среды (стекло), и это приводит к изменению фазы колебания на противоположную - "потере полуволны". Следовательно, для интерферирующих лучей в этом случае условия максимума и минимума будут соответственно иметь вид:

$$2 d n + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}, \qquad (I)$$

$$2 d n + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \qquad (2)$$

где $k = 0, I, 2, 3, \ldots$

Если для лучей, отражающихся около точки С (см. рис. I), толщина воздушной прослойки мала по сравнению с длиной световой волны, то разность хода определяется только потерей полуволны, которая появилась при отражении от нижней границы прослойки, следовательно, для этих лучей $\Delta = \lambda/2$, т.е. разность хода равна нечетному числу $\lambda/2$. Поэтому вблизи точки С наблюдается темное пятно. По мере удаления к краям линзы с увеличением толщины воздушного слоя растет и разность хода интерферирующих лучей, причем места, соответствующие одинаковой толщине слоя d, располагаются на одинаковом расстоянии от точки С, чем и объясняется чередование света и темноты в виде концентрических свет-

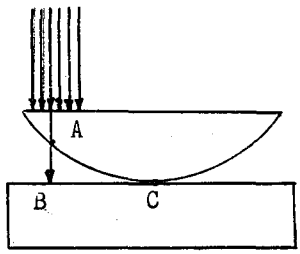


Рис. I.

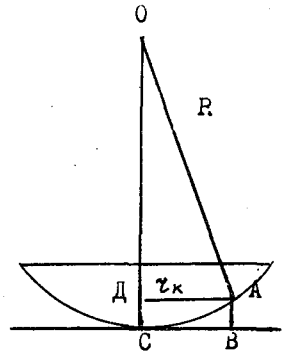


Рис. 2.

лых и темных колец, называемых кольцами Ньютона.

Получим соотношение между радиусом кривизны линзы и радиусом произвольного кольца Ньютона r_k. На рис. 2 $OA = OC = R$ – радиус кривизны линзы; $АД = r_k$ – радиус наблюдаемого кольца Ньютона; $АВ = ДС = d$ – толщина воздушного слоя, соответствующего наблюдаемому кольцу.

Из треугольника АОД по теореме Пифагора имеем:

$$r_k^2 = R^2 - (R - d)^2 = R^2 - R^2 + 2Rd - d^2 \approx 2Rd \qquad (d \ll R) \tag{3}$$

отсюда

$$d = \frac{r_k^2}{2R}. \tag{4}$$

В реальных условиях поверхности АС и ВС не являются идеально гладкими. В результате шероховатости, сравнимой с длиной световой волны, между этими поверхностями в точке С появляется воздушный зазор δ (рис. 3), а в месте наблюдения k-того темного кольца он будет равен $h = d + \delta$.

Используя формулу (4), получаем

$$h_k = \frac{r_k^2}{2R} + \delta. \tag{5}$$

С учетом потери $\lambda/2$ при отражении от ВС условие минимума для k-того темного кольца Ньютона запишется в виде:

$$2h_k + \lambda/2 = k\lambda + \lambda/2 \qquad \text{или} \qquad 2h_k = k\lambda. \tag{6}$$

Из (5) и (6) следует:

$$\frac{r_k^2}{R} + 2\delta = k\lambda \quad \text{или} \quad r_k^2 = kR\lambda - 2\delta R, \tag{7}$$

а для диаметра k-того темного кольца

$$D_k^2 = k(4R\lambda) - 8\delta R. \tag{8}$$

Таким образом, зависимость D_k^2 от k (номера кольца) является линейной с угловым коэффициентом $\alpha = 4R\lambda$.

Значит,

$$R = \frac{a}{4\lambda}. \tag{9}$$

Формула (9) является расчетной для вычисления радиуса кривизны линзы. Величина "а" определяется из графика зависимости D_k^2 от k.

Плосковыпуклую линзу, положенную выпуклой стороной на плоскопараллельную пластину и плотно к ней прижатую, помещают на столик микроскопа (рис. 4), который может перемещаться в горизонтальной плоскости. Над системой "линза-пластинка" укреплено стекло Р, которое может вращаться вокруг горизонтальной оси. Оно служит для направления лучей от источника света на линзу. В качестве источника света использована электрическая лампа L со светофильтром.

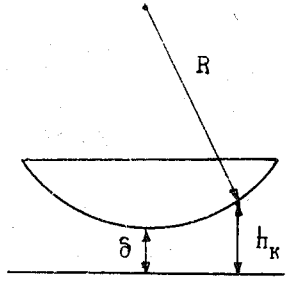


Рис. 3.

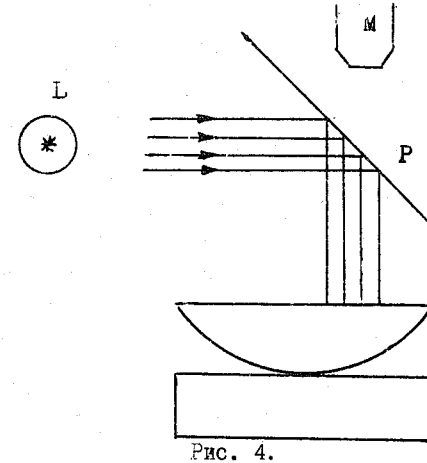


Рис. 4.

4. Порядок выполнения работы

4.I. Добиться наибольшей освещенности поля зрения в микроскопе, поворачивая стекло Р около своей оси.

4.2. Сфокусировать интерференционную картину, медленно перемещая тубус Т микроскопа вверх и вниз.

4.3. Осторожно перемещать линзу с пластинкой до тех пор, пока центральное темное пятно не окажется в центре поля зрения. (Биштрих на шкале микроскопа должен находиться при этом около четвертого деления.)*

4.4. Измерить диаметры первых шести темных колец, учитывая, что кольца Ньютона имеют конечную ширину. Поэтому при измерении диаметра надо устанавливать перекрестие нитей окуляра микроскопа на середину темной полосы соответствующего кольца. Измерение диаметров производить в следующем порядке:

а) установить перекрестие нитей окуляра микроскопа на середину полосы последнего из измеряемых колец, т.е. шестого. Произвести отсчет.

Количество целых делении указывает биштрих. Доли деления отсчитывают по барабану. Например, если биштрих находится между вторым и третьим делениями шкалы, а на барабане отсчитали 38 делений, то отсчет соответствует 3,38 дел. Результат отсчета занести в таблицу в графу А;

б) установить перекрестие нитей на конец диаметра пятого, четвертого и всех последующих колец. Произвести отсчет;

в) перевести нить через центральное темное пятно и подвести ее на середину полосы первого, второго и всех последующих колец. Результаты занести в таблицу в графу В. Запись вести снизу вверх, чтобы она соответствовала номеру измеряемого кольца.

Таблица

Номер кольца	A	B	A – B	D_k	D_k^2	a	R	ΔR
6								
5								
4								
3								
2								
I								

* Биштрих – двойной штрих, перемещающийся вдоль шкалы при вращении барабана.

5. Обработка результатов измерений

5.I. Разность отсчетов (А - В) дает величину диаметра измеряемого кольца D_k. Поделив полученную величину на 4,52 (увеличение микроскопа), получим диаметр D_k в миллиметрах.

5.2. Вычислить D_k^2.

5.3. Построить график зависимости y от x, где $y = D_k^2$, $x = k$ (номер кольца). Из графика вычислить угловой коэффициент "а" (см. пособие по обработке результатов наблюдений, п.7.2, формула (27)).

5.4. Вычислить по формуле (9) радиус кривизны линзы. Значение λ приведено на установке.

6. Контрольные вопросы

6.I. Какие волны называются когерентными?

6.2. Дайте определение явлению интерференции.

6.3. Как меняется длина световой волны при переходе света из вакуума в среду с показателем преломления n?

6.4. Что называется оптической длиной пути, оптической разностью хода лучей?

6.5. В каком случае происходит "потеря" половины длины волны?

6.6. Сформулируйте условия максимума и минимума при интерференции.

6.7. Опишите установку, позволяющую наблюдать кольца Ньютона.

6.8. Чему равна разность хода интерферирующих лучей в предлагаемой работе?

6.9. Почему около точки С (см. рис. I) в отраженном свете наблюдается темное пятно?

7. Список литературы

I. Ландсберг Г.С. Оптика. - М., I952. - §§ I2, 20, 25-27.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М., I978. - Т. 2. - §§ II9-I22.

3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. - М., I965. - Т. 3. - §§ I0-I2.

4. Шубин А.С. Курс общей физики. - М., I976. - Гл. I4, § 3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 302

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

I. Задачи работы

I. Измерение показателя преломления водного раствора $NaCl$ произвольной концентрации.

2. Измерение показателя преломления сильно разбавленной соляной кислоты.

2. Предварительные сведения

В лабораторном интерферометре интерференционная картина получается в результате дифракции параллельного пучка света на двух щелях (диафрагма $\mathcal{D}_2$). Принципиальная схема прибора приведена на рис. I.

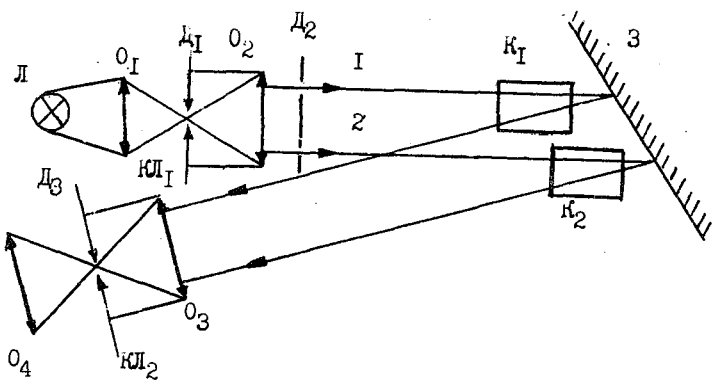


Рис. I.

Входная щель интерферометра (диафрагма $\mathcal{D}_1$) освещается оптической системой, состоящей из электрической лампочки Л и собирающей линзы $О_I$. Диафрагма $\mathcal{D}_1$ находится в фокальной плоскости линзы $О_2$ и образует вместе с ней входной коллиматор $КЛ_I$. Из коллиматора выходит практически параллельный пучок света. Качество интерференционной картины определяется шириной щели $\mathcal{D}_1$ и выбирается та-

ким образом, чтобы фронт световой волны, выходящей из щели, был близок к сферической поверхности. Параллельный пучок света, вышедший из коллиматора, падает на диафрагму $Д_2$, состоящую из двух параллельных щелей. Из этих щелей выходят две световые волны (I и 2), которые являются когерентными волнами. Волны I и 2 проходят через кюветы $К_I$ и $К_2$, падают на зеркало З, повторно проходят через кюветы и падают на объектив $О_3$, который вместе с щелью $Д_3$ образует выходной коллиматор $КЛ_2$. Здесь лучи I и 2 сходятся вместе в плоскости выходной щели $Д_3$, где и наблюдается интерференционная картина. Для наблюдения интерференционной картины служит окуляр $О_4$.

3. Метод исследования и описание установки

В данной работе показатели преломления растворов измеряют интерферометрическим методом. Для этого кюветы $К_I$ и $К_2$ наполняются одна эталонным (с известным показателем преломления), а другая исследуемым растворами. В случае, если кюветы $К_I$ и $К_2$ пусты или заполнены одинаковыми растворами, в окуляр $О_4$ можно наблюдать интерференционную картину в виде равноотстоящих параллельных полос, причем в центре картины наблюдается светлая полоса (разность хода лучей $\Delta = 0$, что соответствует max интерференции). При заполнении кювет разными растворами оптические пути лучей I и 2 неодинаковы. Для центра картины разность хода лучей равна

$$\Delta = 2l(n_2 - n_1), \qquad (I)$$

где l – длина кювет; $n_2 - n_1$ – разность показателей преломления растворов. (Длина кюветы берется удвоенной, так как луч света в приборе проходит через кювету дважды.)

Это приведет к смещению наблюдаемой в окуляр интерференционной картины.

Сдвиг интерференционной картины на величину, равную ширине одной интерференционной полосы, означает, что оптическая разность хода изменилась на величину длины волны

$$\Delta_0 = \lambda, \qquad (2)$$

а при сдвиге картины на N полос –

$$\Delta_1 = N\lambda. \qquad (3)$$

Решая совместно уравнения (I) и (3), получаем уравнение для показателя преломления исследуемого раствора n

$$n = n_o + \frac{N\lambda}{2l}, \qquad (4)$$

где n_o – показатель преломления эталонного раствора.

Так как для нашего интерферометра картина смещается на одну полосу при повороте микрометрического винта на I5 делений, т.е.

$$N = 1/15\ (x - x_o), \qquad (5)$$

где x_o – отсчет по микрометрическому винту для эталонного раствора; x – отсчет по микрометрическому винту для исследуемого раствора,

то

$$n = n_o + \frac{(x - x_o)\lambda}{30\ l}. \qquad (6)$$

Конструкция прибора такова, что в поле зрения прибора видны одновременно две интерференционные картины.

При этом нижняя интерференционная картина всегда неподвижна, так как она образуется лучами, не проходящими через кюветы.

Верхняя интерференционная картина образуется лучами, проходящими через исследуемые растворы. Поэтому если эти растворы имеют разные n, то за счет появляющейся разности хода лучей будет наблюдаться сдвиг интерференционной картины относительно нижней. Чтобы устранить этот сдвиг, необходимо скомпенсировать появившуюся разность хода лучей. Для этого в один из лучей вводят оптический клин (кварцевое стекло с известным показателем преломления n) с помощью микрометрического устройства.

4. Порядок выполнения работы

Самым важным правилом работы на данном приборе является соблюдение строжайшей чистоты.

Особое внимание должно быть уделено осторожному обращению с кюветами. Когда кюветы находятся вне камеры, они должны стоять на специальной подставке.

Ставить на стол кюветы запрещается!

4.I. Включить осветитель.

4.2. Поместить кюветы в камеру прибора.

4.3. Навести окуляр на интерференционную картину.

4.4. С помощью микрометрического винта установить интерференционные картины так, чтобы нижняя и верхняя совпадали (совместились). Их считают совмещенными, если две центральные ахроматические (черные) полосы совпадают.

4.5. С помощью пипетки с резиновой грушей обе кюветы заполнить эталонным раствором (дистиллированной водой). Кюветы заполнять жидкостью на 3/4, чтобы жидкость не переливалась через край*. Определить "нуль кюветы" x_0, т.е. отсчет по микрометрическому винту, при котором интерференционные картины совпадают. При дальнейших измерениях x_0 вычитают из расчетов**. Совмещение картин производить несколько раз. Результаты измерений занести в табл.I.

Таблица I

Номер измерения	Вещество					
	H_2O		раствор $NaCl$		HCl разбавленная	
	a_0	Δa_0	a_I	Δa_I	a_2	Δa_2
I						
2						
3						
⋮						

4.6. Из левой кюветы пипеткой отсосать воду и заполнить водным раствором $NaCl$ - раствор № I. Вращая микрометрический винт, добиться совпадения интерференционных картин. Снять отсчет (определить величину x_1) несколько раз.

4.7. Измерить температуру в помещении.

---

* Интерференционный метод исключительно чувствителен. Поэтому попадание жидкости на окно кюветы делает невозможным наблюдение интерференционной картины. Окна кювет должны быть абсолютно сухими и чистыми.

** Каждое деление осевой (неподвижной) части микрометрического винта соответствует I00 делениям вращающегося барабана. Например, если видно два деления на осевой части и 64 на барабане, то отсчет соответствует 264 делениям.

4.8. По табл. 2 определить показатель преломления n_0 дистиллированной воды при данной температуре t.

4.9. Повторить операции, перечисленные в п. 4.5–4.6 для раствора № 2 (сильно разбавленной кислоты HCl).

Таблица 2

t, °C	n_0
I8	I,333I6
I9	I,33308
20	I,33299
2I	I,33290
22	I,3328I
23	I,33270
Примечание. $\lambda = 5{,}5 \cdot 10^{-7}$ м, $l = 10^{-2}$ м.	

5. Обработка результатов измерений

5.I. Произвести полную обработку прямых измерений (величин x_0, x_1, x_2).

5.2. Определить показатели преломления исследуемых растворов. При расчете доверительной погрешности показателя преломления, учитывая вид рабочей формулы (6), удобнее вывести формулу для расчета абсолютной погрешности.

6. Контрольные вопросы

6.I. Дайте определение явлению интерференции.

6.2. Какие источники света называются когерентными?

6.3. Объясните принцип работы интерферометра.

6.4. Что называется оптической разностью хода лучей?

6.5. Чему равна оптическая разность хода интерферирующих лучей в данной лабораторной работе?

6.6. Запишите условия максимума и минимума при интерференции.

7. Список литературы

1. Ландсберг Г.С. Оптика. – М., 1952. – §§ 12, 20, 25–27.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М., 1978. – Т. 2. – §§ 119–122.

3. Висман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М., 1965. – §§ 3, 10–12.

4. Геворкян Р.Г., Шепель Б.В. Курс общей физики. – М.: Высшая школа, 1972. – С. 385–391.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 303

ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА ОТ ДАВЛЕНИЯ

I. Задачи работы

I. С помощью интерферометра изучить зависимость показателя преломления газа (воздуха) от давления.

2. Определить чувствительность установки.

2. Предварительные сведения

Одним из применений интерференции является определение важнейших физических величин, характеризующих вещества, в частности, показателя преломления газообразных, жидких и твердых тел.

Интерферометры, используемые для определения показателя преломления (интерференционные рефрактометры), как правило, построены на принципе получения двух когерентных интерферирующих лучей в результате дифракции параллельного пучка света на двух щелях. Принципиальная оптическая схема приведена на рис. I.

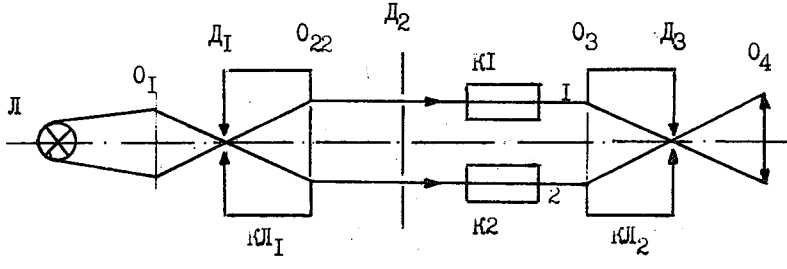


Рис. I.

Входная диафрагма $\mathcal{D}_1$ интерферометра освещается оптической системой, состоящей из электрической лампочки Л и собирающей линзы $О_I$. Входная диафрагма $\mathcal{D}_1$ представляет собой узкую щель, находящуюся в фокальной плоскости объектива $О_2$. Ширина щели $\mathcal{D}_1$ определяет качество интерференционной картины и выбирается таким образом, чтобы вследствие явления дифракции из щели выходил расходящийся пучок света, причем фронт образовавшейся световой волны

Российский государственный гидрометеорологический институт
БИБЛИОТЕКА
195196, СПб, Малоохтинский пр., 98

должен быть близок к сферической поверхности. Если это условие выполняется, то из коллиматора $КЛ_I$ (оптическая система, состоящая из объектива $О_2$ и находящейся в фокальной плоскости диафрагмы $Д_1$) выходит практически параллельный пучок света. Этот пучок света падает на диафрагму $Д_2$, состоящую из двух параллельных щелей. Следует отметить, что после коллиматора световая волна становится плоской, причем плоскость фронта параллельна плоскости диафрагмы $Д_2$. Таким образом, из щелей диафрагмы $Д_2$ выходят две световые волны (I и 2), которые являются когерентными, если выполнено вышеприведенное условие для ширины щели. Волны I и 2 проходят через кюветы $К_I$ и $К_2$ и попадают на объектив $О_3$. После объектива они пересекаются в его фокальной плоскости. Объектив $О_3$ вместе с выходной диафрагмой $Д_3$ образуют выходной коллиматор $КЛ_2$. В плоскости выходной щели $Д_3$ образуется интерференционная картина, которая рассматривается через окуляр $О_4$.

На пути пучков I и 2 помещены газовые кюветы, представляющие собой одинаковые металлические трубки, торцы которых закрыты одинаковыми плоскопараллельными стеклами. Если кюветы заполнены одним и тем же газом при одинаковом давлении, то разность хода лучей, проходящих через них, в центре выходной щели $\Delta = 0$. Если показатели преломления газов, заполняющих кюветы, различны, то оптическая разность хода лучей I и 2 станет отличной от нуля и рассчитывается по формуле

$$\Delta = (n_2 - n_1)\, l, \qquad (I)$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления газов, наполняющих кюветы I и 2; l – длина кюветы.

Следует отметить, что формула (I) справедлива только для центра интерференционной картины. Справа и слева от центра также наблюдаются интерференционные полосы, что связано с расходимостью пучков света I и 2. При изменении давления газа, а следовательно, и показателя преломления в одной из кювет, вся интерференционная картина сдвигается. Сдвиг интерференционной картины на величину, равную ширине одной интерференционной полосы, означает, что оптическая разность хода изменилась на величину длины волны λ, а при сдвиге картины на N полос

$$\Delta = N\lambda. \qquad (2)$$

Решая совместно уравнения (I) и (2), получаем уравнение для пока-

зателя преломления n_2

$$n_2 = n_1 + \frac{N\lambda}{l} . \qquad (3)$$

Отметим, что интерферометрический метод позволяет обнаруживать весьма малые разности показателей преломления. Например, при смещении интерференционной картины на одну полосу (такое смещение легко регистрируется) при l = 10 см и $\lambda = 5.10^{-7}$ м имеем:

$$n_2 - n_1 = \frac{N\lambda}{l} = \frac{1 * 5\ 10^{-7}}{10^{-1}} = 5\ 10^{-6}. \qquad (4)$$

Столь высокая чувствительность метода позволяет использовать его для целей газового анализа. Для этого в одну из кювет помещают эталонный газ (газ с известным показателем преломления, например, воздух при нормальном давлении), в другую - анализируемый газ (пусть, например, NO_2). В этом случае разность показателей преломления $n_{NO_2} - n_{возд} = 1{,}0004498 - 1{,}000292 \approx 1{,}6.10^{-4}$ будет уверенно регистрироваться интерферометром. По величине этой разности (в нашем примере $1{,}6.10^{-4}$) легко найти показатель преломления анализируемого газа и по специальным таблицам определить его состав.

3. Метод исследования и описание установки

В данной работе одна из кювет интерферометра постоянно соединена с атмосферным воздухом, а другая присоединена к замкнутому воздушному резервуару переменного объема - сильфону (гофрированной трубке). Сжатие сильфона осуществляется подвижным винтом В (рис. 2).

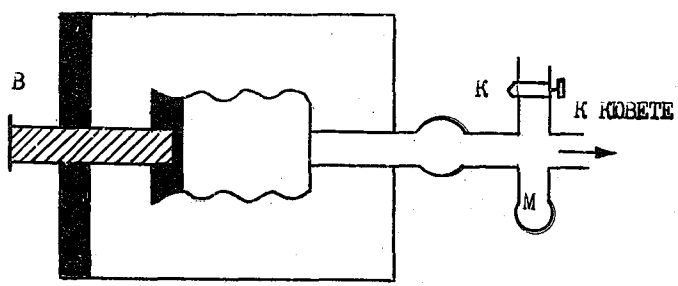


Рис. 2.

К этому резервуару присоединен манометр М, проградуированный в кг/м^2 х 100.

Показатель преломления воздуха в кювете, соединенной с атмосферой, постоянен и равен n_1. Показатель преломления воздуха во второй кювете n_2 меняется с увеличением давления. Его можно вычислить из формулы (3), зная показатель преломления воздуха при нормальных условиях $n_{норм.}$, температуру помещения $T_{атм.}$ и атмосферное давление в помещении в данный момент $P_{атм.}$.

Действительно, показатель преломления газов, точнее, величина $(n - 1)$ пропорциональна плотности газа

$$(n - 1) \sim \rho, \tag{5}$$

а плотность газа, в свою очередь, пропорциональна давлению

$$\rho = \frac{P \mu}{R T}. \tag{6}$$

Тогда, если взять отношение величин $(n - 1)$ для условий опыта и нормальных условий, получим зависимость между показателем преломления и давлением

$$\frac{n_1 - 1}{n_{норм.} - 1} = \frac{P_{атм.} * T_{норм.}}{P_{норм.} * T_{атм.}}. \tag{7}$$

В этой формуле $P_{норм.}$ = 101,3 кПа, $T_{норм.}$ = 273 К, $P_{атм.}$ - атмосферное давление, $T_{атм.}$ - температура воздуха.

Отсюда

$$n_1 - 1 = (n_{норм.} - 1) \frac{P_{атм.} * 273}{101,3 * T_{атм.}}, \tag{8}$$

или

$$n_1 = 1 + (n_{норм.} - 1) \frac{P_{атм.} * 273}{101,3 * T_{атм.}}. \tag{9}$$

В нашем интерферометре картина смещается на одну длину волны при повороте микрометрического винта на 35 делений. Следовательно,

$$N = \frac{x - x_0}{35}, \tag{10}$$

где x_o – отсчет по микрометрическому винту до изменения давления газа; x – отсчет по микрометрическому винту при измененном давлении газа.

Итак, с учетом формул (3), (9) и (10) искомый показатель преломления во второй кювете равен

$$n_2 = 1 + (n_{норм.} - 1) \frac{P_{атм.}}{101,3} * \frac{273}{T_{атм.}} + \frac{x - x_o}{35} * \frac{\lambda}{I} . \qquad (11)$$

Конструкция прибора такова, что в поле зрения видны одновременно две интерференционные картины: верхняя подвижная и нижняя неподвижная. При этом интерференционная картина всегда неподвижна, так как она образуется лучами, не проходящими через кюветы. Верхняя интерференционная картина образуется лучами, проходящими через кюветы, заполненные воздухом. Давление в одной из кювет может меняться. Поэтому если давление в этих кюветах будет разное, то появится разность хода лучей и будет наблюдаться сдвиг интерференционной картины относительно неподвижной нижней. Чтобы устранить этот сдвиг, необходимо скомпенсировать появляющуюся разность хода лучей. Для этого в один из лучей вводят оптический клин (кварцевое стекло с известным показателем преломления n) с помощью микрометрического устройства.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Полностью разжать сильфон с помощью винта В (см. рис. 2).

4.2. Открыть кран К на трубке, соединяющей сильфон с атмосферным воздухом, и удостовериться, что стрелка манометра стоит на нуле.

4.3. Навести окуляр на интерференционную картину. С помощью микрометрического винта установить обе интерференционные картины так, чтобы нижняя неподвижная и верхняя подвижная были совмещены, т.е. две центральные ахроматические (черные) полоски должны совпасть. Взять отсчет по микрометрическому винту x_o. Каждое большое деление осевой (неподвижной) части микрометрического винта соответствует 100 делениям на барабане (на вращающейся части). Например, если видно два деления на осевой части и 64 на барабане, то отсчет соответствует 264 делениям.

4.4. Закрыть кран К и начать увеличивать давление в кювете, вращая винт сильфона. Измерения производить через каждые

10 кг/м^2 по шкале манометра ($P_{ман.}$). При этом, вращая микрометрический винт, совмещать интерференционные картины и снимать показания микрометрического винта x. Данные занести в таблицу.

4.5. Измерить температуру помещения $T_{атм.}$ и атмосферное давление $P_{атм.}$. Все данные занести в таблицу.

Таблица

Номер измерения	$P_{ман.}$		x	x_o	$T_{атм.}$		$P_{атм.}$		λ	ℓ	$n_{норм.}$
	кг/м^2	Па	дел	дел	^oC	K	мм рт.ст.	кПа	м	м	

5. Обработка результатов измерений

5.1. По формуле (11) произвести расчет результатов измерения величины n_2.

Доверительную границу абсолютной погрешности можно принять равной $\Delta n = max(\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z \ldots)$, где Δn_x, Δn_y и т.д. – частные абсолютные погрешности ($\Delta n_x = \left|\frac{\delta n}{\delta x}\right| \Delta x$, $\Delta n_y = \left|\frac{\delta n}{\delta y}\right| \Delta y$ и т.д. Напоминаем, что при вычислении частных производных все переменные функции, кроме той, по которой берется производная, полагают постоянными величинами).

5.2. Используя результаты измерений, построить график зависимости (n_2 – 1) от $P_{ман.}$

5.3. Считая зависимость (n_2 – 1) от $P_{ман.}$ линейной, найти угловой коэффициент этой зависимости "a". Рассчитать чувствительность* установки S по формуле

$$S = a. \qquad (12)$$

Показатель преломления воздуха при нормальных условиях $n_{норм.}$ = 1,0002918 или ($n_{норм.}$ – 1) = (2,9180±0,0005).10^{-4}.

Длина волны λ = (5,89±0,02).10^{-7} м.

Длина кюветы ℓ = (1,0000±0,0002) м.

---

*Чувствительность метода определяется отношением изменения определяемой данным методом величины (n) к изменению влияющего параметра ($P_{ман.}$).

6. Контрольные вопросы

6.I. Дайте определение явлению интерференции.

6.2. Какие источники света называются когерентными?

6.3. Объясните принцип работы интерферометра.

6.4. Что называется оптической разностью хода?

6.5. На чем основана возможность применения интерферометрии для целей газового анализа?

7. Список литературы

I. Ландсберг Г.С. Оптика. - М., I952. - §§ I2, 20, 25, 27.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М., I978. - Т. 2. - §§ II9, I22.

3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. - М., I965. - Т. 3. - §§ 3, I0, I2.

4. Геворкян Р.Г., Шепель В.В. Курс общей физики. - М., I972. - С. 385-39I.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 304

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕГО УГЛА БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ

I. Задачи работы

1. Определение преломляющего угла бипризмы первым способом.
2. Определение преломляющего угла бипризмы вторым способом.

2. Предварительные сведения

Сведения из теории см. в лабораторной работе № I.

3. Метод исследования и описание установки

В предлагаемой лабораторной работе интерференционную картину наблюдают при помощи бипризмы Френеля. Она представляет собой две призмы с малыми преломляющими углами А, сложенные своими основаниями (рис. I). Ход лучей изображен на рис. 2. Перед бипризмой помещен источник света S – лампа накаливания с красным светофильтром и узкой щелью.

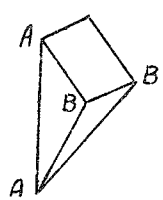


Рис. I.

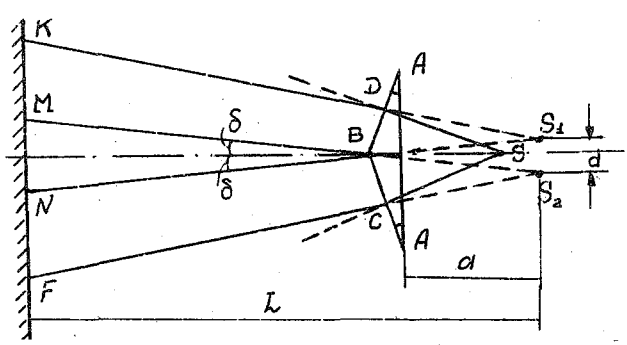


Рис. 2.

Первый способ. Падающий от щели пучок света после преломления в бипризме разделяется на два перекрывающихся пучка NK и MF, как бы исходящих из двух мнимых изображений щели S_1 и S_2. Так как источники S_1 и S_2 когерентны, то в пространстве за бипризмой будет наблюдаться интерференционная картина, локализованная во всей области пересечения пучков NK и MF.

Преломляющий угол бипризмы А, угол δ и коэффициент преломления призмы n связаны формулой

$$\delta = A\,(n - 1). \qquad (I)$$

Формула (I) справедлива для тонкой призмы при падении лучей под небольшими углами на призму. Эти условия выполнены при опыте с бипризмой Френеля.

Из рис. 3 видно, что

$$\frac{d}{2} = a\,\mathrm{tg}\delta, \qquad (2)$$

где d – расстояние между мнимыми источниками света; a – расстояние между мнимыми источниками и бипризмой (с небольшой ошибкой его можно принять равным расстоянию между действительным источником S и бипризмой).

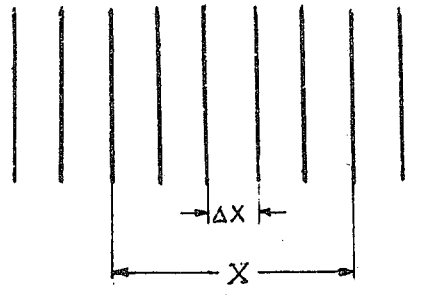


Рис. 3.

Так как угол δ очень мал, то $tg\,\delta \approx \delta$ и, значит,

$$d = 2\,a\,\delta. \qquad (3)$$

Подставив формулу (I) в соотношение (3), получим:

$$d = 2\,a\,A\,(n - 1). \qquad (4)$$

Отсюда

$$A = \frac{d}{2\,a\,(n - 1)}. \qquad (5)$$

Задача по определению преломляющего угла бипризмы будет решена, если каким-либо образом измерить расстояние между мнимыми источниками света d или выразить его через другие легко измеряемые величины. Для этого можно воспользоваться формулой Кнга. Расстояние между соседними интерференционными полосами, получаемыми от биопризмы, Δx определяется, как и в опыте Кнга, формулой

$$\Delta x = \frac{L}{d}\lambda, \qquad (6)$$

где L – расстояние от мнимых источников света до экрана (см. рис. 2). С небольшой ошибкой его можно принять равным расстоянию между действительным источником и экраном.

Расстояние между k интерференционными полосами равно

$$x = (k - 1)\,\Delta x. \qquad (7)$$

Подставляя выражение (6) в формулу (7), получим

$$x = \frac{(k - 1)\,L\,\lambda}{d} \quad \text{или} \quad d = \frac{(k - 1)\,L\,\lambda}{x}. \qquad (8)$$

Использовав равенства (8) и (5), получим окончательную формулу:

$$A = \frac{(k - 1)\,L\,\lambda}{2a\,(n - 1)\,x}. \qquad (9)$$

где A – преломляющий угол бипризмы; k – число интерференционных полос; L – расстояние между источником света S и экраном; λ – длина волны света; a – расстояние между источником света и биризмой; n – показатель преломления бипризмы; x – расстояние между интерференционными полосами.

Все величины, входящие в формулу (9), поддаются измерению. Выражение (9) является конечной расчетной формулой, с помощью которой осуществляется определение преломляющего угла бипризмы А

первым способом.

Второй способ определения угла А заключается в следующем. Между бипризмой и экраном ставится собирающая линза Р, которая дает действительное изображение S_1' и S_2' мнимых источников S_1 и S_2 (рис. 4) на экране (в окуляре)

$$\Delta OS_2O_1 \sim \Delta O_1S_1'O_2,$$

поэтому

$$\frac{d}{d_1} = \frac{R}{l}, \qquad (10)$$

где d – расстояние между мнимыми источниками света S_1 и S_2; d_1 – расстояние между изображениями S_1' и S_2' этих источников; R – расстояние между мнимыми источниками света и линзой (с некоторым приближением оно равно расстоянию между действительным источником и линзой); l – расстояние между линзой и экраном (окуляром).

Подставив d из равенства (10) в выражение (5), окончательно получим формулу

$$A = \frac{d_1 R}{2 a l (n-1)}. \qquad (11)$$

Выражение (II) является расчетной формулой, с помощью которой осуществляется определение преломляющего угла бипризмы вторым способом.

Установка, с помощью которой выполняется предлагаемая лабо-

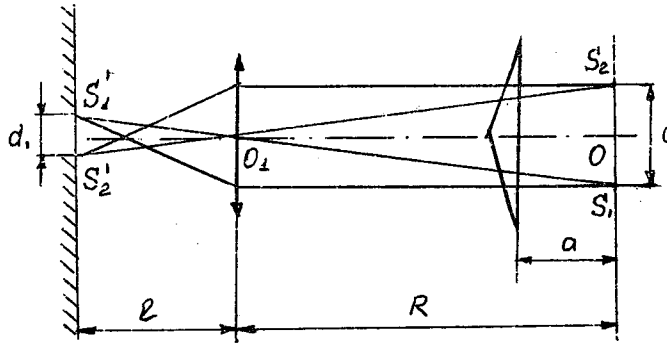


Рис. 4.

раторная работа, представляет собой оптическую скамью. На ней на одной высоте расположены источник света, щель, бипризма и окуляр для наблюдения интерференционной картины. Между источником света и щелью помещают красный светофильтр, который пропускает свет с длиной волны λ = 620 нм.

4. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

4.I. Определение преломляющего угла бипризмы первым способом.

4.I.I. Бипризму поместить в 60-70 см от окуляра.

4.I.2. Включить источник света.

4.I.3. Расположить щель вертикально так, чтобы она находилась на одной оси с вертикальной линией соединения призм. Это выполняется следующим образом. На листе бумаги получают изображение щели. Затем перемещают призму до совмещения линии соединения призм с изображением щели, после чего на листе бумаги, помещенном между бипризмой и окуляром, появится двойное изображение щели, разделенное пространством, в котором наблюдается интерференционная картина - чередование красных и черных параллельных полос. Эту картину следует рассматривать через окуляр.

4.I.4. Измерить расстояние x между пятью-десятью интерференционными полосами (см. рис. 4). Для этого, вращая барабан окуляра, навести перекрестие нитей на середину одной из темных полос. Записать отсчет x_1*. Отсчитать пять - десять полос, навести перекрестие нитей на середину одной из них. Записать отсчет x_2.

Расстояние между k полосами $x = (x_2 - x_1)$.

4.I.5. Измерить расстояние между источником света (щелью) и бипризмой a (см. рис. 2).

4.I.6. Измерить расстояние между источником света и окуляром L.

4.I.7. Результаты измерений занести в табл. I.

4.I.8. Подставив полученные результаты измерений в формулу

---

* Количество целых делений указывает биштрих - двойной штрих, перемещающийся при вращении барабана вдоль шкалы. Доли деления отсчитывают по барабану. Цена деления шкалы - I мм. Цена деления барабана - 0,0I мм. Например, если биштрих между третьим и четвертым делениями, а по барабану отсчитали 27 делений, то отсчет соответствует 3,27 мм.

(9), вычислить величину преломляющего угла А бипризмы.

4.I.9. Вычислить абсолютную и относительную погрешности результата.

Таблица I

x_1	x_2	x	Δx	a	Δa	L	ΔL	λ	n
мм	мм	мм	мм	см	см	см	см	нм	
								620	I,5

4.2. Определение преломляющего угла бипризмы вторым способом.

4.2.I. Не меняя расположения приборов, между окуляром и бипризмой поставить линзу Р (см. рис. 4).

4.2.2. Перемещая линзу, добиться получения резкого изображения двух источников. Изображения появятся в виде двух тонких светлых полос.

4.2.3. Измерить расстояние между этими полосами d_1.

4.2.4. Измерить расстояние между источником света (щелью) и линзой R.

4.2.5. Измерить расстояние между линзой и окуляром l.

4.2.6. Данные измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

Номер измерения	d_1	Δd_1	R	ΔR	l	Δl	A
I 2 3 ⋮							
Среднее							

4.2.7. Подставив полученные результаты измерений в формулу (II), вычислить величину преломляющего угла А бипризмы.

4.2.8. Измерения, указанные в п. 4.2.I–4.2.7, повторить при разных положениях R линзы.

4.2.9. Найти среднее значение преломляющего угла бипризмы $A_{ср}$.

4.2.10. Вычислить абсолютную и относительную погрешности результата, наиболее близкого к среднему.

5. Контрольные вопросы

5.1. Какие волны называются когерентными?

5.2. Дайте определение явлению когерентности.

5.3. Как меняется длина световой волны при переходе света из вакуума в среду с показателем преломления n ?

5.4. Что называется оптической длиной пути, оптической разностью хода?

5.5. Как связана разность фаз с оптической разностью хода?

5.6. Сформулируйте условия максимума и минимума при интерференции.

6. Список литературы

1. Ландсберг Г.С. Оптика. - М., 1952. - §§ 12, 20, 25-27.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М., 1978. - Т. 2. - §§ 2, 119-122.

3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. - М., 1965. - §§ 3, 10-12.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 305-I

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

I. Задачи работы

1. Определение постоянной дифракционной решетки.
2. Определение длины волны зеленого цвета.

2. Предварительные сведения

Дифракцией называется явление огибания волной препятствий и проникновение ее в область геометрической тени. Явление дифракции можно объяснить с точки зрения принципа Гюйгенса-Френеля: каждая точка фронта волны является источником новых волн, эти вторичные волны когерентны (объясните - почему?) и интерферируют друг с другом, что выражается в перераспределении энергии волн в пространстве.

Прибор, с помощью которого можно получить оптический спектр, используя явления дифракции и интерференции света, называется дифракционной решеткой. Она представляет собой ряд узких параллельных щелей одинаковой ширины a, разделенных между собой непрозрачными промежутками шириной b. Сумма $a + b = d$ называется периодом или постоянной дифракционной решетки.

Рассмотрим сначала дифракцию на решетке от монохроматического света, т.е. света с определенной длиной волны ($\lambda = const$).

Пусть плоская монохроматическая волна падает нормально на решетку $\mathcal{D}$ (рис. I). Фронт волны АВ доходит до щелей решетки одновременно и, в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля, все щели решетки излучают когерентные волны, распространяющиеся под всеми углами.

Линза L собирает дифрагированные волны в своей фокальной плоскости F. Поскольку эти волны когерентны, то в фокальной плоскости наблюдается устойчивая во времени (стабильная) интерференционная картина.

Всю совокупность лучей, падающих на линзу L, можно разделить на параллельные пучки, состоящие из лучей, вышедших из каждой щели под определенным углом (например, Φ_1, Φ_2 и т.д.). Каждый пучок собирается в фокальной плоскости линзы (точки M_1, M_2 и т.д на рис. I). Поскольку все щели находятся друг от друга на одинаковом расстоянии, то разности хода волн, идущих от соседних ще-

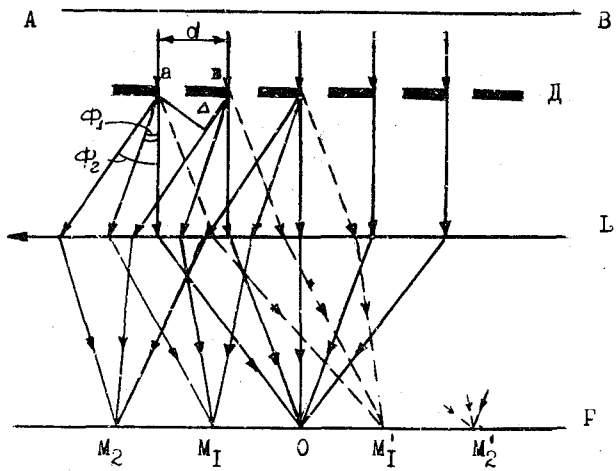


Рис. I.

лей под углом Φ, одинаковы для всей дифракционной решетки. Величина этой разности хода равна $\Delta = d \sin \varphi$ (рис. 2).

Из теории интерференции известно, что при $\Delta = 2k\frac{\lambda}{2}$, где k - целое число, наблюдается усиление света (максимум), а при $\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ - ослабление света (минимум). Поэтому для образования максимумов на экране, расположенном в фокальной плоскости линзы, необходимо, чтобы разность хода лучей была равна целому числу длин волн:

$$\Delta = d \sin \Phi = k \lambda, \qquad (I)$$

где величину k принято называть порядком спектра ($k = 0, \pm I, \pm 2, \ldots$).

При $k = 0$, т.е. при $\Phi = 0$ (для лучей, параллельных главной

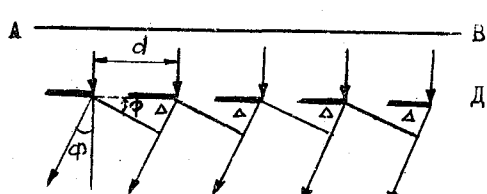


Рис. 2.

оптической оси), наблюдается центральная светлая полоса, или максимум нулевого порядка (точка 0 на рис. I). Два знака "±" для всех остальных значений k соответствуют максимумам, расположенным в фокальной плоскости линзы симметрично слева и справа от центральной светлой полосы. При $k = -I$ ($d \sin \varphi = -\lambda$) в точке M_I наблюдается максимум первого порядка слева (разность хода равна одной целой λ), при $k = +I$ – максимум первого порядка справа в точке M'_I; при $k = \pm 2$ ($d \sin \varphi = \pm 2\lambda$) в точках M_2, M'_2 – максимумы второго порядка слева и справа (разность хода равна двум целым λ) и т.д.

Таким образом, когда на решетку падает монохроматический свет, в главной фокальной плоскости линзы наблюдается центральный яркий максимум нулевого порядка для волн, не претерпевших дифракцию; вправо и влево от него симметрично располагаются максимумы первого, второго порядков и т.д. в виде светлых полос с постепенно ослабевающей интенсивностью. Дифракционные максимумы – светлые полосы – параллельны штрихам решетки и разделены друг от друга дифракционными минимумами – темными промежутками, в которых волны, интерферируя, уничтожают друг друга (рис. 3а).

В случае, когда на решетку падает свет не монохроматический (например, белый), составляющие его волны с более короткой длиной волны λ дают, согласно уравнению (I), максимум под меньшим углом Ф, чем волны большей длины волны. Поэтому каждый максимум в этом случае представляет собой спектр, состоящий из разноцветных полос, соответствующих тем длинам волн, которые падают на решетку. Таким образом, по обе стороны от нулевого максимума располагаются спектры первого, второго порядков и т.д., обращенные своей коротковолновой частью в сторону нулевого максимума (рис. 3б).

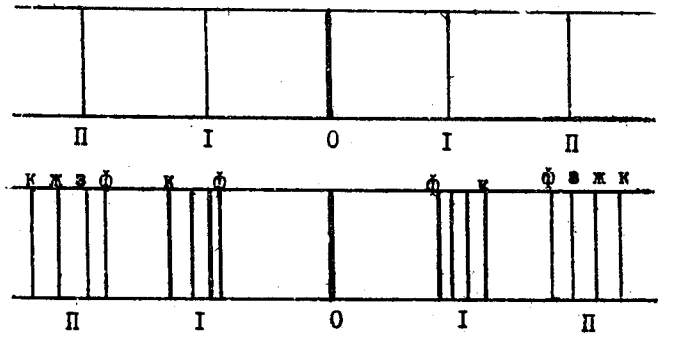


Рис. 3.

3. Метод исследования и описание установки

Источником света в данной работе является ртутная лампа, имеющая дискретный, линейчатый спектр. Наблюдая дифракционную картину, можно определить длину световой волны λ, используя уравнение (I). Для этого надо знать период дифракционной решетки и измерить угол наблюдения Φ_k (угол дифракции, соответствующий данной спектральной линии в спектре k-того порядка).

Прибор, с помощью которого точно определяются углы наблюдения, называется гониометром. Описание и правила работы на гониометре приведены в приложении к лабораторной работе.

Как сказано в приложении, зрительная труба гониометра, имеющая в окулярной трубке вертикальную нить, может вращаться вокруг вертикальной оси гониометра. Положение зрительной трубы фиксируется с помощью отсчетного механизма.

Пусть сначала на столике гониометра нет дифракционной решетки. От источника свет проходит через щель коллиматора (набор линз, дающих параллельный пучок лучей), преломляется в линзе и далее пучок параллельных лучей падает на объектив зрительной трубы. В главной фокальной плоскости объектива зрительной трубы получается изображение щели. Это изображение рассматривают в окуляр, его можно совместить с вертикальной нитью.

Если на столик гониометра установить дифракционную решетку перпендикулярно оси коллиматора и так, чтобы штрихи решетки были параллельны щели, то в поле зрения трубы, кроме центрального яркого изображения щели ($k = 0$), по обе стороны от него наблюдаются спектры первого, второго порядков и т.д. Для наблюдения этих спектров следует поворачивать зрительную трубу вправо и влево вокруг вертикальной оси гониометра.

4. Порядок выполнения работы

4.I. Ознакомиться с описанием гониометра и правилами работы на нем.

4.2. Включить питание гониометра и спектральной лампы.

4.3. Не устанавливая дифракционной решетки, ознакомиться с действием зажима микроповорота зрительной трубы (см. приложение, рис. 4).

4.4. Установить изображение щели на вертикальной нити и отфокусировать его фокусировочным винтом трубы.

4.5. Произвести несколько пробных отсчетов лимба при различных положениях трубы и зажатых винтах столика.

4.6. Установить дифракционную решетку на столик гониометра перпендикулярно оси коллиматора. Далее работа состоит из двух частей.

Определение постоянной дифракционной решетки

I. Установить зрительную трубу так, чтобы был виден нулевой максимум (спектр нулевого порядка – яркая белая полоска).

2. Вращать трубу влево до тех пор, пока в ней не покажется фиолетовая линия ртути, принадлежащая спектру первого порядка ($k = -1$) слева. Продолжая вращать трубу влево, найти фиолетовую линию в спектре второго порядка, совместить вертикальную нить с этой линией. Снять отсчет. Данные занести в таблицу в графу "отсчет слева" для $k = -2$. Это будет величина $\Phi_{Л_2}$.

3. Вращать трубу в обратном направлении, пройдя нулевой максимум. Ту же установку и отсчет для фиолетовой линии ($k = +2$) проделать по правую сторону от нулевого максимума. Данные занести в таблицу в графу "отсчет справа"; это будет величина $\Phi_{П_2}$.

Таблица

Номер наблюдения	Отсчет слева $\Phi_{Л_2}$	Отсчет справа $\Phi_{П_2}$
I		
2		
3		
4		
5		
Среднее		

Все измерения проделать несколько раз.

Определение длины волны зеленой линии ртути

Порядок выполнения работы тот же, что и в первой части. Только теперь нить зрительной трубы следует наводить на зеленую линию в спектре второго порядка слева и справа. Данные занести в

таблицу, аналогичную приведенной выше.

5. Обработка результатов измерений

5.1. По результатам таблиц рассчитать углы Φ_1 и Φ_2 отклонения луча от нормали по формуле

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_{П2} - \Phi_{Л2}}{2}. \qquad (2)$$

Доверительные границы абсолютной погрешности для Φ_1 и Φ_2 находить как погрешность косвенных измерений, а для $\Phi_{П_2}$ и $\Phi_{Л_2}$ – как прямых.

5.2. Для определения постоянной решетки воспользуемся уравнением (I). Из него получаем:

$$d = \frac{k\lambda}{\sin \Phi_1}, \qquad (3)$$

где λ = 404,7 нм (длина волны фиолетовой линии в спектре). Погрешность Δd находить как погрешность косвенного измерения.

5.3. Для определения длины волны зеленой линии ртути воспользуемся также уравнением (I). Из него получаем:

$$\lambda = \frac{d \sin \Phi_2}{k}. \qquad (4)$$

Погрешность $\Delta\lambda$ находить как погрешность результата косвенного измерения.

6. Контрольные вопросы

6.1. Какое явление называется дифракцией?

6.2. Какие волны называются когерентными?

6.3. Как формулируется принцип Гюйгенса-Френеля?

6.4. Объясните образование спектров при прохождении волн через дифракционную решетку. Сформулируйте условия образования максимумов для дифракционной решетки.

6.5. Какой прибор называется гониометром?

7. Список литературы

I. Савельев И.В. Курс общей физики. – М., 1982. – Т. 2. – §§ 125–130.

2. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М., 1972. – Т. 3. – §§ 13–15.

3. Ландсберг Г.С. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1976. – §§ 86, 125, 155, 156.

4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980. – §§ 8, 84–86.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 305-2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРИЗМЫ

I. Задачи работы

I. Определение величины преломляющего угла призмы.

2. Определение коэффициента преломления для различных длин волн.

2. Предварительные сведения

Показателем преломления (абсолютным показателем преломления) среды называется величина n, равная отношению скорости c электромагнитных волн в вакууме к их фазовой скорости v в среде:

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

Так как для диэлектрических сред скорость распространения волн зависит от относительных диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостей среды и определяется уравнением

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu \varepsilon_0 \mu_0}},$$

где ε_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, связанные со скоростью света в вакууме соотношением

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}},$$

то для показателя преломления среды мы получаем зависимость

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

Для сред, не обладающих ферромагнитными свойствами, т.е. для которых магнитная проницаемость среды $\mu \cong 1$, практически можно считать, что показатель преломления среды равен

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

Результаты экспериментальных работ по распространению электромагнитных волн (в частности, световых) показывают наличие зависимости показателя преломления n от частоты ν распространяющихся электромагнитных колебаний. Это явление получило название дисперсии света. Оно объясняется разной фазовой скоростью распро-

странения в веществе световых волн различной длины. Дисперсией обладают практически все прозрачные вещества, кроме вакуума, где скорость распространения всех электромагнитных волн любой длины одинакова.

Дисперсия света называется нормальной в случае, если показатель преломления монотонно возрастает с увеличением частоты (убывает с увеличением длины волны); в противном случае дисперсия называется аномальной. Аномальная дисперсия обнаружена в ряде веществ в области фиолетовых и ультрафиолетовых лучей, и при этом возникает очень сильное поглощение. На рис. I показана функция $n = f(\nu)$ для нормальной и аномальной дисперсии.

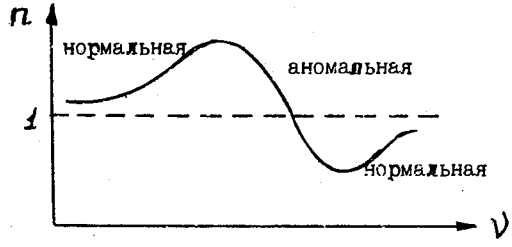


Рис. I. Зависимость показателя преломления вещества от частоты света.

Классическая электронная теория позволяет найти зависимость показателя преломления от частоты. Она имеет вид:

$$n^2 = 1 + \frac{n_o e^2}{m \varepsilon_o} \cdot \frac{1}{4\pi^2 (\nu^2 - \nu_o^2)},$$

или

$$n^2 = 1 + \frac{n_o e^2}{m \varepsilon_o c^2} \cdot \frac{\lambda_o^2 \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_o^2)} \cdot \frac{1}{4\pi^2},$$

где m – масса электрона; n_o – число атомов в единице объема (концентрация электронов); λ_o, ν_o – длина волны и частота, обусловленные собственными колебаниями электрона; λ, ν – длина волны и частота падающего на вещество света; e – заряд электрона; ε_o – электрическая постоянная ($\varepsilon_o = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); c – скорость света в вакууме.

В прикладной оптике преломляющие и дисперсионные свойства вещества определяются тремя основными характеристиками:

I) показателем преломления для желтой линии натрия

λ = 589,3 нм;

2) значением средней дисперсии, равной разности показателей преломления для голубой (λ = 486,I нм) и красной (λ = 656,3 нм) линий спектра водорода;

3) для призм и спектральных приборов - значением угловой дисперсии D , равной отношению разности углов отклонения двух близких монохроматических пучков $\Delta\varphi$ к разности их длин волн $\Delta\lambda$:

$$D = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}.$$

В данной работе измерение показателей преломления производится для оптического стекла, имеющего форму призмы. Разложение белого света в спектр при прохождении его через призму (рис. 2) вызвано явлением дисперсии. Свет разных длин волн (разного цвета) неодинаково преломляется на границе двух прозрачных сред, так как n зависит от λ .

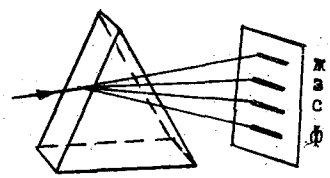


Рис. 2.

Для оптической призмы существует связь угла δ отклонения лучей призмы от их первоначального направления с показателем преломления стекла призмы n , преломляющим углом призмы А и углом падения лучей на призму α . Используя эту зависимость, можно определить показатель преломления вещества призмы.

При некотором определенном угле падения лучей на призму α угол отклонения лучей призмой δ принимает наименьшее значение и носит название угла наименьшего отклонения δ_{min}. Установим для этого случая связь между величинами n , А, δ_{min} . Запишем закон преломления света:

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}.$$

Если мы рассматриваем случай, когда угол отклонения δ принимает наименьшее значение δ_{min}, то угол преломления света на первой грани призмы β равен углу падения света на вторую грань призмы, причем один из углов призмы практически равен 90^0.

Из рис. 3 следует, что β = A/2,

$$\delta = 180^0 - \theta = 360^0 - 2\alpha - (180^0 - A);$$

из четырехугольника NKCM мы получаем $\delta_{min} = 180^0 - \theta = 2\alpha - A$, отсюда

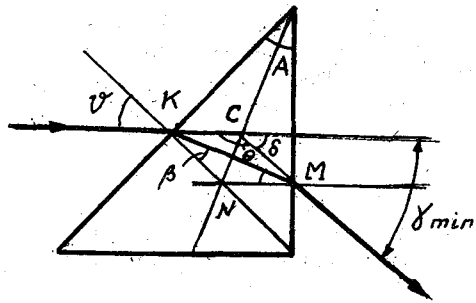


Рис. 3. Ход лучей в призме.

$$v = \frac{\delta_{min} + A}{2} .$$

Подставив значения α и β в закон преломления, получим

$$n = \frac{\sin \frac{\delta_{min} + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}} .$$

Из формулы видно, что, измерив углы A и δ_{min} для различных длин волн, можно рассчитать значения показателя преломления.

3. Метод исследования и описание установки

Источником света в данной работе является ртутная лампа, имеющая дискретный, линейчатый спектр.

Наблюдая разложение белого света в спектр при прохождении его через призму, вызванное явлением дисперсии, можно провести измерение показателей преломления оптического стекла. Для этого надо знать преломляющий угол призмы A и угол δ отклонения лучей призмой от их первоначального направления.

Прибор, с помощью которого точно определяются углы наблюдения, называется гониометром. Описание и правила работы на гониометре приведены в приложении к лабораторной работе.

Как сказано в приложении к лабораторной работе, зрительная труба гониометра, имеющая в окулярной трубке вертикальную нить, может вращаться вокруг вертикальной оси гониометра. Положение зрительной трубы фиксируется с помощью отсчетного механизма. Пусть сначала на столике гониометра нет призмы. От источника све-

та (ртутной лампы) свет проходит через щель коллиматора, преломляется в линзе и далее пучок параллельных лучей падает на объектив зрительной трубы. В главной фокальной плоскости объектива зрительной трубы получается изображение щели. Это изображение рассматривают в окуляр, его можно совместить с вертикальной нитью.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Ознакомиться с описанием гониометра и правилами работы на нем.

4.2. Включить питание гониометра и спектральной ртутной лампы.

4.3. Не устанавливая призму, ознакомиться с действием зажимов микроподачи трубы и поворотного столика (нижний и верхний зажимы).

4.4. Установить изображение щели на вертикальной нити и сфокусировать его фокусировочным винтом трубы.

4.5. Произвести несколько пробных отсчетов лимба при различных положениях трубы и зажатых винтах столика (I3). Затем произвести пробные отсчеты при зажатой трубе (8) и свободном нижнем винте столика. В этом случае вращение столика происходит совместно с лимбом.

4.6. Поместить призму на столик гониометра так, чтобы выступы площадки, на которой укреплена призма, вошли в пазы столика.

4.7. Определить преломляющий угол A_2 призмы. На столик гониометра поставить призму так, чтобы биссектриса преломляющего угла призмы примерно совпала с осью осветительного коллиматора (рис. 4). Боковые грани призмы в этом положении действуют как зеркала. Поворачивая трубу и наблюдая в окуляр, поймать изображение входной щели осветительного коллиматора по направлению отраженных от боковых граней призмы лучей. Поворачивая зрительную трубу, совместить нить окуляра с изображением щели сначала в положении I, затем 2 и при этом снять отсчеты по лимбу гониометра

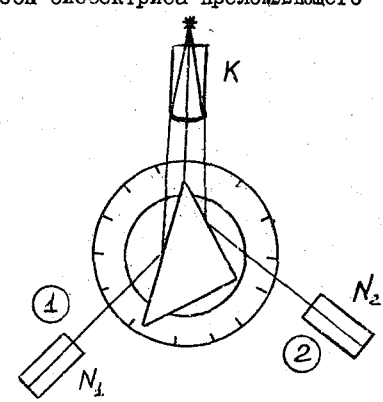


Рис. 4.

N_1 и N_2. При таком положении призмы искомый угол А равен половине угла $\mathcal{D}$, где $\mathcal{D} = N_1 - N_2$. Тогда угол $A = (N_1 - N_2)/2$. Если при перемещении из положения I в положение 2 зрительная труба проходит через ноль лимба, то угол $A = (360^0 - (N_1 - N_2))/2$. Преломляющий угол A_i определить не менее 5 раз (i – номер измерений). Данные записать в табл. I.

Таблица I

Номер опыта i	N_{1i}	N_{2i}	A_i
I			
2			
3			
4			
5			
			$A_{среднее}$

4.8. Определить угол наименьшего отклонения δ_{min}. Для этого прежде всего определяется направление неотклоненного луча, выходящего из коллиматора. Освободить зажим трубы (8) и совместить ее с осью коллиматора. Выполнить точное наведение вертикальной нити трубы на изображение щели и произвести отсчет N_0, соответствующий направлению неотклоненного луча.

Освободить верхний зажим столика и установить призму так, чтобы катет преломляющей призмы, который является одной из сторон преломляющего угла призмы, был примерно перпендикулярен оси коллиматора. В этом положении призмы на столике гониометра найти изображение спектра и, вращая в этом направлении трубу, установить в поле зрения яркую зеленую линию.

При отжатом верхнем винте столика медленно поворачивать его в направлении уменьшения угла отклонения, одновременно двигая трубу за смещающимся изображением зеленой линии. Уловить момент, когда изображение остановится и начнет смещаться в противоположную сторону при неизменном направлении вращения столика. Это положение призмы N_3 соответствует углу наименьшего отклонения

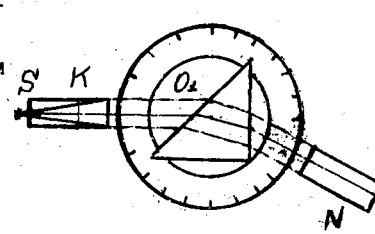


Рис. 5.

δ_{min} для зеленой линии. Закрепить зажим столика.

4.9. Измерить углы отклонения для различных длин волн спектра ртути: желтые (λ = 579,I нм, λ = 577,0 нм), зеленая (λ = 545,I нм), синяя (λ = 436 нм), фиолетовая (λ = 404,7 нм). Для этого измерить положение указанных длин волн спектра, пользуясь микрометрической подачей трубы. Произвести и записать соответствующие отсчеты N_3. Считая, что для всех длин волн спектра призма одновременно находится под углом наименьшего отклонения, можно вычислить углы наименьшего отклонения для всех линий $\delta_{min} = N_3 - N_0$ (табл. 2).

Таблица 2

Номер опыта	λ нм	N_3	N_0	δ_{min}	n
I	579,I				
2	577,0				
3	545,I				
4	436,0				
5	404,7				

5. Обработка результатов измерений

5.I. Определить преломляющий угол А призмы. Для этого вычислить n раз значения преломляющего угла A_i по формуле

$$A_i = \frac{N_{1i} - N_{2i}}{2},$$

затем определить среднее значение А:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i}{n}.$$

5.2. Определить абсолютные погрешности отсчетов по лимбу гониометра ΔN_1, ΔN_2, ΔN_0.

5.3. Определить абсолютную погрешность ΔA.

5.4. Определить углы наименьшего отклонения $\delta_{min} = N_3 - N_0$ для разных длин волн λ.

5.5. Определить абсолютную погрешность $\Delta \delta_{min}$.

5.6. Рассчитать значения показателя преломления для различных длин волн по формуле

$$n = \frac{\sin\frac{\delta_{min} + A}{2}}{\sin\frac{A}{2}} .$$

5.7. Определить абсолютную погрешность Δn .

5.8. По найденным значениям n построить график зависимости n от λ . Точки на графике должны быть указаны с погрешностями Δn и $\Delta\lambda$.

6. Контрольные вопросы

6.I. Какое явление называется дисперсией света?

6.2. Что называется фазовой скоростью распространения в веществе световых волн?

6.3. Существует ли дисперсия в вакууме?

6.4. Что называется абсолютным показателем преломления среды и относительным показателем преломления?

6.5. От каких параметров зависит для диэлектрических сред скорость распространения волн?

6.6. Почему для сред, не обладающих ферромагнитными свойствами, практически можно считать, что показатель преломления среды равен $n \cong \sqrt{\varepsilon}$?

6.7. Как зависит показатель преломления n от частоты ν распространяющихся электромагнитных колебаний?

6.8. Когда дисперсия света называется нормальной и аномальной?

6.9. Какой прибор называется гониометром?

7. Список литературы

I. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Оптика. – М.: Наука, I97I. – Т. 3. – §§ 79–86, I54–I58.

Краткое описание гониометра ГС-5

Гониометр - специальный оптический прибор, предназначенный для измерения с большой точностью углов между оптическими лучами.

Основными частями гониометра являются коллиматорная труба (осветительный коллиматор), зрительная труба, круговой лимб с ноиусом (отсчетный механизм) и измерительный столик, на который устанавливается призма или дифракционная решетка (рис. I).

Коллиматор I установлен на неподвижной стойке массивного основания прибора и представляет собой трубу с объективом, в фокусе которого расположена раздвижная щель с микрометром 2. Фокусирующее устройство позволяет с помощью маховика 3 и шкалы 4 устанавливать щель в фокусе объектива с большой точностью. Так как щель расположена в фокальной плоскости объектива коллиматора, то осветительный коллиматор дает параллельный пучок света, который направляется на призму или дифракционную решетку. Направление оптической оси коллиматора в вертикальной плоскости регулируется винтом 5.

Зрительная труба гониометра имеет устройство и оптические характеристики, аналогичные трубе коллиматора. Труба снабжена набором окуляров, крепящихся, как и щель коллиматора, прижимным винтом 6. Стойка трубы укреплена на подвижной части прибора (алидаде), могущей вращаться вокруг вертикальной оси гониометра, оставаясь направленной всегда по радиусу кругового лимба. Закреп-

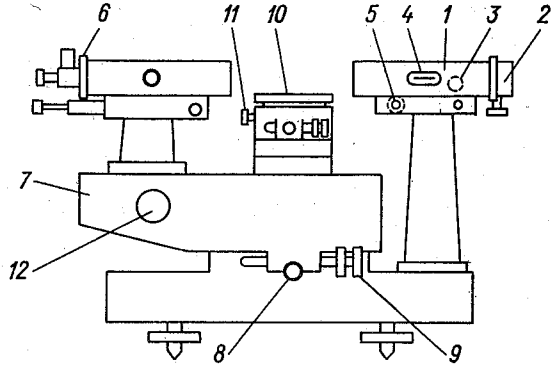


Рис. I. Общий вид гониометра ГС-5.

ление алидады осуществляется зажимом 8. Для микрометрического перемещения алидады служит винт 9. На вертикальной оси гониометра установлен вращающийся столик I0. Столик имеет два зажима с микроподачами: верхний (I3) и нижний (на рис. I не показан). Верхний зажим закрепляет столик на оси и дает ему независимое микрометрическое движение. Нижний зажим позволяет скреплять столик с лимбом гониометра, а также осуществлять их совместное микрометрическое движение. Наклон столика регулируется винтами II. При проведении лабораторной работы винты (II, 5) не вращать, так как при этом нарушается юстировка прибора.

Отсчетное устройство

Для точного измерения углов на оси гониометра помещен стеклянный лимб с нанесенными на нем I080 делениями (I деление = 20′). Изображения штрихов двух противоположных участков лимба оптическим способом передается на микрометр. Принцип действия микрометра состоит в том, что в нем оптическим способом смещаются изображения противоположных участков лимба при одновременном смещении очень точной шкалы микрометра. Поскольку деления лимба нанесены через 20′, то максимальное расстояние между штрихами лимба не превосходит I0′ = 600″. Так как шкала микрометра имеет 600 делений, то одно деление равно I″.

Взаимное перемещение оптических изображений штрихов и шкалы микрометра осуществляется маховиком I2. Поле зрения отсчетного микроскопа показано на рис. 2.

Отсчет по лимбу производится следующим образом.

I. Вращением маховичка I2 точно совмещаются верхние и нижние штрихи, соответствующие противоположным участкам лимба.

2. Число градусов соответствует ближайшей цифре слева от вертикального штриха.

3. Число десятков минут равно числу интервалов между штрихом, соответствующим отсчитанному числу градусов, и нижним, отличающимся от отсчитанного на I80°.

4. Число минут отсчитывается по шкале микрометра в правом окне по левому ряду чисел.

5. Число десятков секунд и секунд отсчитывается в том же окне по правому ряду. На рис. 2 изображен отсчет 0 I5′57″.

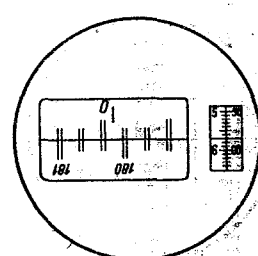


Рис. 2.

Основные правила работы с гониометром

Гониометр является современным высокоточным дорогостоящим прибором, требующим чрезвычайно аккуратного обращения.

Подготовка прибора к работе:

- снять чехол и защитные крышки с объективов коллиматора и трубы;

- включить освещение прибора. При включении тумблера на приборе должны освещаться окулярные нити и отсчетное устройство микроскопа;

- осветить щель, включив спектральную лампу и разместив ее таким образом, чтобы освещение щели было наилучшим. (В лабораторной работе лампа установлена.)

Производство измерений осуществляется следующим образом.

Всякое наведение на изображение щели или спектральной линии должно производиться в два этапа. Сначала, освободив зажимы, крепящие алидаду, выполняем грубое наведение. Для этого вращаем медленно трубу рукой до появления изображения вблизи центра поля зрения. В этом положении труба фиксируется зажимом и дальнейшее точное наведение осуществляется микрометрической подачей. Перед выполнением точного наведения изображение следует сфокусировать фокусировочными винтами трубы и коллиматора 3.

После выполнения работ прибор должен быть приведен в нерабочее положение, а именно:

- выключить электропитание прибора и спектрального источника;

- закрепить зажимами трубу и столик;

- закрыть крышками объективы коллиматора и трубы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 306

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ВОЛЬФРАМА НА ОСНОВЕ ЗАКОНА СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

I. Задача работы

Определить степень "черноты" (степень отклонения излучения данного тела от излучения абсолютно черного тела) вольфрама и исследовать ее зависимость от температуры.

2. Предварительные сведения

Абсолютно черным телом (а.ч.т.) называют тело, поглощающее весь падающий на него поток излучения независимо от спектрального состава излучения и от температуры а.ч.т.

Закон распределения спектральной мощности равновесного излучения, испускаемого единицей поверхности а.ч.т. в зависимости от температуры, выражается формулой Планка

$$E_{\lambda,T} = \frac{2\pi h C^2}{\lambda^5} * \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \qquad (I)$$

где $E_{\lambda,T}$ – спектральная мощность излучения, или лучеиспускательная способность а.ч.т. (энергия, испускаемая единицей поверхности тела за единицу времени при данной температуре и для данной длины волны); h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; c – скорость света; λ – длина волны излучения.

Графическая зависимость $E_{\lambda,T} = E_{\lambda,T}(T)$ представлена на рис. I. Из формулы Планка могут быть получены следующие законы излучения а.ч.т.

Закон Стефана-Больцмана: полная лучеиспускательная способность а.ч.т. (суммарная энергия, испускаемая единицей поверхности тела за единицу времени при данной температуре во всем интервале длин волн) пропорциональна четвертой степени температуры а.ч.т.

$$E_T = \int_0^\infty E_{\lambda,T}\, d\lambda = \sigma T^4; \qquad (2)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м^2.К^4.

Закон смещения Вина: длина волны, на которую приходится максимум излучения а.ч.т., обратно пропорциональна его темпера-

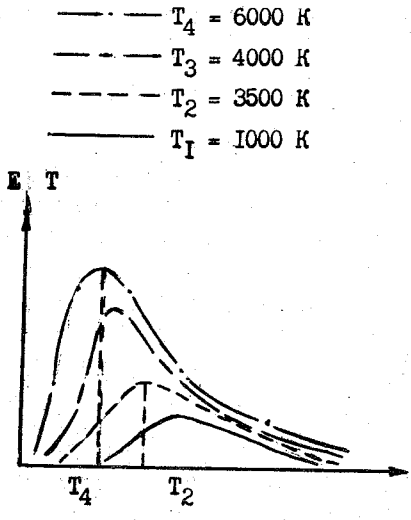


Рис. I. Зависимость спектральной мощности излучения от длины волны.

туре (см. рис. I):

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \qquad (3)$$

где $b = 2{,}89 \cdot 10^{-9}$ (м.К).

Второй закон Вина: максимальное значение лучеиспускательной способности а.ч.т. прямо пропорционально пятой степени температуры:

$$E_{\lambda_{max},T} = c\,T^5, \qquad (4)$$

где $c = 1{,}3 \cdot 10^{-5}$ Вт/м^9.К^5.

Если ввести поправку на отличие излучения данного тела от излучения а.ч.т., то полную лучеиспускательную способность такого нечерного тела E можно представить в виде:

$$E = \alpha\, E_T = \alpha\, \sigma\, T^4,$$

где $\alpha = \frac{E}{E_T}$ – степень черноты (α I).

3. Метод исследования и описание установки

В данной работе излучающим телом является нить накала электролампы Л (рис. 2), изготовленная из вольфрама. Если площадь нити S, то излучаемая мощность

$$N = S\,E_T\,\alpha\,\sigma\,S\,T^4. \qquad (5)$$

С другой стороны, электрическая мощность, потребляемая лампой, может быть вычислена по известной формуле

$$N = I^2 R, \qquad (6)$$

где I и R – соответственно сила тока и сопротивление нити лампы.

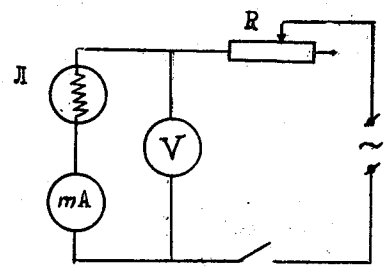


Рис. 2. Схема установки.

Если пренебречь потерями на теплопроводность и нагрев окружающей среды, то мощность, рассчитанную из формулы (5), можно подставить в выражение (6). Тогда искомая степень черноты окончательно выразится как

$$\alpha = \frac{I^2 R}{\sigma S T^4}. \qquad (7)$$

На зависимости α от электрических параметров цепи, в которую включена электролампа (см. формулу (7)), и основан метод определения α в данной работе.

Величины I, R и T находятся следующим образом.

Сопротивление - по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I} - r_a, \qquad (8)$$

где r_a - сопротивление амперметра (сила тока и напряжение на лампе измеряются с помощью амперметра и вольтметра) (см. рис. 2).

Температуру нити накала можно вычислить, учитывая связь температуры с сопротивлением нити лампы:

$$T\,(K) = A + B\left[\frac{R}{R_o}\right] + C\left[\frac{R}{R_o}\right]^2, \qquad (9)$$

где A, B, C - постоянные для вольфрама величины; R_o - сопротивление лампы при $t = 273\ ^{o}C$.

Реостат RI (см. рис. 2) включен как потенциометр. Перемещая его движок, можно получить ряд значений U и I, вычислить соответствующий ряд R, T и α, получить зависимость α от температуры.

---

* При расчете ΔT учесть, что величинами ΔT_A, ΔT_B, ΔT_C, ΔT_{R_o} в данной работе можно пренебречь.

4. Порядок выполнения работы

4.I. С помощью сопротивления RI установить рекомендуемые значения силы тока I (см. таблицу).

4.2. Измерить напряжение в цепи при каждом значении силы тока. Данные занести в таблицу.

Таблица

№ п/п	I мА	U В	R Ом	Т К	α
I	50				
2	60				
3	70				
4	80				
5	90				
6	I00				

5. Обработка результатов измерений

5.I. Вычислить сопротивление R по формуле (8) для каждого I и U.

5.2. Вычислить температуру Т по формуле (9) для каждого R.

5.3. Вычислить α по формуле (7) для каждого I и U.

5.4. Построить график $\alpha = f(T)$.

Значения констант

τ_a = 5 Ом в диапазоне 50÷I00 мА;
τ_a = 20 Ом в диапазоне 0÷50 мА;
R_o = I57 Ом;
A = I44 К;
B = I78,3 К;
C = -I,284 К;
σ = 5,67.$I0^{-8}$ Вт/м^2.К^4;
S = 50 мм^2.

6. Контрольные вопросы

6.I. Что называется лучеиспускательной способностью?

6.2. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана.

6.3. Как формулируется закон смещения Вина?

6.4. Сформулируйте второй закон Вина.

6.5. Поясните, каким образом рис. I иллюстрирует законы Планка, Стефана-Больцмана и Вина.

6.6. Почему лучеиспускательная способность нечерного тела меньше, чем черного, при одинаковой температуре тел и для любой длины волны?

7. Список литературы

I. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1989. – Т. 3. – §§ 49–53.

2. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М.: Наука, 1974. – Т. 3. – §§ 30–34.

ПРИЛОЖЕНИЕ К ОПИСАНИЮ РАБОТЫ № 306

ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА СТЕПЕНИ "ЧЕРНОТЫ" ТЕЛА
(для ПМК Электроника Б3-34, МК-56)

адр.	ком.	код	адр.	ком.	код	адр.	ком.	код
00	П1	41	12	x	12	25	ИПА	6-
01	ХУ	14	13	П6	46	26	+	10
02	ИП3	63	14	С/П	50	27	+	10
03	÷	13	15	ИП5	65	28	С/П	50
04	П2	42	16	ИП0	60	29	Fx^2	22
05	÷	13	17	÷	13	30	Fx^2	22
06	ИП4	64	18	▲	0Е	31	ИПД	6Г
07	-	11	19	Fx^2	22	32	x	12
08	П5	45	20	ИПС	6С	33	ИП6	66
09	С/П	50	21	x	12	34	ХУ	14
10	ИП2	62	22	ХУ	14	35	÷	13
11	Fx^2	22	23	ИПВ	6Л	36	С/П	50
			24	x	12			

Инструкция к использованию

1. Ввести программу (В/О: ПРГ ..... АВТ).
2. Ввести константы R_o (Ом) → П0; 1000 → П3; z_a (Ом) → П4;
A → ПА; в → ПВ; с → ПС;

произведение $\left[s\ (м^2) * \sigma \left[\frac{Вт}{м^2\ К^4} \right] \right]$ → ПД.

3. Ввести пару значений
I (мА); U (В).
4. Запустить программу:
а) В/О; С/П - прочитать на индикаторе значение R (Ом) и занести в таблицу;
б) С/П - прочитать значение N (Вт);
в) С/П - прочитать значение Т (К) и занести в таблицу;
г) С/П - прочитать значение α и занести в таблицу.
5. Если данные не исчерпаны, вернуться к п. 3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 307

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ САХАРА С ПОМОЩЬЮ САХАРИМЕТРА

I. Задача работы

Определить концентрацию сахара с помощью сахариметра.

2. Предварительные сведения

2.I. С волновой точки зрения свет – это электромагнитная волна, распространяющаяся в пространстве со скоростью 3.10^8 м/с (в вакууме или в воздухе). Электромагнитные волны представляют собой последовательность взаимных превращений электрического и магнитного полей, которые характеризуются векторами напряженности электрического поля $\vec{E}$ и магнитного поля $\vec{H}$ (рис. 1). Оба вектора колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Вектор скорости распространения волны перпендикулярен плоскостям, в которых колеблются векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$.

Плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{E}$, называется плоскостью колебаний, а плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{H}$, – плоскостью поляризации.

В большинстве оптических явлений при взаимодействии света с

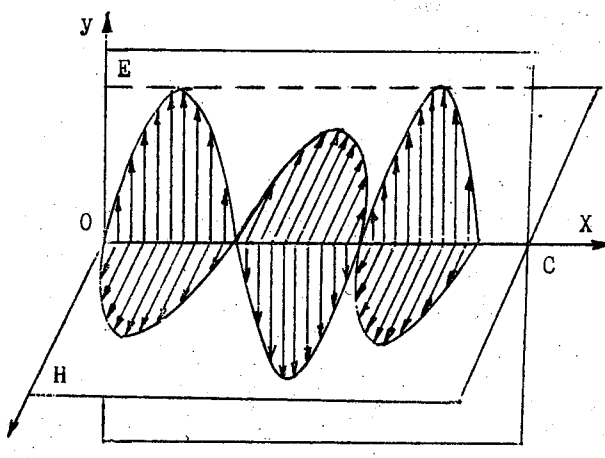


Рис. I.

веществом основную роль играет вектор $\vec{E}$. Так, фотохимическое, фотоэлектрическое, физиологическое действие света вызывается воздействием электрического поля. Поэтому в дальнейшем будем говорить лишь о векторе $\vec{E}$.

Световые волны возникают в результате испускания света атомами или молекулами. Для каждого элементарного акта испускания света атомом или молекулой плоскость колебаний вектора $\vec{E}$ однозначно определена. Но в любом самом малом источнике света каждое мгновение происходит громадное число актов испускания. Следовательно, в естественном луче (луче, идущем от какого-либо источника света и не проходящем через специальные поляризационные приспособления) имеются колебания вектора $\vec{E}$ всех направлений. Опыт показывает, что некоторыми приемами можно ослабить или даже совершенно устранить колебания в какой-либо плоскости. Луч, в котором колебания вектора $\vec{E}$ совершаются только в одной плоскости, называется полностью поляризованным. Луч, в котором колебания в какой-либо плоскости ослаблены, называется лучом, частично поляризованным.

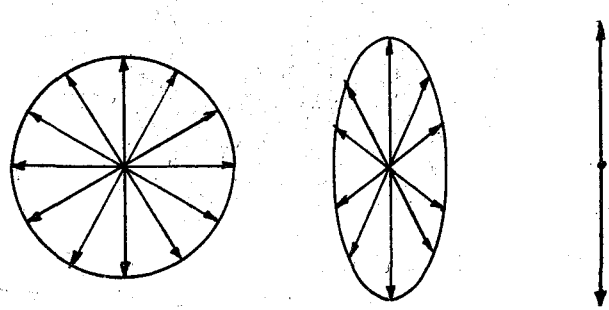
На рис. 2 схематически показаны направления колебаний вектора $\vec{E}$ в лучах (вектор скорости $\vec{c}$ направлен на нас):

а – естественном;

б – частично поляризованном;

в – полностью поляризованном.

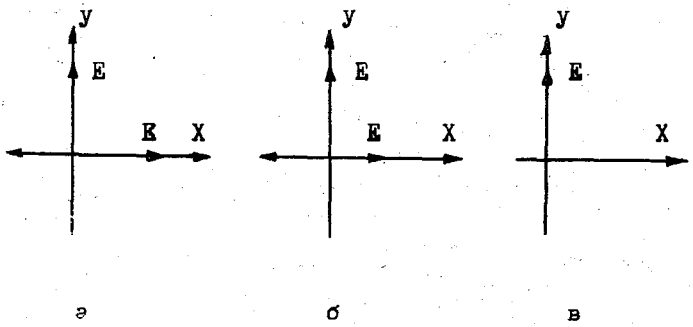
Любой вектор можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие. Поскольку в естественном луче присутствуют всевозможные направления колебаний, то суммы проекций всех векторов на оси x и y будут равны (рис. 3 а). В частично поляризован-



а б в

Рис. 2.

ном луче сумма проекций вектора $\vec{E}$ на одну из осей будет больше ($|E_y| > |E_x|$, рис. 3 б). В полностью поляризованном луче проекция вектора $\vec{E}$ на одну из осей будет равна нулю (рис. 3 в).



а б в

Рис. 3.

Существуют два различных способа получения поляризованного света из естественного. Первый способ основан на использовании явления двойного лучепреломления, второй – на явлении поляризации света при отражении от диэлектриков.

Явление двойного лучепреломления. Закон Малюса

Явление двойного лучепреломления заключается в том, что упавший на кристалл луч разделяется внутри кристалла на два луча, распространяющиеся с разными скоростями и в различных направлениях (рис. 4). Один из этих лучей называется обыкновенным (он подчиняется обычному закону преломления), другой – необыкновенным

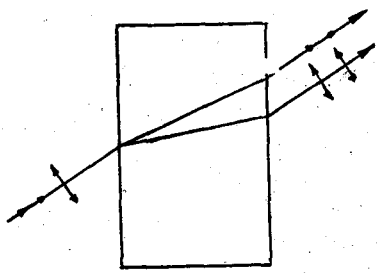


Рис. 4.

(для него отношение синуса угла падения к синусу угла преломления не остается постоянным при изменении угла падения. Кроме того, необыкновенный луч не лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к преломляющей поверхности).

Существует ряд приборов и приспособлений для получения из естественного света поляризованного. Наиболее распространены призмы Николя и поляроиды.

Призма Николя пространственно разделяет обыкновенный и необыкновенный лучи. Призмы Николя вытачиваются из кристалла исландского шпата, обладающего свойством двулучепреломления. Две половины призмы склеиваются канадским бальзамом (рис. 5). Естественный свет, преломляясь в исландском шпате, делится на два полностью поляризованных луча. Обыкновенный луч поляризован в плоскости, перпендикулярной чертежу, необыкновенный - в плоскости чертежа. Обыкновенный луч претерпевает полное внутреннее отражение на слое канадского бальзама (поскольку показатель преломления бальзама меньше показателя преломления призмы) и поглощается зачерненной оправкой призмы. Необыкновенный луч выходит полностью поляризованным.

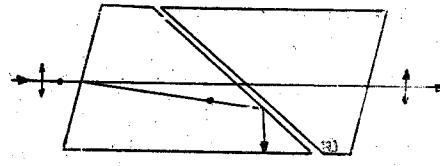
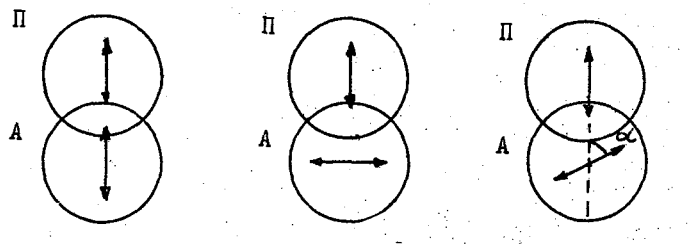


Рис. 5.

Прибор или приспособление, с помощью которого из естественного света получают поляризованный, называется поляризатором. Если на пути поляризованного луча поставить еще один такой прибор или приспособление - анализатор, то можно определить (проанализировать) плоскость колебаний. Эти приборы (анализатор и поляризатор) свободно пропускают колебания, параллельные плоскости, которая называется плоскостью поляризатора, и полностью задерживают колебания, перпендикулярные этой плоскости.

На рис. 6 приведены примеры поляризаторов с раздично ориентированными в пространстве плоскостями. Если плоскости поляризатора и анализатора параллельны, то поляризованный свет пройдет через анализатор без изменения интенсивности (рис 6 а). Если же



а б в

Рис. 6.

плоскости перпендикулярны, то анализатор не пропустит света (рис. 6 б). Если плоскости анализатора и поляризатора составляют некий угол α (рис. 6 в), то связь между интенсивностями падающего на анализатор и вышедшего из анализатора света дается законом Малюса

$$I_2 = I_1 \cos^2\alpha, \qquad (I)$$

где I_1 – интенсивность света, вышедшего из поляризатора; I_2 – интенсивность света, вышедшего из анализатора; α – угол между плоскостями анализатора и поляризатора.

Покажем, почему получается такая зависимость между интенсивностями. Интенсивность света – это световая энергия, проходящая за единицу времени через поверхность единичной площади. Пусть после прохождения света через поляризатор амплитуда колебаний вектора напряженности электрического поля равна E_I и колебания происходят по направлению АВ (рис. 7). Плоскость анализатора повернута по отношению к плоскости поляризатора на угол α, следовательно, анализатор пропустит лишь составляющую E_2, колеблющуюся вдоль направления CD. Составляющая E_3 анализатором пропущена не будет. Амплитуды находятся в соотношении $E_2 = E_I \cos\alpha$, а интенсивности – в соотношении

$$I_2 = \frac{k E_2^2}{2} = \frac{k E_1^2 \cos^2\alpha}{2} = I_1 \cos^2\alpha . \qquad (II)$$

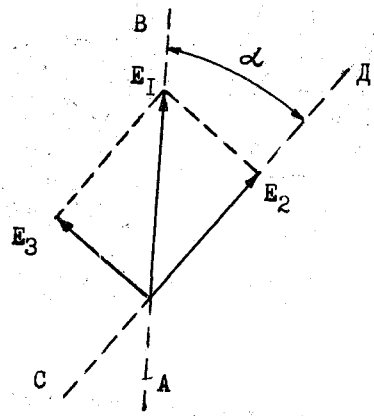


Рис. 7.

2.2. Есть вещества, которые обладают свойством поворачивать плоскость поляризации проходящего через них поляризованного луча на некоторый угол. Такие вещества называются оптически активными. К ним относятся кварц, винная кислота, водные растворы сахара, нефть и др. Явление вращения плоскости поляризации обусловлено асимметрией в строении молекул данного вещества. Такое явление легло в основу метода определения концентрации оптически активных растворов. Угол поворота плоскости поляризации пропорционален длине пути светового луча в растворе ℓ и концентрации раствора c:

$$\alpha = \gamma \, c \, l \,, \qquad (3)$$

где γ – удельное вращение, численно равное углу, на который поворачивается плоскость поляризации света, прошедшего через раствор единичной концентрации и единичной толщины. Величина удельного вращения зависит от природы вещества и длины волны света.

3. Метод исследования и описание установки

Явление вращения плоскости поляризации легло в основу прибора для определения концентрации раствора сахара (сахариметра). Схема простейшего сахариметра представлена на рис. 8. Между двумя

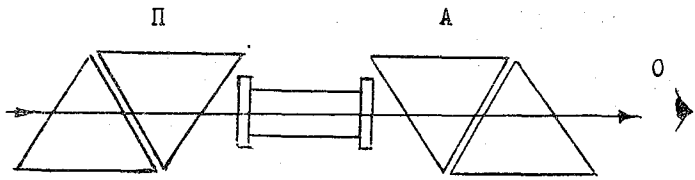


Рис. 8.

николями П и А расположена кювета, закрытая плоскопараллельными окошками.

При отсутствии раствора в кювете николи (П и А) устанавливают "на темноту", т.е. так, чтобы их плоскости поляризации были перпендикулярны. При заполнении кюветы раствором поле зрения окуляра, находящегося после А (см. рис. 8), просветляется. Для того чтобы снова сделать поле темным, надо повернуть николь-анализатор А (или поляризатор П) на некоторый угол, который и определит поворот плоскости поляризации в растворе.

Установка прибора "на темноту" (минимум освещенности) является более точной, чем на максимум освещенности, в силу физиологических особенностей глаза, более чувствительного к изменению малых интенсивностей света.

Однако при пользовании только поляризатором и анализатором с помещенным между ними раствором точно определить угол вращения плоскости поляризации невозможно, так как анализатор можно поворачивать на небольшой угол влево и вправо без заметного изменения освещенности поля зрения. Поэтому в сахариметрах существует дополнительное приспособление, позволяющее фиксировать угол вращения более точно. Это кварцевый компенсатор (рис. 9), который состоит из двух пластинок природного кварца N и K, отличающихся

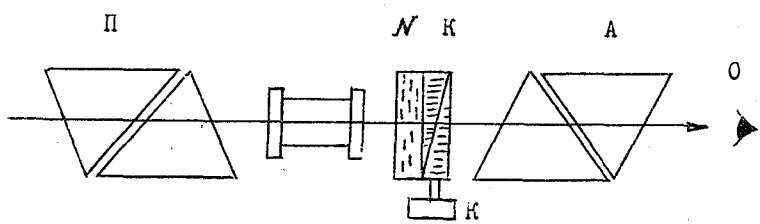


Рис. 9.

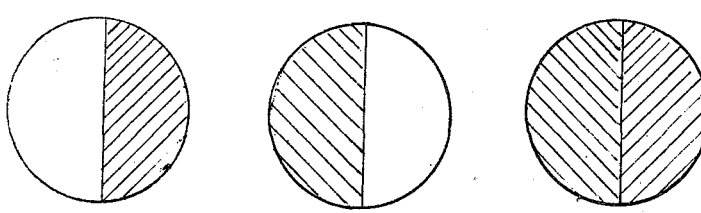
тем, что одна пластинка вращает плоскость поляризации вправо (по часовой стрелке), другая - влево (против часовой стрелки). Если толщина пластинок одинакова, то действия их взаимно уничтожаются и введение компенсатора не влияет на вращение плоскости поляризации. В сахариметре пластинка K из левовращающего кварца делается переменной толщины (два скользящих друг по другу клина). Теперь поворот вправо плоскости поляризации раствором сахара можно скомпенсировать, меняя толщину левовращающей пластинки из кварца с помощью винта компенсатора K.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Установить прибор на нуль шкалы. Без кюветы с раствором, вращая нижний окуляр, добиться отчетливого изображения поля зрения, состоящего из двух половинок (рис. 10 а или б). Затем, поворачивая верхний окуляр, добиться отчетливого изображения шкалы прибора с нониусом. После этого вращать винт компенсатора K до тех пор, пока обе половины поля зрения не будут одинаково темными (рис. 10 в). Вследствие неточной взаимной компенсации двух кварцевых пластинок возможно некоторое смещение нуля, поэтому установку нуля произвести несколько раз и каждый раз по шкале определить "нулевой отсчет" α_0. Данные занести в таблицу.

4.2. Поместить трубку с раствором сахара известной концентрации в прибор. Вследствие поворота плоскости поляризации при прохождении света через раствор обе половины поля зрения будут освещены по-разному. Вращением винта K вновь сделать поле одинаково темным в обеих половинках. Опыт повторяет несколько раз и каждый раз по шкале делают отсчет α_1. Данные занести в таблицу.

4.3. Вместо известного раствора в прибор поместить испытуемый раствор и проделать то же с ним. Взять отсчет α_2 также не-



а) б) в)

Рис. 10.

Таблица

Номер измерения	Измеряемая величина		
	α_0	α_1	α_2
I 2 3 4 5			
Среднее			

сколько раз. Данные занести в таблицу.

5. Обработка результатов измерений

Разность отсчетов $\alpha_1 - \alpha_0$ дает вращение плоскости поляризации известным раствором в делениях шкалы сахариметра. Так как угол вращения пропорционален концентрации, то, очевидно, однопроцентный раствор вызвал бы вращение плоскости поляризации на

$$\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{n} \quad \text{или} \quad \frac{\alpha_2 - \alpha_0}{x},$$

где n – концентрация известного раствора, а x – неизвестного.

Отсюда

$$\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{n} = \frac{\alpha_2 - \alpha_0}{x}, \tag{4}$$

или

$$x = n \frac{\alpha_2 - \alpha_0}{\alpha_1 - \alpha_0}. \tag{5}$$

Средние значения α_0, α_1, α_2 подставить в формулу (5) и вычислить результат.

6. Контрольные вопросы

6.1. Что такое световой луч с точки зрения волновой теории?

6.2. Как взаимно ориентированы векторы $\vec{E}$, $\vec{H}$, $\vec{S}$?

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

6.4. Что называется плоскостью колебаний и плоскостью поляризации луча?

6.5. В чем суть явления двойного лучепреломления?

6.6. Как устроена призма Николя? Что такое поляризатор, анализатор?

6.7. Сформулируйте закон Малюса.

6.8. От каких параметров зависит угол поворота плоскости поляризации водным раствором сахара?

6.9. Как работает кварцевый компенсатор?

7. Список литературы

I. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1989. - Т. 2. - §§ 134-136, 138, 141.

2. Зисман С.А., Тодес О.М. Курс общей физики. - М.: Наука, 1974. - Т. 3. - §§ 17-19.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 308

ЗАКОН БРЮСТЕРА И ЗАКОН МАЛЮСА

I. Задачи работы

I. Определение показателя преломления стекла с использованием закона Брюстера.

2. Экспериментальная проверка закона Малюса.

2. Предварительные сведения

2.I. Волновая природа света. Естественный и поляризованный свет.

С волновой точки зрения свет - это электромагнитная волна, распространяющаяся в вакууме (или воздухе) со скоростью $\vec{c}$ = $= 3.10^8$ м/с. Электромагнитные волны характеризуются колебаниями вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ и вектора напряженности магнитного поля $\vec{H}$ (рис. I). Оба вектора колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Вектор скорости распространения волны перпендикулярен векторам $\vec{E}$ и $\vec{H}$. Такая волна, где $\vec{E}$, $\vec{H}$ и $\vec{C}$ взаимно перпендикулярны, называется поперечной.

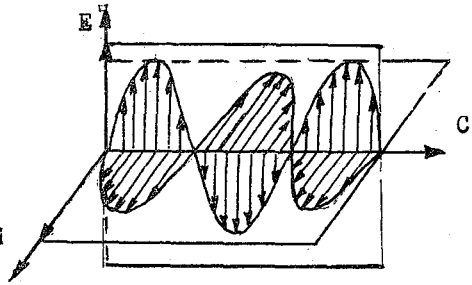


Рис. I. Взаимное расположение векторов напряженности электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей и вектора скорости $\vec{c}$ в электромагнитной волне.

В большинстве оптических явлений при взаимодействии света с веществом основную роль играет вектор $\vec{E}$. Например, фотохимическое, фотоэлектрическое, физиологическое действие света вызывается в основном электрическим, а не магнитным полем световой волны.

Свет, испускаемый естественными источниками, представляет

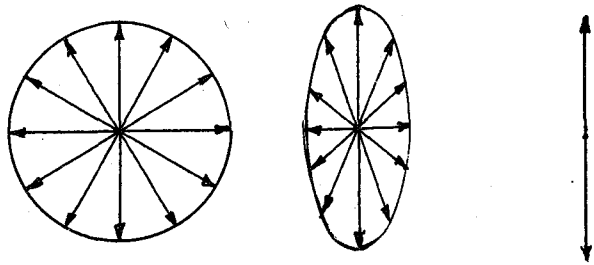


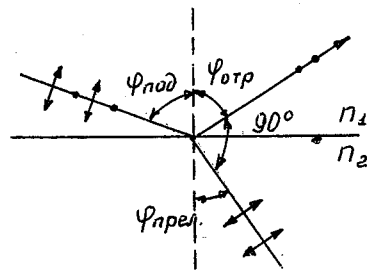
Рис. 2. Ориентация плоскостей колебаний вектора $\vec{E}$ в лучах света (считаем, что вектор $\vec{c}$ направлен на нас).

Свет: а – естественный, б – частично поляризованный, в – полностью поляризованный.

собой набор волн, электрические векторы $\vec{E}$ которых колеблются во всевозможных направлениях в плоскости, перпендикулярной направлению скорости распространения светового луча (на рис. 2 эта плоскость совпадает с плоскостью чертежа). Такой свет называется естественным, или неполяризованным (рис. 2 а). Если в плоскости, перпендикулярной вектору скорости световой волны $\vec{c}$, колебания вектора $\vec{E}$ имеют некоторые преимущественные направления (т.е. вероятность колебания вектора $\vec{E}$ в этом направлении заметно больше, чем в любом другом, рис. 2 б), то такой свет называется частично поляризованным. Свет называется полностью поляризованным, если в нем колебания вектора $\vec{E}$ совершаются только в одном направлении в плоскости, перпендикулярной вектору $\vec{c}$ (рис. 2 в). При этом плоскость, проходящая через направления вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$ световой волны и вектора скорости распространения $\vec{c}$, называется плоскостью колебаний, а плоскость, перпендикулярная ей и проходящая через вектор $\vec{c}$, называется плоскостью поляризации. В этой плоскости в полностью поляризованном свете совершаются колебания вектора напряженности магнитного поля $\vec{H}$ световой волны.

2.2. Поляризация при отражении. Закон Брюстера.

Получить поляризованный свет из неполяризованного можно при отражении света от поверхности диэлектрика. При этом степень поляризации отраженного луча зависит от угла, под которым естественный луч падает на поверхность диэлектрика. При падении под углом, который называется углом полной поляризации или углом Брюс-



⟷ – колебание вектора $\vec{E}$ в плоскости падения;

· – колебание вектора $\vec{E}$ перпендикулярно к плоскости падения.

Рис. 3. К пояснению физического смысла закона Брюстера.

тера (рис. 3), отраженный свет на 100 % поляризован – вектор $\vec{E}$ колеблется только в плоскости, перпендикулярной плоскости падения светового луча (плоскости чертежа). При таком угле падения в преломленном луче компонента света с плоскостью колебаний вектора $\vec{E}$, лежащей в плоскости чертежа, целиком проходит в прозрачную среду, а другая компонента с плоскостью колебаний, перпендикулярной плоскости чертежа, – частично, поэтому прошедший свет не имеет 100 %-ной поляризации.

Угол Брюстера связан с показателем преломления сред по обе стороны границы их раздела соотношением:

$$\operatorname{tg} \Phi_{Br} = n_{21} = n_2/n_1. \qquad (I)$$

где Φ_{Br} – угол падения луча на границу двух сред (угол Брюстера); n_{21} – относительный показатель преломления двух диэлектриков; n_1 – абсолютный показатель преломления первой среды (из которой падает свет); n_2 – абсолютный показатель преломления второй среды.

Уравнение (I) известно как закон Брюстера, названный так в честь шотландского физика Дэвида Брюстера (1781–1868).

Отметим, что при падении под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи образуют угол 90°, т.е. $\Phi_{пад} + \Phi_{прел} = 90^0$. В этом можно убедиться, подставив соотношение (I) в основной закон преломления $n_1 \sin \Phi_{пад} = n_2 \sin \Phi_{прел}$ и получив равенство $\cos \Phi_{пад} = \sin \Phi_{прел}$, которое справедливо только для $\Phi_{пад} =$

$= 90^{\circ} - \varphi_{прел}$.

2.3. Явление двойного лучепреломления. Закон Малюса.

Явление двулучепреломления открыто в 1669 г. Бартолинусом (1625-1698). Если на кристалл исландского шпата в виде ромбоэдра падает узкий пучок естественного света, то, преломляясь, он делится на два луча, полностью поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях и равных по интенсивности. Один из этих лучей называют обыкновенным, другой - необыкновенным. Различие в отклонении обоих лучей показывает, что по отношению к ним кристалл обладает разными показателями преломления. Обыкновенный луч в кристалле исландского шпата имеет для всех направлений преломленных лучей внутри кристалла одно и то же значение показателя преломления $n_o = 1{,}658$; показатель преломления необыкновенного луча n_e зависит от направления луча в кристалле и может принимать все значения между 1,486 и 1,658. Обыкновенный луч поляризован в плоскости, перпендикулярной чертежу (на рис. 4 колебание вектора $\vec{E}$ перпендикулярно плоскости падения луча, а необыкновенный луч поляризован в плоскости чертежа).

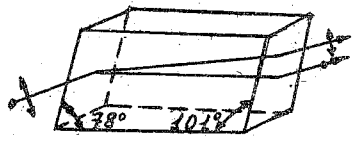


Рис. 4. Двойное лучепреломление.

Поляризованный свет можно получить из естественного при помощи специальных устройств, называемых поляризаторами. Их действие основывается на поляризации света при отражении от поверхности диэлектриков, а также на явлениях двойного лучепреломления и дихроизма. Эти же устройства можно использовать и в качестве анализаторов - устройств, предназначенных для определения характера и степени поляризации света. Плоскость, в которой поляризатор или анализатор пропускают колебания, называется плоскостью поляризации поляризатора или анализатора. Осью поляризации поляризатора (не путать с оптической осью поляризатора и анализатора) называется линия, лежащая в плоскости поляризации и перпендикулярная оптической оси поляризатора.

В качестве поляризаторов наиболее часто применяются поляризационные призмы (например, призмы Николя) и поляроиды (поляроидные пленки).

Призмы Николя вытачиваются из кристалла исландского шпата, обладающего свойством двулучепреломления. Две половины призмы склеиваются канадским бальзамом (показатель преломления канадско-

го бальзама n = I,550 лежит между значениями показателей преломления n_o и n_e для обыкновенного и необыкновенного лучей) Углы в призме Николя рассчитаны так, чтобы при подходящем угле падения на грань призмы обыкновенный луч претерпевал полное внутреннее отражение на слое канадского бальзама и поглощался зачерненной боковой гранью (или оправкой) призмы, а необыкновенный луч выходил полностью поляризованным (рис. 5).

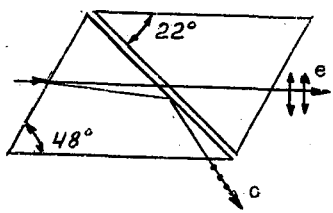


Рис. 5. Призма Николя.

На рис. 6 приведены примеры поляризаторов с различно ориентированными в пространстве осями поляризации. Если оси поляризации поляризатора (П) и анализатора (А) параллельны, то поляризованный свет пройдет через анализатор без изменения интенсивности (рис. 6 а). Если же оси поляризации перпендикулярны, то анализатор не пропустит света (рис. 6 б). Если оси поляризации анализатора и поляризатора составляют некий угол α (рис. 6 в), то связь между интенсивностями падающего из поляризатора на анализатор и вышедшего из анализатора света (рис. 7) дается законом Малюса

$$I_2 = I_1 \cos^2\alpha, \qquad (2)$$

где I_1 – интенсивность света, вышедшего из поляризатора; I_2 – интенсивность света, вышедшего из анализатора; α – угол между осями поляризации анализатора и поляризатора.

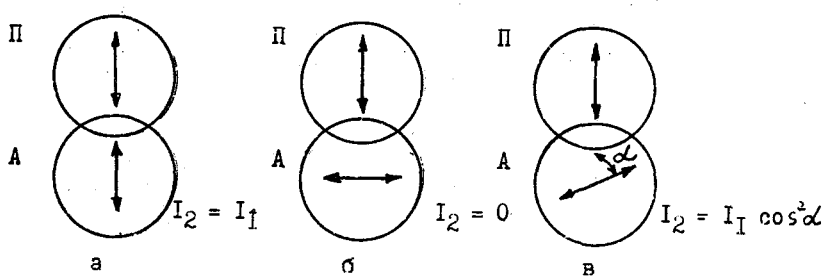


Рис. 6. Связь взаимного расположения осей поляризации двух поляризаторов с интенсивностью света после прохождения поляризаторов.

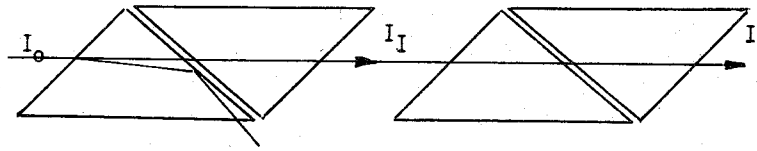


Рис. 7. Иллюстрация к закону Малюса.

Интенсивность I_1 света, вышедшего из поляризатора, равна половине интенсивности I_0 естественного света, падающего на поляризатор ($I_1 = I_0/2$).

Покажем, почему получается такая зависимость между интенсивностями I_1 и I_2. Интенсивность света численно равна световой энергии, проходящей за единицу времени через поверхность единичной площади. Как известно из теории колебаний, энергия w пропорциональна квадрату амплитуды E_0 колебания вектора $\vec{E}$ с коэффициентом пропорциональности k

$$w = \frac{k E_0^2}{2} . \qquad (3)$$

Пусть после прохождения света через поляризатор амплитуда колебаний вектора напряженности электрического поля равна $E_{0,1}$ и колебания происходят по направлению АВ (рис. 8). Ось поляризации анализатора повернута по отношению к оси поляризации поляризатора на угол α. Разложим $E_{0,1}$ на вектор $E_{0,2}$, параллельный оси АС анализатора, и вектор $E_{0,3}$, перпендикулярный ей. Анализатор пропустит лишь составляющую $E_{0,2}$, колеблющуюся вдоль направления АД. Составляющая $E_{0,3}$ анализатором пропущена не будет. Амплитуды находятся в соотношении $E_{0,2} = E_{0,1} \cos\alpha$, а интенсивности – в соотношении

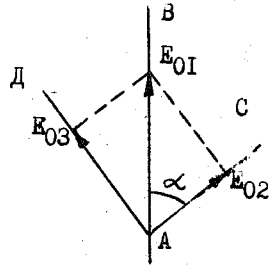


Рис. 8.

$$I_2 = \frac{k E_{0,2}^2}{2} = \frac{k E_{0,1}^2 \cos\alpha}{2} = I_1 \cos^2\alpha . \qquad (4)$$

Если между двумя поляризаторами, оси поляризации которых

составляют угол 90^0, поместить еще один поляризатор, ось поляризации которого составляет угол α с осью поляризации первого поляризатора, то свет снова появится там, где его прежде не было (после анализатора)! Каким образом дополнительный поляризатор "создает" свет? Чтобы объяснить это, предположим, что на средний поляризатор падает свет, интенсивность которого равна $I_1 = I_0/2$. За средним поляризатором свет будет поляризован под углом α и иметь интенсивность $I_1' = I_1 \cos^2\alpha$. Ось последнего поляризатора составляет угол ($\pi/2 - \alpha$) с плоскостью поляризации света. Следовательно,

$$I_2 = I_1' \cos^2(\pi/2 - \alpha) = (I_1 \cos^2\alpha) \cos^2(\pi/2 - \alpha) = \frac{I_1 \sin^2 2\alpha}{4} . \quad (5)$$

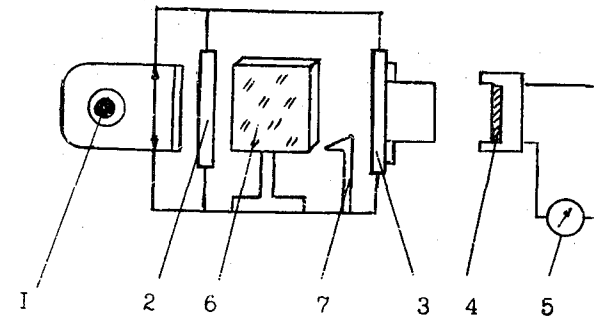
Это выражение имеет максимальное значение при $\alpha = 45^0$, причем в случае идеальных поляризаторов окончательно интенсивность I_2 составляет I/8 от I_0.

3. Метод исследования и описание установки

Лабораторная установка (рис. 9) состоит из двух осветителей I (на рисунке изображен только один из них), поляризатора 2, анализатора 3, фотоэлемента 4, гальванометра 5, столика со стеклом 6 и указателя направления оптической оси анализатора 7.

В первой части работы включается боковой осветитель (не показанный на рисунке). Осветитель состоит из лампы накаливания, оптического конденсора (линзы) и матового стекла. На выходе осветителя получается близкий к параллельному пучок света. Свет, вышедший из осветителя, падает на плоскопараллельную пластинку 6 и, отражаясь от нее, попадает в анализатор 3, снабженный лимбом, градуированным от 0 до 360^0. На столике с плоскопараллельной пластинкой укреплен транспортир.

Во второй части работы неполяризованный свет от источника света 1 (лампы накаливания) поляризуется, проходя сквозь поляроидную пленку 2. Далее этот свет проходит через второй поляроид 3, который можно вращать вокруг оптической оси установки. Интенсивность света, прошедшего через поляроид 3, измеряется с помощью фотоэлемента 4 и гальванометра 5.



1 - осветитель, 2 - поляризатор, 3 - анализатор с лимбом, 4 - фотоэлемент, 5 - гальванометр, 6 - столик со стеклом и транспортиром, 7 - указатель направления оптической оси анализатора.

Рис. 3. Принципиальная схема установки.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Определение показателя преломления стекла на основании закона Брюстера.

4.1.1. Включите боковой осветитель. Осветитель I выключите. Закройте шторку фотоэлемента 4 и снимите его с оправки анализатора. В окуляр анализатора вы увидите два четких изображения выходной щели поляризатора.

4.1.2. Вращая анализатор, добейтесь минимальной освещенности левого изображения щели.

4.1.3. Слегка поворачивая столик 6, стараясь сделать изображение почти невидимым, добейтесь минимальной интенсивности изображения щели. Если интенсивность изображения не равна нулю, то последовательно повторите действия, предусмотренные в п. 4.1.2 и 4.1.3.

4.1.4. По внутренней шкале транспортира, прикрепленного к столику, на котором стоит пластинка, снимите значение угла отражения ϕ (угла между пластиной и отраженным лучом). Значение угла отражения, равного углу падения ϕ_{Br}, можно получить по формуле

$$\Phi_{Br} = 90^{\circ} - \phi, \qquad (6)$$

4.1.5. Повторяя указанное в п. 4.1.1-4.1.4 пять раз, получите пять значений угла ϕ_i (i = 1...5) для данной плоскопараллельной пластинки.

4.2. Проверка закона Малюса.

4.2.1. Поверните столик 6 так, чтобы стеклянная пластинка располагалась параллельно световому пучку от осветителя 1.

4.2.2. Фотоэлемент 4 должен быть подключен к гальванометру 5. Проверьте затемнение установки: при выключенном осветителе стрелка гальванометра должна стоять на нуле. Включите осветитель 1.

4.2.3. Лимб анализатора, по которому будут определяться углы между осями поляризатора и анализатора, поставьте на отсчет 0^0. При этом оси поляризатора и анализатора параллельны. Возьмите первый отсчет $I_1 = I_2$ при угле $\alpha = 0^0$.

4.2.4. Поворачивая анализатор с лимбом от 0 до 360^0 через каждые 10^0, возьмите отсчеты интенсивности I_2 по гальванометру. Данные занесите в таблицу.

Таблица

I_1	Угол α	I_2	$\pm\sqrt{I_2/I_1}$

4.2.5. Занесите в рабочий журнал параметры измерительных приборов (гальванометра и угломерного устройства), необходимые для определения погрешности измеренных величин.

5. Обработка результатов измерений

5.1. Определение относительного показателя преломления стекла на основании закона Брюстера.

5.1.1. По данным эксперимента определите среднее арифметическое значение величины угла ϕ из пяти значений ϕ_i. Используя формулу (6), определите величину угла ϕ_{Bz}.

5.1.2. По формуле (1) определите величину относительного показателя преломления стекла, из которого изготовлена плоскопараллельная пластинка.

5.2. Проверка закона Малюса.

5.2.1. Произведите вычисление величины y : $y = \pm\sqrt{I_2/I_1}$. Результаты вычислений занесите в таблицу. Обратите внимание, что

знак "+" перед корнем квадратным ставится при значениях угла α от 0 до 90 и от 270 до 360^0, а знак "-" - от 90 до 270^0.

5.2.2. Постройте на миллиметровой бумаге график зависимости величины $\sqrt{I_2/I_1}$ от угла α. Все значения экспериментальных величин должны быть указаны с погрешностями. На этом же чертеже постройте график теоретической косинусоиды. Сравните экспериментальные и теоретические значения. Закон Малюса выполняется, если теоретическая кривая проходит в пределах доверительных площадей экспериментальных точек.

5.2.6. Для более точной проверки закона Малюса постройте график зависимости функции $\arccos(\pm\sqrt{I_2/I_1})$ от угла α.

6. Контрольные вопросы

6.1. Что такое световая волна с точки зрения волновой теории?

6.2. Как взаимно ориентированы векторы $\vec{E}$, $\vec{H}$, $\vec{C}$ в световой волне?

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

6.4. Что называется плоскостью колебаний и плоскостью поляризации луча?

6.5. В чем суть явления двойного лучепреломления?

6.6. Как устроена призма Николя? Что такое поляризатор, анализатор? Что называется осью поляризации поляризатора? Как работает поляроидная пленка?

6.7. Сформулируйте закон Малюса.

6.8. Сформулируйте закон Брюстера.

6.9. Можно ли проверить выполнение закона Малюса, построив график зависимости функции $\arccos(\pm\sqrt{I_2/I_1})$ от угла α? Ответ обоснуйте.

7. Список литературы

I. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Колебания, волны. Оптика. Строение атома. - М.: Наука, 1971. - Т. 3. - §§ 139-143.

2. Ландсберг Г.С. Общий курс физики. Оптика. - М.: Наука, 1976. - §§ 101-108.

3. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1979. - Т. 2. - §§ 134-136, 138, 141.

4. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М., 1972. – Т. 3. – §§ 17–19.

5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980. – Т. 4. – §§ 62, 65, 69, 77.

6. Орир Дж. Физика. – М.: Мир, 1981. – Т. 2. – Гл. 23. – § 2. – Приложение.

7. Джанколи Д.К. Физика. – М.: Мир, 1989. – Т. 2. – §§ 38.1. 38.2, 38.4, 38.6.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 309

МАГНИТНОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА (ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ)

I. Задачи работы

I. Исследование эффекта Фарадея (вращения плоскости поляризации света в магнитном поле).

2. Вычисление постоянной Верде.

2. Предварительные сведения

2.I. Электромагнитная световая волна называется плоскополяризованной (линейно поляризованной), если колебания векторов напряженности электрического поля $\vec{E}$ и напряженности магнитного поля $\vec{H}$ в этой волне строго фиксированы в пространстве и лежат в определенных плоскостях, перпендикулярных друг другу и проходящих через вектор $\vec{C}$ скорости распространения световой волны в однородной изотропной среде. Электромагнитная световая волна называется естественной (неполяризованной), если колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в этой волне происходят перпендикулярно вектору скорости распространения волны в любых плоскостях. Свет называется частично поляризованным, если в нем имеются преимущественные колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ только в некоторых плоскостях. Плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{E}$, называется плоскостью колебаний, а плоскость, в которой колеблется вектор $\vec{H}$, - плоскостью поляризации. Расположение плоскостей в пространстве определяется двумя векторами - вектором скорости распространения волны $\vec{C}$ и соответствующим вектором $\vec{E}$ или $\vec{H}$.

Поляризацией света называется выделение линейно поляризованного света из естественного или частично поляризованного. Заметим, что поляризация может существовать только у поперечных волн но не у продольных. Для поляризации света используют специальные устройства, называемые поляризаторами. Их действие основывается на поляризации света при отражении от поверхности диэлектриков, а также на явлениях двойного лучепреломления и дихроизма. Те же устройства можно использовать и в качестве анализаторов, т.е. для определения характера и степени поляризации света.

2.2. Некоторые вещества, называемые оптически активными, обладают особым свойством - вращать плоскость поляризации проходя-

щего сквозь них линейно поляризованного света вокруг направления луча. Оптически активны некоторые кристаллы (например, кварц, киноварь и др.), чистые жидкости и растворы (например, скипидар, раствор сахара в воде и др.). Все вещества, активные в жидком состоянии, обладают тем же свойством и в кристаллическом состоянии. Однако некоторые вещества, оптически активные в кристаллическом состоянии, неактивны в жидком. Следовательно, оптическая активность может обусловливаться как строением самих молекул вещества, так и расположением частиц в кристаллической решетке. В оптически активных кристаллах и чистых жидкостях угол φ поворота плоскости поляризации света пропорционален толщине l слоя вещества, через который проходит свет: $\varphi = \alpha l$. Коэффициент пропорциональности $\alpha = \varphi / l$ называется удельным вращением или постоянной вращения (угол поворота плоскости поляризации света при прохождении светом единицы длины вращающего слоя вещества). Постоянная вращения зависит от природы вещества, температуры и длины волны падающего света в вакууме λ (вдали от полос поглощения света веществом $\alpha = \lambda$).

Большинство оптически активных кристаллов существует в двух модификациях - правовращающей, или положительной (плоскость поляризации поворачивается вправо, т.е. по часовой стрелке - для наблюдателя, смотрящего навстречу лучу), и левовращающей, или отрицательной (плоскость поляризации поворачивается влево - против часовой стрелки). Значения постоянной вращения α для обеих модификаций одного и того же оптически активного кристалла отличаются только знаком.

Вещества, не обладающие естественной способностью вращать плоскость поляризации света, приобретают такую способность под влиянием внешнего магнитного поля. Явление магнитного вращения плоскости поляризации света было открыто в 1846 г. Фарадеем. Магнитное вращение плоскости поляризации (эффект Фарадея) происходит при распространении света в веществе вдоль линий магнитной напряженности. Угол поворота φ плоскости поляризации пропорционален длине пути света l в веществе, находящемся в магнитном поле, и напряженности магнитного поля H:

$$\varphi = B l H . \qquad (I)$$

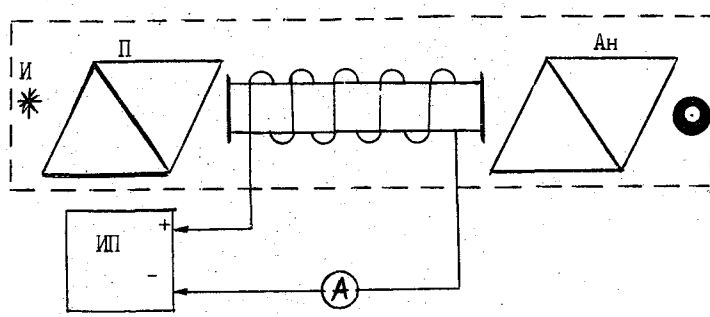
При изменении направления магнитного поля на противоположное меняется направление вращения плоскости поляризации (знак угла φ).

Постоянная B (ее называют постоянной Верде) зависит от при-

ролы вещества и длины волны света и численно равна удельному вращению φ / ℓ (углу поворота плоскости поляризации света при прохождении светом единицы длины вращающего слоя вещества) при напряженности магнитного поля H, равной единице (I А/м). Постоянная Верде может быть как положительной, так и отрицательной.

3. Метод исследования и описание установки

В данной работе изучается вращение плоскости поляризации света в магнитном поле при распространении света в воде. Схема установки изображена на рис. I.



ИП – источник постоянного тока Б5-44, П – поляризатор, Ан – анализатор, И – источник света, С – соленоид, А – амперметр, О – окуляр.

Рис. I. Принципиальная схема установки.

На трубку с водой намотан соленоид с большим числом витков N. Соленоид помещен в рабочую камеру сахариметра СУ-2. Сахариметр представляет собой поляриметр (прибор для измерения угла вращения плоскости поляризации), шкала которого проградуирована в так называемых градусах сахарной шкалы от -45 до I00 $^{\circ}S$. В качестве поляризатора и анализатора в сахариметре используются призмы Николя. Устройство сахариметра более подробно приведено в описании лабораторной работы № 307, а принцип работы призмы Николя – работы № 308.

Вектор напряженности магнитного поля направлен по оси соленоида, т.е. совпадает с направлением светового луча. Напряженность магнитного поля в соленоиде можно найти по формуле:

$$H = \frac{I N}{l}. \qquad (2)$$

где H – напряженность магнитного поля; I – сила тока; l – длина соленоида; N – общее число витков соленоида.

Из формул (I) и (2) следует, что угол поворота φ плоскости поляризации можно найти по формуле

$$\varphi = B N I, \qquad (3)$$

где B – постоянная Верде, N – общее число витков соленоида, I – сила тока в соленоиде.

Так как шкала сахариметра проградуирована в градусах сахарной шкалы, которые связаны с угловыми градусами соотношением $1^{0}S = 0{,}3462^{0}$, то расчетная формула принимает вид

$$\varphi = \frac{B N}{0{,}3462} I, \qquad (4)$$

где B – постоянная Верде, N – число витков соленоида.

Как видно из этой формулы, наблюдается линейная зависимость угла поворота φ плоскости поляризации света в магнитном поле соленоида от силы тока I в соленоиде.

Постройте график зависимости величины угла φ от силы тока I, где по оси абсцисс отложите $y = \varphi$, по оси ординат $x = I$, и найдите значение углового коэффициента a в уравнении прямой $y = ax + b$, который равен

$$a = \frac{B N}{0{,}3462}, \qquad (5)$$

и тогда значение величины постоянной Верде можно вычислить по формуле

$$B = \frac{0{,}3462\, a}{N}, \qquad (6)$$

где $N = 9000$ – число витков соленоида.

4. Порядок выполнения работы

4.I. Включите осветитель сахариметра СУ-2. Вращением оправ окуляров зрительной трубы (нижнего окуляра) и отсчетного устрой-

ства (верхнего) наведите на резкость изображение так, чтобы в поле зрения зрительной трубы была четко видна вертикальная линия, разделяющая его пополам, а в поле зрения отсчетного устройства были четко видны штрихи и цифры шкалы и нониуса. Не включая ток через соленоид, потренируйтесь в снятии отсчета по шкале и нониусу (изменяя отсчет вращением кремальерного винта в нижней части измерительной головки).

4.2. Не включая ток, добейтесь вращением кремальерного винта полной однородности поля зрения зрительной трубы (равенства яркостей правой и левой половинок поля зрения). Для этого надо каждый раз выводить отсчетное устройство в сторону больших углов, а затем, уменьшая значения углов, снять отсчет. Отсчет по шкале должен оказаться близким к 0^0 ($\pm 0{,}5^0$) (запишите этот отсчет φ_0 угла при значении силы тока $I_0 = 0$ в таблицу).

Таблица

№ п/п	I_0	φ_0	I_1	φ_+	φ_-	I_2	φ_+	φ_-	I_3	φ_+	φ_-
1											
2											
3											
4											
5											
		φ_0		$\varphi_{+ср}$	$\varphi_{-ср}$		$\varphi_{+ср}$	$\varphi_{-ср}$		$\varphi_{+ср}$	$\varphi_{-ср}$

4.3. Выньте штепсельные вилки из гнезд прибора Б5-44. Установите на его переключателях значения напряжения 299 В и тока 400 мА. Включите прибор тумблером "СЕТЬ".

4.4. Включите штепсельные вилки в гнезда прибора Б5-44 (белую вилку в белое гнездо, черную – в красное). При этом направление тока будем считать прямым. Определите по амперметру значение силы тока (правильно выберите предел измерения!) и запишите его в таблицу.

Вращением кремальерного винта добейтесь однородности поля зрения зрительной трубы, снимите отсчет по отсчетному устройству. Это будет угол $\varphi_{пр}$. Измерения угла при данных силе и направлении тока необходимо повторить 5 раз (для статистики), сби-

вая наводку на однородность каждый раз в одну сторону (больших углов) и вновь добиваясь ее. Запишите результаты в таблицу.

4.5. Измените направление тока на обратное, поменяв местами вилки штепселя, и получите аналогично пять значений угла $\varphi_{обр}$.

4.6. Аналогичные измерения произведите при токе 600 и 800 мА (токи устанавливаются на приборе Б5-44, точные значения берутся по амперметру).

5. Обработка результатов измерений

5.I. Постройте график зависимости углов поворота плоскости поляризации от токов. При этом учитывайте, что значения $\varphi_{пр}$ (положительное направление оси) соответствуют прямым значениям тока $I_{пр}$ (положительное направление оси), а $\varphi_{обр}$ (отрицательное направление оси) соответственно $I_{обр}$ (отрицательное направление оси). Значения φ и I должны быть нанесены с погрешностью.

5.2. Определите значение углового коэффициента a и его погрешность Δa.

5.3. Вычислите значение постоянной Верде В по формуле (5) и ее погрешность ΔB.

6. Контрольные вопросы

6.I. Что такое свет с волновой точки зрения?

6.2. Что называется плоскостью колебаний, плоскостью поляризации?

6.3. Как устроена призма Николя? Что такое поляризатор, анализатор?

6.4. Что такое оптически активные вещества?

6.5. В чем заключается эффект Фарадея?

6.6. Что называется удельным вращением? От чего оно зависит?

6.7. Что называется постоянной Верде?

6.8. Нарисуйте силовые линии магнитного поля соленоида.

7. Список литературы

I. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, I976. - §§ I0I-I08, I64, I69.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, I979. - Т. 2. - §§ I34-I36, I38, I4I.

3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М., 1972. – Т. 3. – §§ 17–19.
4. Джанколи Д. Физика. – М.: Мир, 1989. – Т. 2. – § 38.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 310

ФОТОКОЛОРИМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ

I. Задачи работы

1. Построение градуировочного графика колориметра.
2. Определение концентрации соли железа (Fe^{+9}) в воде.

2. Предварительные сведения

Интенсивность света (энергия светового потока, нормально падающего на единицу площади в единицу времени) при прохождении через вещество уменьшается - свет поглощается в веществе. Объясняется это тем, что часть энергии световой волны затрачивается на возбуждение колебаний электронов. Частично эта энергия вновь возвращается в виде излучения вторичных волн возбужденными электронами. Частично же она переходит в другие виды энергии.

Уменьшение интенсивности света $-dI$ на пути dx пропорционально интенсивности света I, падающего на однородный слой малой толщины, и длине пути dx светового потока в веществе:

$$-dI = k\ I\ dx. \qquad (I)$$

Коэффициент пропорциональности "k" называется коэффициентом поглощения света и показывает относительное уменьшение интенсивности света, приходящееся на единицу длины поглощающего слоя (в направлении луча), т.е.

$$k = -\frac{dI}{I\ dx}. \qquad (2)$$

Коэффициент поглощения света "k" зависит от природы и количества (концентрации) вещества, длины волны света и не зависит от интенсивности света и толщины поглощающего слоя. Пусть на входе в поглощающий слой интенсивность света равна I_0. Тогда интенсивность света I, прошедшего через слой вещества толщиной $x = \ell$, можно определить, если проинтегрировать выражение (I), предварительно разделив переменные:

$$\int_{I_0}^{I} \frac{dI}{I} = -k \int_{0}^{l} dx. \qquad (3)$$

В результате получим

$$\ln I - \ln I_0 = -kl. \qquad (4)$$

Откуда

$$I = I_0 e^{-kl}. \qquad (5)$$

Соотношение (5) носит название закона Бугера. Согласно этому закону, интенсивность света в поглощающем веществе убывает экспоненциально.

Поглощение света в растворе зависит от числа поглощающих молекул, т.е. от концентрации раствора. Следовательно,

$$k = k_\lambda c, \qquad (6)$$

где k_λ – новый коэффициент, зависящий только от молекулярных свойств вещества и от длины волны падающего света; c – концентрация раствора

Подставляя формулу (6) в выражение (5), получим закон Бугера-Ламберта-Бера:

$$I = I_0 e^{-k_\lambda c l}. \qquad (7)$$

Этот закон хорошо выполняется для не слишком концентрированных растворов, когда еще не сказывается взаимное влияние молекул растворенного вещества.

Для количественной характеристики поглощения света веществом вводят понятие оптической плотности. Оптической плотностью $Д$ называется следующая величина:

$$Д = \lg \frac{I_0}{I} = 0.43\, k_\lambda\, c\, l. \qquad (8)$$

Измеряя оптические плотности, можно очень точно измерить концентрацию поглощающего вещества. Метод этот отличается большой чувствительностью, ибо при малых концентрациях исследуемого вещества можно увеличить поглощение за счет увеличения толщины слоя.

3. Метод исследования и описание установки

Измерение оптических плотностей в данной работе производится на фотоэлектрическом концентрационном колориметре КФК-2МП, снабженном встроенной ЭВМ для обработки экспериментальных данных. Он позволяет определять оптические плотности и концентрации веществ в растворах при измерении в отдельных участках диапазона длин волн 315...980 нм, выделяемых светофильтрами. Колориметр применяется в лабораторной и промышленной практике, на предприятиях водоснабжения, в службах санитарного и экологического контроля, в металлургической, химической промышленности и т.п.

Принцип действия колориметра основан на поочередном измерении светового потока, прошедшего через эталонный раствор $I_{этал}$, и потока I, прошедшего через исследуемую среду.

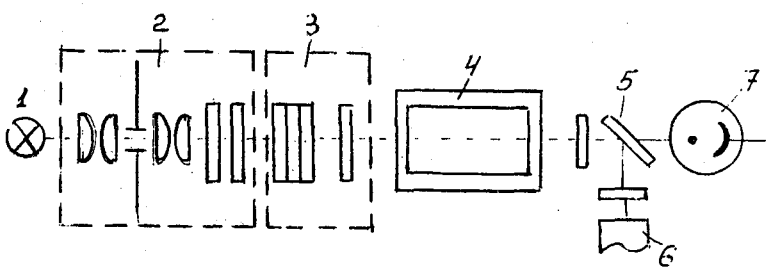


Рис. I. Принципиальная оптическая схема прибора.

Световой пучок формируется лампой (I) и оптической системой (2) (рис. I). Далее он направляется на кювету с раствором (4). После прохождения кюветы ослабленный пучок разделяется пластиной (5) на две части и направляется для анализа на фотодиод ФД-24К (6) или на фотоэлемент Ф-26 (7) в зависимости от спектрального диапазона, в котором производят измерения. Для выделения того или иного спектрального диапазона для освещения кюветы используют набор светофильтров (3).

Световой поток $I_{этал}$, попадая на фотоприемник, преобразуется в электрический сигнал $V_{этал}$, а поток I – в сигнал V. Эти сигналы обрабатываются микроЭВМ колориметра и представляются на цифровом табло в виде значения оптической плотности Д. На рис. 2 представлен внешний вид колориметра.

В работе на колориметре исследуются водные растворы сульфата железа (Fe^{+9}). Поскольку эти растворы бесцветны, т.е. не по-

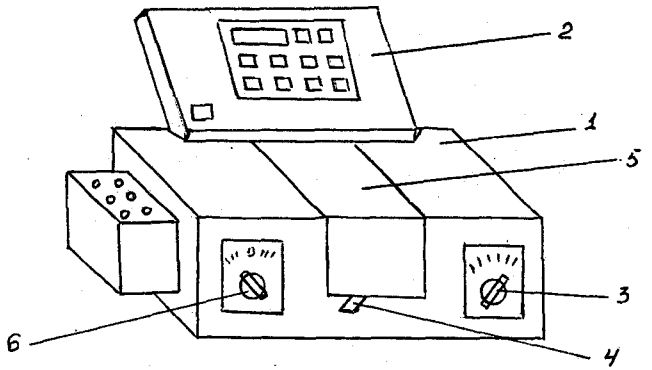


Рис. 2. Внешний вид колориметра.

Усл. обозначения: I - колориметрический блок; 2 - вычислительный блок; 3 - ручка переключения фотоприемников; 4 - ручка, осуществляющая ввод в световой пучок эталонной и исследуемой кювет; 5 - кюветное отделение; 6 - ручка переключения светофильтров.

глощают в видимой области спектра, то их предварительно нужно окрасить добавлением соответствующего реагента. В качестве реагента используется сульфасалициловая кислота, окрашивающая растворы в красный цвет (максимум поглощения лежит в области 490 нм). Кислоту нужно добавлять в избытке и тогда оптическая плотность окрашенного раствора будет пропорциональна концентрации соли железа (Fe^{+9}).

Данная методика может быть использована для определения примесей в воде солей и других тяжелых металлов (например, цинка, кадмия, свинца), а также производных фенола. Красящий реагент в каждом случае должен быть специально подобран.

4. Порядок выполнения работы

4.I. Построение градуировочного графика колориметра.

4.I.I. Открыть крышку кюветного отделения колориметра и включить тумблер "Сеть", при этом должна загореться сигнальная лампа (на цифровом табло могут появиться различные символы).

4.I.2. Нажать клавишу "Пуск" - на цифровом табло появляется мигающая запятая (после первого индикатора - индикатора режима

работы) и горит индикатор "Р". Если запятая не появилась, повторно нажать клавишу "Пуск".

4.I.3. После включения прибора необходимо произвести измерения темнового тока. Для этого при открытой крышке кюветного отделения нажимают клавишу Ш(0). Цифры, высвечивающиеся при этом на табло, показывают электрический сигнал V_o, пропорциональный темновому току. Нажатие клавиши Ш(0) автоматически обеспечивает введение значения V_o в память ЭВМ.

4.I.4. Перед началом работы студент получает у лаборанта серию (5 штук) бесцветных водных растворов сульфата железа (Fe^{+9}) известной концентрации в пробирках. В каждую пробирку студент должен добавить пипеткой по I мл сульфасалициловой кислоты (пипетка и колба с кислотой находятся на рабочем столе). При этом растворы приобретают розовую окраску, интенсивность которой пропорциональна концентрации сульфата железа.

4.I.5. Полученные растворы аккуратно по очереди наливают в измерительную кювету, начиная с наименьшей концентрации. Внимание! Категорически запрещается брать кювету пальцами за рабочие грани! Кювету устанавливают в ближнее гнездо кюветодержателя. В дальнее гнездо устанавливают такую же кювету с эталонным веществом. (В данном случае - это дистиллированная вода.)

4.I.6. Ручкой 6 установить светофильтр (490±10) нм, соответствующий области максимального поглощения раствора, а ручкой 3 - нужный фотоприемник ("Фотоприемник" 315-540).

4.I.7. Ручку 4 установить в положение "I". При этом в световой пучок вводится эталонная кювета.

4.I.8. Закрыть крышку кюветного отделения, нажать клавишу "К(I)". На цифровом табло слева от мигающей запятой загорается символ "I".

4.I.9. Ручку 4 установить в положение "2". При этом в световой пучок вводится кювета с исследуемым раствором.

4.I.10. Далее нажать клавишу "Д(5)". На цифровом табло слева от мигающей запятой появляется символ "5", означающий, что произошло измерение оптической плотности. Отсчет на цифровом табло справа от мигающей запятой соответствует оптической плотности исследуемого раствора. Данные занести в таблицу.

Вылить содержимое кюветы с окрашенным раствором в колбу для слива, а кювету наполнить снова из пробирки со следующей по величине концентрацией сульфата железа.

Повторить п. 4.I.7-4.I.I0.

4.2. Определение концентрации соли железа Fe^{+9}.

Таблица

	Д	ΔД	с	Δс
Растворы серии	I 2 3 4 5			
Неизвестный раствор	$Д_x$ =	$\Delta Д_x$ =	$с_x$ =	

4.2.I. Получить у лаборанта пробирку с раствором сульфата железа неизвестной концентрации $с_x$. Повторить п. 4.I.4, т.е. добавить в пробирку I мл сульфасалициловой кислоты для получения окрашенного раствора.

4.2.2. Налить окрашенный раствор неизвестной концентрации в измерительную кювету, поставить кювету в ближнее гнездо кюветодержателя. Произвести операции п. 4.I.7-4.I.IO, записать в таблицу значение оптической плотности $Д_x$.

4.2.3. Вернуть кюветы в исходное положение (ручку 4 в положение "I") и сбросить значение $Д_x$ нажатием клавиши "Пуск".

4.2.4. Нанести на график результаты измерения оптической плотности $Д_i$ в зависимости от известных концентраций $с_i$ окрашенных растворов в серии (см. таблицу). По горизонтальной оси отложить известные концентрации $с_i$, а по вертикальной - соответствующие им значения оптической плотности Д. У каждой точки указать погрешности и провести наилучшую прямую. Эта прямая описывается зависимостью $y = ax + b$; здесь $y = Д_i$, $x = с_i$, $a = tg\alpha = \frac{Д_i - Д_0}{с_i}$, α – угол наклона градуировочной прямой к оси концентраций с, $b = Д_0$ – значение оптической плотности при с = 0, т.е. при пересечении градуировочного графика с осью оптической плотности.

4.2.5. Определить параметры a и b по градуировочному графику, а также найти их погрешности Δa и Δb.

4.2.6. Ввести в память ЭВМ рассчитанные из градуировочного графика параметры "b" и "a". Для этого нажать клавиши "с" (для введения "b") или "b" (если вводим "a"), а затем клавишу СБР. При этом на цифровом табло слева от мигающей запятой высвечивает-

ся символ "c" (или "b"). Затем с помощью клавиатуры набирают значения коэффициента "b" ("a"). Далее нажимают клавишу "УТВ." информация вводится в память.

4.2.7. Проделать п. 4.I.8, 4.I.9.

4.2.8. Нажать на клавишу "c(4)". На табло слева от мигающей запятой появляется символ "4", означающий, что произошло вычисление концентрации исследуемого раствора. Отсчет на цифровом табло справа от мигающей запятой соответствует значению концентрации исследуемого раствора. Записать показания c_x в таблицу.

5. Обработка результатов измерений

5.I. Результатом прямых измерений является значение оптической плотности Д. Считать, что относительная погрешность измерения Д не превышает 0,3 %.

5.2. Вычислить абсолютную и относительную погрешность измерения концентрации c_x, считая ее результатом косвенных измерений, по формуле:

$$c_x = \frac{Дx - b}{a}.$$

6. Контрольные вопросы

6.I. Что называется интенсивностью света?

6.2. Что называется коэффициентом поглощения света?

6.3. Как изменяется интенсивность света, прошедшего сквозь среду, в зависимости от толщины слоя?

6.4. Что называется оптической плотностью вещества? Какова размерность этой величины?

6.5. На чем основан фотоколориметрический метод определения неизвестной концентрации?

6.6. Почему именно светофильтр (490±I0) нм используется в данной работе?

7. Список литературы

I. Ландсберг Г.С. Оптика. - М., I952. - С. I57.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М., I978. - Т. 2. - С. I45.

3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. - М., I965. - Т. 37. - С. 2I.

4. Геворкян Р.Г., Шепель В.В. Курс общей физики. - М., 1972. - С. 384.

5. Крамаренко В.Ф., Попова В.И. Фотометрия в фармацевтическом анализе. Гл. I, 2. - С. 5-60.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 311

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

I. Задача работы

Получить спектральную характеристику сернистокадмиевого фотосопротивления.

2. Предварительные сведения

Фотосопротивление представляет собой полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого уменьшается под действием потока лучистой энергии. Рассматриваемое явление обусловлено внутренним фотоэффектом, а возникающая при этом дополнительная электропроводность – фотопроводимостью. Фотопроводимость наблюдается у целого ряда полупроводников и диэлектриков.

Механизм внутреннего фотоэффекта состоит в следующем. Некоторая часть светового потока монохроматического света с энергией фотонов $h\nu$, падающего на поверхность фотосопротивления, изготовленного из чистого беспримесного полупроводника, поглощается в тонком поверхностном слое полупроводника и передается валентным электронам. Получившие энергию валентные электроны переходят в свободную зону и становятся электронами проводимости.

В примесных полупроводниках механизм возникновения фотопроводимости такой же, как и в чистых, однако в них проводимость смешанная, возникающая в результате возбуждения собственной проводимости и проводимости примесных центров*. Таким образом, внутренний фотоэффект – это происходящее при поглощении света перераспределение электронов по энергетическим состояниям в конденсированных средах (твердых телах и жидкостях).

Фотосопротивление (рис. I) изготавливается следующим образом: на изолирующую подложку I наносится тонкий слой полупроводника 2. Затем по краям этого слоя наносятся металлические электроды 3. Электроды соединяются с двумя выводными зажимами, с помощью которых фотосопротивление включается в цепь последовательно с источником напряжения и гальванометром. Для предохранения от ви-

*Подробнее о механизме проводимости в полупроводниках см. в описаниях к лабораторным работам № 237 и 239.

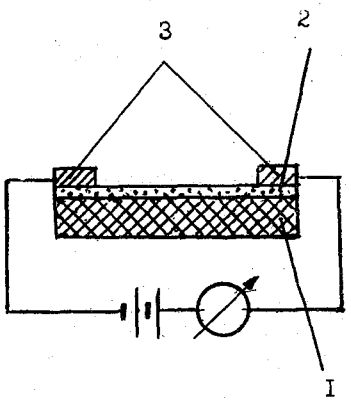


Рис. I.

яния воздуха поверхность фотосопротивления покрывается тонкой пленкой специального лака.

Материалом для фотосопротивлений служат полупроводники с большим внутренним фотоэффектом: CdS, $CdSe$, PbS, Bi_2S_3, Si, Ge и др. Наиболее чувствительным является фотосопротивление из сернистого кадмия (CdS), которое исследуется в предлагаемой работе.

Когда фотосопротивление включено в цепь, но свет на него не попадает, в нем течет ток I_0, который называется темновым. При освещении поверхности фотосопротивления ток возрастает, достигая значения I. Разность между световым и темновым токами и дает значение фототока $I_ф$:

$$I_ф = I - I_0 . \qquad (I)$$

Величина фототока, возникающего при освещении фотосопротивления монохроматическим светом данной интенсивности, зависит от спектральной чувствительности фотосопротивления. За меру спектральной чувствительности может быть принята величина

$$f(\lambda) = \frac{I_ф}{k_\lambda} , \qquad (2)$$

где k_λ - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость интенсивности излучения источника света от длины волны.

Значение k_λ показывает, во сколько раз интенсивность света данной длины волны отличается от интенсивности света (при некоторой другой длине волны), условно принятой за единицу.

Внутренний фотоэффект, величина $I_ф$ (а следовательно, и $f(\lambda)$) зависят от спектрального состава излучения и от вещества полупроводника: у одних веществ фотоэффект наблюдается при освещении ультрафиолетовым светом, у других - видимым и даже инфракрасным светом. Зависимость спектральной чувствительности от длины волны падающего света является важным свойством фотосопротивления и называется его спектральной характеристикой.

3. Метод исследования и описание установки

Концентрация возникающих токоносителей при заданной интенсивности лучистого потока зависит от его спектрального состава. У каждого фоточувствительного полупроводника существует своя спектральная характеристика внутреннего фотоэффекта. Для определения спектральной характеристики фотосопротивления надо измерить фототоки при освещении его светом разных длин волн.

Прибор, служащий для получения монохроматического света, называется монохроматором. Схема монохроматора представлена на рис. 2. Главной частью любого спектрального прибора является диспергирующая система, в данном случае стеклянная призма Р. Входная щель S_1 коллиматора K_1 находится в фокальной плоскости объектива O_I и освещается лампой накаливания. На призму падает пучок параллельных лучей "белого" света, который после прохождения через призму образует в фокальной плоскости объектива O_2 изображение источника (щели) в виде серии цветных полос. С помощью щели S_2 коллиматора K_2 можно выделить из полученного сплошного спектра узкие спектральные интервалы, близкие к монохроматическому свету. В данном монохроматоре щель неподвижна, а поворачивается призма при помощи особого винта, снабженного барабаном с делениями. Каждому делению барабана соответствует определенная длина волны. Градуировочная кривая приложена к прибору. Фотосопротивление надевается на щель S_2. Фототок измеряется микроамперметром, соединенным последовательно с фотосопротивлением.

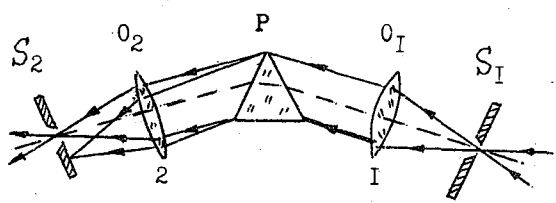


Рис. 2.

4. Порядок выполнения работы

4.1. По градуировочной кривой монохроматора (имеется на установке) определяются деления барабана, соответствующие длинам волн, которые надо будет устанавливать в процессе измерения. Эти данные занести в таблицу.

4.2. Включить осветитель монохроматора в сеть.

4.3. Установить барабан на нулевое деление.

4.4. Отрегулировать интенсивность света, падающего на фотосопротивление. Для этого, медленно вращая барабан, следить за показаниями микроамперметра. Если ток становится большим и шкалы микроамперметра окажется недостаточно, необходимо уменьшить интенсивность падающего на фотосопротивление света. Для этого надо подрегулировать (уменьшить) ширину щелей S_1 и S_2 таким образом, чтобы максимально возможная величина тока была в пределах шкалы микроамперметра.

4.5. Снова установить барабан на нулевое деление.

4.6. Пользуясь данными таблицы, устанавливать деления на барабане, соответствующие заданным длинам волн, снимать при этом показания микроамперметра ($I_{пр}$) и заносить их в таблицу. Такие измерения надо проделать дважды, в прямом и обратном ($I_{об}$) направлениях. Вращать барабан надо медленно, так как фотосопротивление инерционно. Прежде чем взять отсчет, выждать около одной минуты.

Таблица

Номер измерения	Длина волны	Деления барабана	Опыт I	
			прямое направление	обратное направление
	нм	дел	дел	дел
			Продолжение таблицы	
I	400			
2	425			
3	450			
4	475			
5	500			
6	525			
7	550			
8	575			

Продолжение таблицы

Номер измерения	Длина волны	Деления барабана	Опыт I	
			прямое направление	обратное направление
	нм	дел	дел	дел
9	600			
I0	625			
II	650			
I2	675			
I3	700			

Номер измерения	Опыт 2		$I_{ср} = \frac{2I_{пр} + 2I_{об}}{4}$	$\frac{I_{ср}}{k_\lambda}$
	прямое направление	обратное направление		
	дел	дел	дел	
I				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
I0				
II				
I2				
I3				

5. Обработка результатов измерений

5.I. Для каждой длины волны определить $I_{ср} = \frac{2\ I_{пр} + 2\ I_{об}}{4}$.

5.2. Рассчитать спектральную чувствительность фотосопротивления по формуле (2) и построить график ее зависимости от длины волны (спектральную характеристику). Для этого для каждой длины волны получить соответствующие усредненные значения фототока $I_{ср}$

и занести в таблицу. По этим данным построить график зависимости $I_{ср}/K_{\lambda} = f(\lambda)$*.

6. Контрольные вопросы

6.I. Что называется фотосопротивлением?

6.2. В чем состоит механизм внутреннего фотоэффекта?

6.3. От чего зависит величина фототока?

6.4. Что называется спектральной характеристикой фотосопротивления?

7. Список литературы

I. Ландсберг Г.С. Оптика. - М., 1952. - § 172.

2. Савельев И.В. Курс общей физики. - М., 1979. - Т. 3. - § 65.

3. Геворкян Р.Г., Шепель В.В. Курс общей физики. - М., 1972. - С. 440-443.

* В данной лабораторной установке величина "темнового" тока $I_0 \approx 0$. Поэтому можно принять, что $I_{\Phi} = I$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 312

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ C_p / C_v ДЛЯ ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ ЯВЛЕНИЯ ЗВУКОВОГО РЕЗОНАНСА

I. Задача работы

Определение отношения c_p / c_v для воздуха.

2. Предварительные сведения

2.I. Скорость распространения звуковой волны в упругой среде.

Под звуком понимают колебательные движения частиц упругой среды (с частотой примерно I6–20 000 Гц), распространяющиеся в среде в виде волн, возбуждаемых источником колебаний. В воздухе, как и во всякой газообразной среде, могут распространяться только продольные волны, т.е. волны, при которых колебания частиц среды происходят в направлении, параллельном направлению движения волны. Поэтому распространение звуковых волн в упругой среде сопровождается сжатием и разрежением ее отдельных участков. Поэтому скорость распространения такой волны должна зависеть от упругих свойств среды. Теория волновых процессов дает следующий вид этой зависимости:

$$v = \sqrt{E/\rho}\ , \qquad (I)$$

где E – модуль упругости среды (модуль Юнга); ρ – плотность среды.

Следовательно, скорость волны можно определить, подставив вместо E и ρ соответствующие им значения. Получить их можно из следующих соображений. По определению

$$E = \frac{P}{\Delta l / l}\ ,$$

где P – давление на поперечном сечении упругого тела; $\frac{\Delta l}{l}$ – относительное удлинение тела.

Если пренебречь изменением поперечного сечения тела в процессе сжатия, то относительное изменение его длины $\frac{\Delta l}{l}$ равно относительному изменению его объема $\frac{\Delta V}{V}$. Тогда

$$E = \frac{P}{\Delta V / V} .$$

Перейдем к рассмотрению распространения звуковой волны в воздухе, который заключен в сосуд постоянного сечения. Учитывая, что увеличение объема приведет к уменьшению давления $-\Delta P$, получим

$$E = - V \frac{\Delta P}{\Delta V} .$$

или для бесконечно малого изменения давления и объема

$$E = - V \frac{dP}{dV} . \qquad (2)$$

Плотность же газа равна

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P \mu}{R T} . \qquad (3)$$

Подставив равенства (2) и (3) в формулу (I), получим

$$v = \sqrt{- \frac{R T}{P \mu} V \frac{dP}{dV}} . \qquad (4)$$

Величину $\frac{\Delta P}{\Delta V}$ можно определить из уравнения Пуассона для адиабатического процесса. Действительно, локальные сжатия и разрежения, возникающие в газе при прохождении звуковой волны, приводят к изменению температуры различных участков газа. Причем для звуковых волн, имеющих относительно высокую частоту, выравнивание температур отдельных участков не успевает произойти в течение периода колебаний. Следовательно, процессы локального расширения и сжатия могут считаться адиабатическими. Для таких процессов справедливо уравнение Пуассона

$$P V^{\gamma} = \text{const} ,$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

Дифференцируя это уравнение, получим

$$V^{\gamma} dP + \gamma V^{\gamma - 1} P \, dV = 0 ,$$

откуда

$$\frac{dP}{dV} = - \gamma \frac{P}{V} . \qquad (5)$$

Подставляя равенство (5) в выражение (4), получим

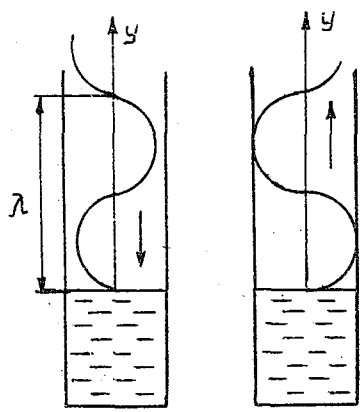
$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}$$

откуда

$$\gamma = \frac{v^2 \mu}{RT}. \qquad (6)$$

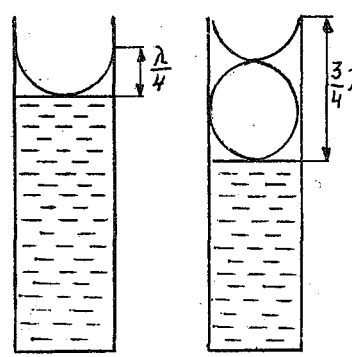
2.2. Стоячая волна. Условие резонанса в трубе с воздухом.

Возбудим каким-либо образом свободные звуковые колебания столба воздуха в стеклянном цилиндре, частично заполненном водой (рис. I). На границе воздуха с водой произойдет отражение падающей волны. Следовательно, в воздушном столбе падающая (рис. I а) и отраженная (рис. I б) волны будут налагаться друг на друга и в результате возникнут колебания с характерным расположением чередующихся максимумов и минимумов амплитуды, т.е. возникнет стоячая волна. Очевидно, на границе воздуха с водой колебаниям частиц воздуха будет препятствовать другая более плотная среда (вода). Поэтому у границы будет минимальная амплитуда колебаний, т.е. образуется узел стоячей волны (рис. 2).



а б

Рис. I.



а б

Рис. 2.

На каком расстоянии будет следующий узел? Решим эту задачу для простейшего случая наложения двух встречных волн с одинаковыми амплитудами. Запишем уравнения обеих плоских бегущих волн, распространяющихся вдоль оси y со скоростью v :

$$x_{пад}(Y, t) = x_0 \sin \omega \left(t - \frac{Y}{v}\right),$$

$$x_{отр}(Y, t) = x_0 \sin \left[\omega \left(t + \frac{Y}{v}\right) + \pi\right] = - x_0 \sin \omega \left(t + \frac{Y}{v}\right).$$

Результирующая волна определится суммой:

$$x = x_{пад}(Y, t) + x_{отр}(Y, t) = - 2 x_0 \sin \omega \frac{Y}{v} \cos \omega t .$$

Полученное уравнение является уравнением стоячей волны, а величина $\left|-2 x_0 \sin \omega \frac{y}{v}\right|$ – ее амплитудой. Расстояние между соседними узлами можно найти из условия $\sin \omega \frac{y}{v} = 0$, $\omega \frac{y}{v} = \pm k\pi$, где $k = 0, I, 2, \ldots$

Следовательно, координаты узлов определяются из условия:

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

а расстояние между соседними узлами можно вычислить по разности

$$Y_{k+1} - Y_k = \frac{\lambda}{2}.$$

Очевидно, что расстояние между соседними точками, в которых амплитуда максимальна (между пучностями стоячей волны), можно найти из этих же соображений и оно также равно $\frac{\lambda}{2}$. Следовательно, расстояние между соседними узлом и пучностью вдвое меньше, т.е. равно $\frac{\lambda}{4}$.

Ясно теперь, что у открытого края цилиндра образуется пучность стоячей волны, если длина воздушного столба равна $\frac{\lambda}{4}$ (см. рис. 2 а). При этом столб воздуха будет издавать так называемый основной тон.

Если увеличить длину воздушного столба на $\frac{\lambda}{2}$, то у открытого края трубы вновь появится пучность (см. рис. 2 б). При этом на площади отверстия возникнут сильные колебания воздуха, что проявится в усилении звучания воздушного столба. Длина воздушного столба при этом составляет 3/4 длины звуковой волны – $\frac{3}{4}\lambda$ (см. рис. 2 б). Таким образом, интенсивность звука будет максимальной в тех случаях, когда длина столба ℓ составит нечетное число чет-

вертей длины волны:

$$l = \frac{\lambda}{4}(2k - 1), \qquad (7)$$

где $k = 1, 2, 3, \ldots$

Свободные колебания, как правило, являются затухающими. В нашем примере для их поддержания можно к открытому концу воздушного столба поднести источник звука с фиксированной частотой. Наливая в сосуд воду, мы слышим, что звук при определенных уровнях воды значительно усиливается. Усиление происходит как раз на тех уровнях, на которых длина воздушного столба l равна нечетному числу четвертей длины волны источника, т.е. выполняется соотношение (7). На этих уровнях происходит совпадение частоты источника с собственной частотой колебания столба. Это совпадение и служит причиной нарастания амплитуды вынужденных колебаний, т.е. при этом наблюдается явление резонанса - явление резкого возрастания амплитуды установившихся вынужденных колебаний, наступающее при приближении частоты внешнего гармонического воздействия к частоте собственных колебаний.

3. *Метод исследования и описание установки*

В данной работе значение γ для воздуха определяется методом звукового резонанса.

Как следует из соотношения (7), минимальная высота столба l_1, при которой наблюдается резонанс, равна $\frac{\lambda}{4}$. Другие высоты столба, при которых наблюдается резонанс на той же частоте, удовлетворяют формуле:

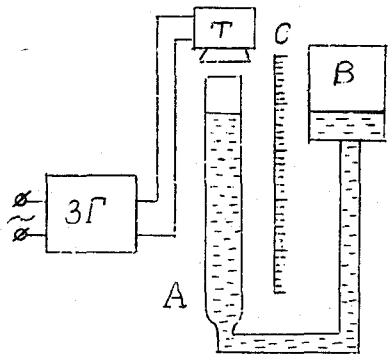
$$l_k = l_1 + \frac{k\lambda}{2}. \qquad (8)$$

где $\lambda = \frac{v}{\nu}$ - длина волны (см. рис. I); $k = 1, 2, 3, \ldots$ - порядковый номер наблюдаемого резонанса.

Отсюда можно получить длину волны

$$\lambda = 2\,\frac{l_k - l_1}{k - 1}. \qquad (9)$$

В данной работе звуковые колебания столба воздуха поддерживаются звуковым генератором, испускающим колебания с фиксированной частотой. Схема лабораторной установки представлена на рис. 3. Кроме звукового генератора ЗГ, в нее входит стеклянный цилиндр А,



соединяющийся резиновой трубкой с подвижным сосудом В. Цилиндр снабжен шкалой С, разделенной на сантиметры. Над цилиндром А укреплен телефон Т, соединенный с генератором звука. Двигая по вертикали сосуд В, можно изменять уровень воды в цилиндре А и тем самым длину воздушного столба над поверхностью воды.

Рис. 3.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Включить генератор, установить на нем частоту ν = = 1000 Гц (значение по шкале 100 Гц и множитель х 10).

4.2. Сосуд с водой поднять в верхнее положение (уровень воды в трубе установится около отметки 15 см).

4.3. Опуская сосуд с водой и улавливая на слух моменты резонанса (максимальной громкости звука), определить по шкале С величины ℓ_k, соответствующие каждому k-тому резонансу, где $k \leq 4$. Измерения повторить несколько раз. Данные наблюдений занести в таблицу.

4.4. Измерить температуру воздуха в лаборатории.

Таблица

№ п/п	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_3	ℓ_4	Т, К
1					
2					
3					
⋮					

5. Обработка результатов измерений

5.1. Произвести обработку результатов измерений величин l_k: рассчитать $\theta(l_k)$, $\bar{l}_k$, $S(l_k)$, $\varepsilon(l_k)$.

5.2. Учитывая формулу (8), построить график линейной зависимости вида $y = ax + b$, где $y = l_k$, $x = k$, $a = \lambda/2$, $b = l_1$. Из графика найти значения $\bar{a}$ и Δa.

5.3. Используя соотношения, приведенные в п. 5.2, найти λ_g.

5.4. По формуле $v = \nu\lambda$ рассчитать скорость звука в воздухе и погрешность для нее.

5.5. Рассчитать γ по формуле (6).

6. Контрольные вопросы

6.1. Какие волны называются продольными, поперечными?

6.2. Как связана скорость распространения звуковой волны с упругими свойствами среды?

6.3. Почему можно применять уравнение адиабатического процесса для газа, в котором распространяется звук?

6.4. Как образуется стоячая волна в столбе воздуха в данном опыте?

6.5. В чем заключается явление резонанса?

7. Список литературы

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М., 1965. – Т. I. – §§ 56, 59, 61. – Т. 3. – §§ 6, 12, 19.

2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. – М., 1959. – Т. I. – §§ 48, 49.

3. Савельев И.В. Курс общей физики. – М., 1982. – Т. 2. – §§ 93–99.

4. Геворкян Р.Г., Шепель В.В. Курс общей физики. – М., 1972. – С. 97–102.

5. Шебалин О.Д. Физические основы механики и акустики. – М., 1981. – С. 199–202, 223–224, 234–235.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 361

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ γ-КВАНТА РАДИОАКТИВНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ИЗОТОПА ЦЕЗИЯ-137

1. Задачи работы

1. Определение массового коэффициента поглощения γ-излучения.

2. Определение энергии γ-кванта и длины волны излучения.

2. Предварительные сведения

Радиоактивный распад элементов сопровождается испусканием трех типов излучения - α, β и γ. Эти излучения отличаются друг от друга по своей природе, энергии и проникающей способности.

α-излучение представляет собой поток ядер атомов гелия. Ядро гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов, имеет массовое число 4 и электрический заряд +2e. Обычно энергия α-частиц достигает нескольких мегаэлектронвольт (1 МэВ = 10^6 эВ).

β-излучение является потоком электронов, образующихся при распаде ядер. Максимальная энергия β-частиц не превышает 6 МэВ.

γ-излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны короче рентгеновского излучения. Это излучение обладает самой большой проникающей способностью из всех видов радиоактивного излучения.

γ-излучение возникает как в процессе непосредственного радиоактивного распада ядер, так и в результате испускания γ-кванта возбужденными ядрами, образующимися при делении. При этом энергия γ-излучения колеблется от десятков килоэлектронвольт (КэВ) до нескольких МэВ (1 КэВ = 10^3 эВ).

Величина энергии γ-кванта может быть определена по поглощению его веществом. Большая проникающая способность γ-квантов объясняется как их большой скоростью ($v = c$), так и отсутствием электрического заряда.

Основными процессами, происходящими в веществе при прохождении γ-лучей, являются: фотоэффект, образование позитрон-электронных пар и эффект Комптона.

Наблюдаемое на опыте поглощение параллельного пучка γ-лучей обусловлено суммарным действием всех трех вышеперечисленных процессов. Такой механизм уменьшения интенсивности прошедшего излу-

чения через вещество хорошо описывается экспоненциальным уравнением:

$$I = I_0 * e^{-\mu x}, \qquad (I)$$

где I – интенсивность пучка γ-лучей, прошедшего через вещество; I_0 – интенсивность исходного пучка γ-лучей; x – толщина слоя вещества; μ – линейный коэффициент поглощения вещества.

Приведенное уравнение справедливо при выполнении двух условий.

I. Исходный пучок γ-квантов должен быть параллелен, так как в противном случае γ-кванты будут проходить через разную толщину вещества.

2. Пучок γ-квантов должен быть монохроматическим, т.е. энергия E γ-квантов в пучке должна быть одинаковой. Это обусловлено тем, что эффективность фотоэффекта и образование позитрон-электронных пар зависит от энергии γ-кванта, а значит и линейный коэффициент поглощения μ зависит от энергии γ-кванта.

Нарушение хотя бы одного из этих условий приводит к невыполнению вышеуказанного закона.

Величина линейного коэффициента поглощения μ пропорциональна количеству атомов, с которыми взаимодействует γ-квант на единичном пути в веществе. Для данного вещества μ является постоянной величиной и показывает толщину слоя вещества, при котором интенсивность пучка γ-квантов уменьшается в e раз (e – основание натурального логарифма).

Количество атомов, приходящихся на единицу длины, может отличаться для веществ, даже состоящих из одинаковых атомов, но имеющих различное строение (например: графит и алмаз). Очевидно, что вероятность взаимодействия γ-квантов с атомами будет также зависеть от "эффективного" сечения этих атомов, а "эффективное" сечение, в свою очередь, зависит от порядкового номера элемента и, следовательно, от плотности вещества. Поэтому с учетом этого обстоятельства для характеристики поглощающей способности вещества вводят массовый коэффициент поглощения μ_m:

$$\mu_m = \mu / \rho , \qquad (2)$$

где μ – линейный коэффициент поглощения вещества, ρ – плотность поглощающего вещества.

Массовый коэффициент поглощения вещества μ_m зависит лишь от порядкового номера элемента вещества и от энергии γ-кванта E, которая определяется по формуле

$$E = h\nu = \frac{h c}{\lambda}, \qquad (3)$$

где h – постоянная Планка, ν – частота γ-излучения, c – скорость света в вакууме, λ – длина волны γ-кванта.

Эмпирически было установлено, что для γ-квантов с энергией E от 0,5 до 0,8 МэВ значение энергии γ-квантов E, выраженное в мегаэлектронвольтах, с хорошей степенью точности может быть аппроксимировано полиномом

$$E_{(МэВ)} = C_1 + C_2 \mu_m + C_3 \mu_m^2 + C_4 \mu_m^3, \qquad (4)$$

где C_1 = 4,8946 МэВ, C_2 = -9,7361 МэВ.кг/м^2, C_3 = 7,4742 МэВ х х кг^2/м^4, C_4 = -1,9566 МэВ.кг^3/м^6.

Уравнение (4) позволяет найти энергию γ-кванта в мегаэлектронвольтах, а затем надо перевести ее в джоули и тогда из формулы (3) можно рассчитать длину волны электромагнитного излучения

$$\lambda = \frac{h c}{E}, \qquad (5)$$

где h = 6,6.10^{-34} Дж.с; c = 3,0.10^8 м/с.

3. Метод исследования и описание экспериментальной установки

3.1. Описание экспериментальной установки.

Установка состоит из радиометра, счетчика Гейгера-Мюллера, источника γ-излучения (изотопа цезия-137) и кассеты для установки пластин вещества, в котором наблюдается поглощение.

Счетчик представляет собой стеклянную трубку с катодом в виде металлического цилиндра (рис. 1). Анодом служит металлическая нить, натянутая по оси цилиндра. Анод соединен с положительным полюсом источника питания через резистор R с большим сопротивлением. Катод соединен с отрицательным полюсом источника питания и с землей. Счетчик заполнен, как правило, каким-либо инертным газом. Высокоэнергетическая частица, попадая в счетчик, ионизирует молекулы газа, вырывая из них электроны. При некотором значении разности потенциалов на электродах счетчика $U = U_c$ электроны и положительные ионы, созданные первичной высокоэнергетической частицей, вызывают лавину электронов и ионов. Лавинообразный процесс образования электронов и ионов связан с последующей ионизацией молекул газа счетчика при движении уже имеющихся электронов и

ионов в электрическом поле. Электроны движутся к аноду (нити), а положительные ионы к катоду. Особенно интенсивно процесс лавинной ионизации происходит у анода, так как у нити градиент напряженности электрического поля очень велик. Наряду с этим ускоренные положительные ионы, бомбардируя поверхность катода, вызывают вторичную электронную эмиссию с катода.

Положительные ионы, обладая значительно большей массой, чем электроны, достигают катода за время порядка $\tau = 10^{-4}$ с, в то время как электроны попадают на анод за время $\tau = 10^{-6}$ с. Из-за этого около центрального электрода будет еще находиться облако положительных ионов, а электроны уже достигнут анода. Наличие пространственного заряда уменьшает напряженность электрического поля, замедляет лавинную ионизацию и разряд прекращается. Каждая заряженная частица или γ-квант, вызвавшая разряд в счетчике, дает в цепи анода импульс тока, а на резисторе R импульс U_{max}, который может усиливаться и регистрироваться.

В результате попадание каждой заряженной частицы или γ-кванта в счетчик Гейгера регистрируется.

3.2. Метод исследования.

Используемый в работе радиометр фиксирует количество γ-квантов, попадающих на датчик. Таким образом, показания радиометра N_i пропорциональны интенсивности потока γ-квантов и зависимость (I) примет вид

$$N_i = N_0 \, e^{-\mu x_i} \qquad (6)$$

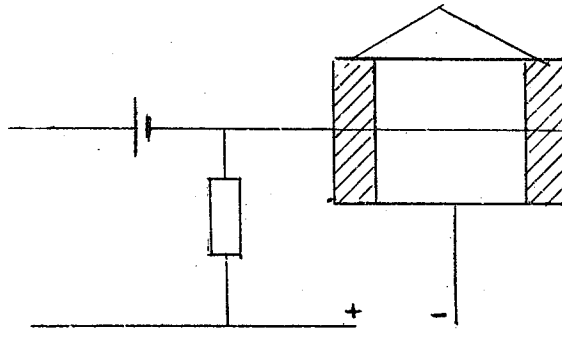


Рис. I. Экспериментальная установка.

где N_0 – величина, пропорциональная интенсивности исходного потока (количество γ-квантов, падающих на поглощающий слой); N_i – величина, пропорциональная интенсивности прошедшего потока; μ – линейный коэффициент поглощения вещества; x_i – толщина слоя из i штук поглощающих пластин.

В качестве поглощающих пластин в работе используются пластины из свинца с плотностью $\rho_{св.} = 11{,}34 \cdot 10^3$ кг/м^3.

Прологарифмировав уравнение (6), получаем линейную зависимость $\ln(N_0/N_i)$ от x_i. Следовательно, имеется возможность, экспериментально исследуя зависимость N_i от толщины поглощающего слоя x_i, графической обработкой данных, представленных в полулогарифмическом масштабе, получить линейный коэффициент поглощения вещества μ.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Включите радиометр. Через 1–2 мин радиометр готов к работе.

4.2. Так как показания радиометра в течение каждого цикла измерения достаточно сильно меняются, предлагается следующая методика измерений. За фиксированное время, скажем, 30 с, выбирают максимальное N_{max} и минимальное N_{min} значения показаний радиометра и записывают в таблицу. За истинное значение N принимают среднее арифметическое этих показаний

$$N = \frac{N_{max} + N_{min}}{2} . \qquad (7)$$

Внимание! Обращайте внимание, по какой шкале производится отсчет (у шкалы загорается лампочка), и учитывайте значение множителя шкалы.

Таблица

d_i	x_i	N_{0min}	N_{0max}	N_0	N_{imin}	N_{imax}	N_i	N_0/N_i	$\ln(N_0/N_i)$

4.2. Измерьте показания радиометра N_0 при отсутствии поглощающих поток γ-квантов свинцовых пластин.

4.3. Измерьте толщину d_i одной свинцовой пластины в пяти-семи точках. Толщины всех других используемых пластин считать такими же. Таким образом, толщина слоя поглощающих пластин x_i,

считая, что слой состоит из i пластин одинаковой толщины d_i, находится по формуле

$$x_i = i\, d_i. \qquad (8)$$

4.4. Измерьте показания радиометра N_i при последовательно увеличивающемся количестве поглощающих поток γ-квантов пластин (количество пластин i меняется от I до I3 штук).

5. Обработка результатов измерений

5.I. Вычислите по формуле (7) N_o и N_i, а по формуле (8) x_i.

5.2. В соответствии с формулой (6) существует линейная зависимость между $\ln(N_o/N_i)$ и x_i ($y = ax + b$), где y - $\ln(N_o/N_i)$, x - x_i, угловой коэффициент $a = \mu$, $b = 0$. Постройте график зависимости $\ln(N_o/N_i)$ от x_i. Точки на графике должны быть указаны с соответствующими погрешностями $\Delta\ln(N_o/N_i)$ и Δx_i, определяемыми как погрешности результатов косвенного измерения. Доверительной границей абсолютной погрешности N_i и N_o считать максимальное отклонение от среднего значения за 30 с наблюдения (систематической приборной погрешностью можно пренебречь в силу ее малости). По графику определите значение углового коэффициента a, т.е. значение линейного коэффициента поглощения вещества μ, и погрешность.

5.3. Рассчитайте массовый коэффициент поглощения свинца μ_m по формуле (2).

5.4. Вычислите энергию γ-кванта по формуле (4).

5.5. Найдите длину волны γ-кванта в ангстремах по формуле (5) (I эВ = $I{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж, I $\mathring{A}$ = 10^{-10} м).

5.6. Погрешности величин, вычисляемых в п. 5.3-5.5, определите как погрешности величин косвенных измерений.

6. Контрольные вопросы

6.I. Виды и характеристика радиоактивных излучений.

6.2. Основные процессы, наблюдаемые при взаимодействии γ-излучения с веществом.

6.3. Какова размерность μ, μ_m?

6.4. В чем отличие μ от μ_m?

6.5. Чем обусловлена высокая проникающая способность γ-излучения?

6.6. Физический смысл массового коэффициента поглощения вещества μ_m.

6.7. Что такое счетчик Гейгера-Мюллера и принцип его работы?

7. Список литературы

I. Элементарный учебник физики / Под ред. Г.С.Ландсберга. - М., I97I. - Т. 3. - §§ 207-2II.

2. Геворкян Р.Г., Шепель В.В. Курс общей физики. - М., I972. - §§ 27, 28.

3. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, I989. - Т. 3. - С. 245-254.

4. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. - М.: Наука, I972. - Т. 3. - С. 368-398.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 362

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ γ-КВАНТА РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗОТОПА КОБАЛЬТА-60

I. Задачи работы

I. Определение массового коэффициента поглощения γ-излучения.

2. Определение энергии γ-кванта и длины волны излучения.

2. Предварительные сведения

Сведения из теории см. в лабораторной работе № 36I.

3. Метод исследования и описание экспериментальной установки

3.I. Описание экспериментальной установки.

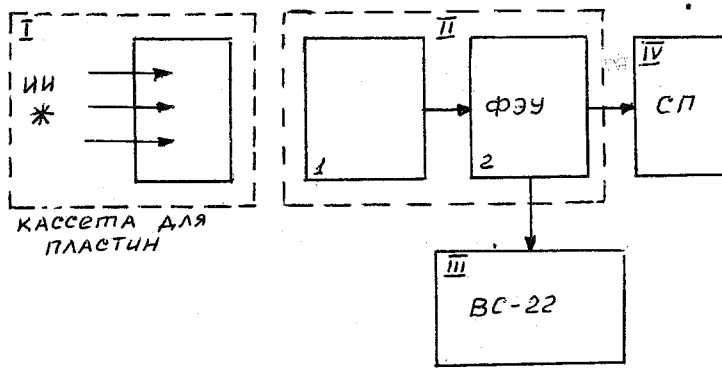
Установка состоит из блока детектирования спектрометрического (БДЭГ-20РI), блока питания высоковольтного (РС-22), прибора счетного (ПСО2-5), источника γ-излучения и кассеты для установки пластин вещества, в котором наблюдается поглощение. Блок детектирования включает детектор энергии γ-квантов (кристалл иодистого натрия) и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). γ-квант, попадая в объем детектора энергии, вызывает световой импульс, который фиксируется ФЭУ и затем считывается счетным устройством.

3.2. Метод исследования.

Счетное устройство фиксирует количество световых импульсов (n), создаваемых γ-квантами в объеме кристалла иодистого натрия, т.е. поток γ-квантов, прошедших через слой поглощающего вещества за одинаковые промежутки времени. При этом из-за высокой чувствительности блока детектирования и малой мощности используемого источника излучения значение n будет определяться как интенсивностью источника γ-квантов (N_0), так и фоном ($n_ф$), который определяется наличием любых других источников γ-излучений (естественная радиоактивность, космическое излучение, наличие других источников γ-квантов), т.е. величина

$$n_0 = N_0 + n_ф. \qquad (6)$$

Поэтому при изучении зависимости интенсивности прошедшего



I – ИИ – источник γ-излучения; II – БД – блок детектирования: 1 – детектор γ-квантов, 2 – ФЭУ; III – БП – высоковольтный блок питания; IУ – СП – прибор счетный.

Рис. I. Блок-схема установки.

γ-излучения от толщины поглощающего слоя надо учитывать влияние этой постоянной величины $n_ф$. Таким образом, величины потоков γ-квантов, падающих (N_o) и прошедших (N_i) через поглощающее вещество, будут рассчитываться следующим образом:

$$N_o = (n_o - n_ф) ; \qquad N_i = (n_i - n_ф) , \tag{7}$$

где n_o и n_i – показания счетного прибора при отсутствии и при наличии поглощающих пластин вещества.

Зависимость интенсивности прошедшего γ-излучения от толщины поглощающего слоя будет иметь вид

$$N_i = N_o e^{-\mu x_i} , \tag{8}$$

где N_o – количество γ-квантов источника без поглощающих пластин; N_i – количество γ-квантов источника, прошедшее через поглощающие пластины; μ – линейный коэффициент поглощения вещества; x_i – толщина слоя из i штук поглощающих пластин.

В качестве поглощающих пластин в работе используются пластины из свинца с плотностью $\rho_{св} = 11{,}34 \cdot 10^3$ кг/м^3.

Прологарифмировав уравнение (8), получаем линейную зависимость $\ell n (N_0/N_i)$ от x_i. Следовательно, имеется возможность, экспериментально исследуя зависимость N_i от толщины поглощающего слоя, графической обработкой данных, представленных в полулогарифмическом масштабе, получить линейный коэффициент поглощения вещества μ.

4. Порядок выполнения работы

4.I. Включить ВС-22.

4.2. Включить прибор счетный (ПС02-5).

Подготовка ПС02-5 к работе.

4.2.I. Установить все переключатели в нижнее положение. Исключение - переключатель установки режима работы ≪ N - T ≫ в верхнее положение.

4.2.2. Для установки интервала времени, в течение которого будет происходить счет количества γ-квантов, необходимо воспользоваться переключателем УСТ.ЭКСП. (установка экспозиции). Надо поставить переключатель УСТ.ЭКСП. в верхнее положение. При этом на экране будет перемещаться светящаяся точка (светодиод), которая указывает время счета γ-квантов. Установка времени экспозиции осуществляется его выключением в момент загорания светодиода напротив выбранной экспозиции. Если загорится светодиод ≪ х3 ≫, значение времени экспозиции надо умножить на 3. Рекомендуемое время экспозиции I0 с.

4.2.3. Время, через которое происходит индикация результата измерения, регулируется потенциометром "ВРЕМЯ ИНДИКАЦИИ". Для удобства считывания результатов измерений рекомендуется установить потенциометр в крайнее верхнее положение. Это положение соответствует времени высвечивания результата счета γ-квантов примерно через 30 с.

Прибор готов к работе.

4.2.4. Для проведения измерения нажать кнопку "ПУСК".

4.3. Снять по пять показаний (n) счетного прибора, последовательно увеличивая количество поглощающих пластин от 0 до I5 штук. Показания записать в таблицу. При снятии показания счетного прибора положение точки на табло не учитывается.

Внимание! Значение интенсивности естественного фона ($n_ф$) дано на установке.

4.4. Измерьте толщину d одной свинцовой пластинки в пятисеми точках. Толщины всех других пластин считать такими же. Таким

Таблица

Количество пластин	n_0 n_i					n_{ocp}	x_i	N_0	N_i	N_0/N_i	$\ln(N_0/N_i)$
	Количество измерений					n_{icp}					
	I	2	3	4	5						
0											
I											
⋮											
I5											

образом, толщина поглощающего слоя x_i находится по формуле

$$x_i = i\,d. \qquad (9)$$

5. Обработка результатов измерений

5.I. В соответствии с формулой (8) существует линейная зависимость между $\ln(N_0/N_i)$ и x_i ($y = ax + b$), где $y - \ln(N_0/N_i)$, $x - x_i$, угловой коэффициент $a = \mu$, $b = 0$. Постройте график зависимости $\ln(N_0/N_i)$ от x_i. Точки на графике должны быть указаны с соответствующими погрешностями $\Delta\ln(N_0/N_i)$ и Δx_i. По графику определите значение углового коэффициента a, т.е. значение линейного коэффициента поглощения вещества μ с погрешностью.

5.2. Рассчитайте массовый коэффициент поглощения свинца μ_m по формуле (2).

5.3. Вычислите энергию γ-кванта по формуле (4).

5.4. Найдите длину волны γ-кванта в ангстремах по формуле (5) (I эВ = I,6.I0^{-19} Дж, I Å = I0^{-10} м).

5.5. Погрешности величин, вычисляемых в п. 5.2–5.4, определите как погрешности величин косвенных измерений.

6. Контрольные вопросы

6.I. Виды и характеристика радиоактивных излучений.

6.2. Основные процессы, наблюдаемые при взаимодействии γ-излучения с веществом.

6.3. Какова размерность μ, μ_m?

6.4. В чем отличие μ от μ_m?

6.5. Чем обусловлена высокая проникающая способность γ-излучения?

6.6. Физический смысл массового коэффициента поглощения вещества μ_m.

7. Список литературы

I. Элементарный учебник физики / Под ред. Г.С.Ландсберга. - М., 1971. - Т. 3. - §§ 207-211.

2. Геворкян Р.Г., Шепель В.В. Курс общей физики. - М., 1972. - §§ 27, 28.

3. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1989. - Т. 3. - С. 245-254.

4. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. - М.: Наука, 1972. - Т. 3. - С. 368-398.

Учебное пособие
Лабораторный практикум по физике
Оптика и ядерная физика
Ответственный редактор Анатолий Петрович Бобровский
ЛР № 020309 от 28.II.9I

Подписано в печать 29.9.94. Формат 60x90^{I}/I6. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Печ. л. 8. Тираж I000 экз. Зак. 535
I95I96, СПб, Малоохтинский пр.,98. РIТМИ

Офсетный участок Компании "ИНВЭКО"
I96I05, С.-Петербург, пр.Гагарина, п.I