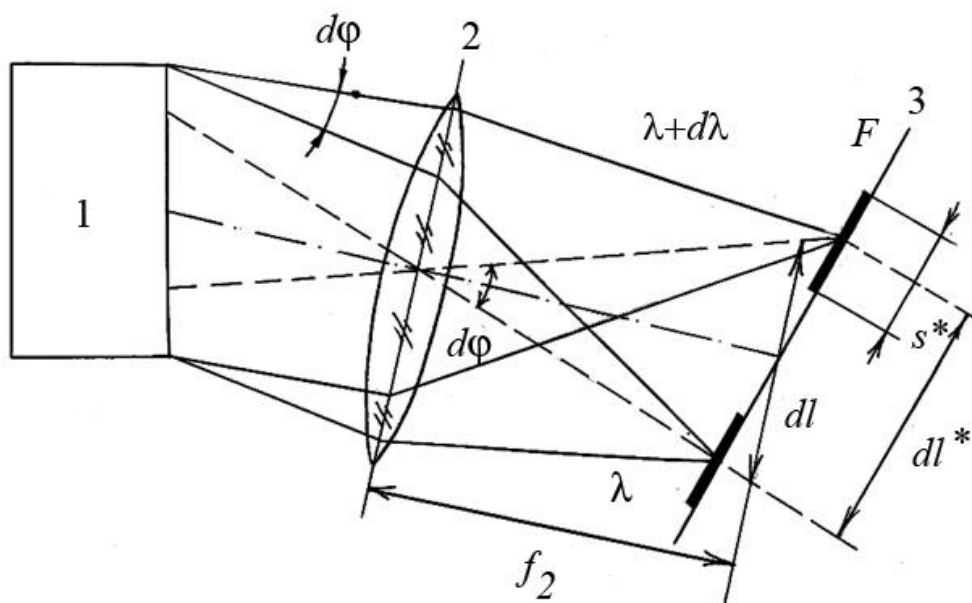


Е.В. Жукова

ОПТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Методические указания к лабораторному
практикуму

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург
2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е.В. Жукова

ОПТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

**Методические указания к лабораторному
практикуму**

Учебно-методическое пособие

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика»
в качестве учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2019

Жукова Е.В. Оптическая физика. Методические рекомендации к лабораторному практикуму. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 50 с.

Рецензент:

Дунаев Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-технологического центра биомедицинской фотоники, доцент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева

Учебно-методическое пособие содержит материал, рекомендованный студентам, изучающим курс «Оптической физики» и обучающимся по направлению подготовки бакалавров 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика». В пособие включены теоретические сведения и практические рекомендации, необходимые для выполнения шести лабораторных работ. Тематика заданий направлена на изучение экспериментальных и расчетных методик в спектральных исследованиях, а также на решение задач оптики неоднородных и нелинейных сред методом компьютерного моделирования.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© Жукова Е.В., 2019

Содержание

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1 Спектральные исследования на автоматическом спектрофотометре.....	5
Лабораторная работа № 2 Спектрофотометрическое исследование окрашенных растворов.....	15
Лабораторная работа № 3 Измерение спектров НПВО и расчет оптических постоянных красителя.....	22
Лабораторная работа № 4 Исследование явления рассеяния излучения в мутных средах.....	29
Лабораторная работа № 5 Исследование молекулярного рассеяния света в жидкости.....	35
Лабораторная работа № 6 Изучение явления самофокусировки лазерного излучения в нелинейной среде.....	43

Введение

Пособие содержит теоретический материал и методические рекомендации для выполнения лабораторных работ по курсу «Оптическая физика», который входит в цикл естественно-научных предметов для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика».

Изучение оптических явлений традиционно начинается в курсе физики, когда студенты знакомятся с теоретическими основами оптики, получают первоначальный опыт проведения экспериментальных исследований в учебной лаборатории. Цель преподавания дисциплины «Оптическая физика» – расширение теоретических представлений о важнейших явлениях оптики и формирование практических навыков у студентов для проведения самостоятельной работы в учебных и научных лабораториях.

Тематика лабораторных работ связана с приобретением опыта выполнения индивидуальных учебных заданий на автоматизированном спектральном оборудовании и с ознакомлением с методиками исследования спектрофотометрических параметров вещества. В теоретической части первых трех работ рассматриваются главные характеристики спектральных приборов, обсуждаются критерии выбора условий сканирования спектров, последовательность регистрации данных, приемы извлечения количественных характеристик на этапе обработки результатов эксперимента. Пособие содержит описание к лабораторной работе по спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения – современного метода изучения структурно-химического состава веществ, предназначенного для изучения тонких пленок и поверхностных свойств материалов.

В пособие включены три лабораторные работы, которые связаны с изучением оптики неоднородных и нелинейных сред. Тематика работ не часто встречается в лабораторном практикуме первых курсов из-за сложности теоретического материала и особых требований к лабораторным установкам. Работы основаны на проведении компьютерного моделирования, выполнение заданий становится возможным благодаря хорошей цифровой культуре современных студентов и готовности их к проведению виртуальных экспериментов.

Учебный процесс в Университете ИТМО – это активное, заинтересованное, непрерывное и самостоятельное накопление студентами разнообразного опыта и развития компетенций в научных лабораториях, которые оснащены инновационным оборудованием, сложной элементной базой фотоники и быстродействующими вычислительными комплексами. В ходе выполнения курсовой работы по данной дисциплине у студентов

появляется возможность проведения первого самостоятельного научного исследования под руководством ведущих специалистов с последующим представлением возможно пока скромных научных результатов на студенческих научных форумах. Этот многолетний опыт развития компетенций себя зарекомендовал и всемерно поддерживается. И первый шаг на этом пути начинается в учебной лаборатории, в которой студентам предоставляется возможность выполнить лабораторные работы разного уровня сложности. Включенные в пособие лабораторные работы относятся к этой категории исследований.

Материалы пособия будут полезны студентам, выполняющим задания в рамках курсовых работ по ряду последующих дисциплин направления подготовки бакалавров, для выпускников при написании выпускной квалификационной работы.

В процессе выполнения заданий лабораторного практикума студентам рекомендуется обязательно самостоятельно выполнять все этапы работы, вдумчиво ознакомиться с теоретическими сведениями, изложенными в пособии, изучить теорию из соответствующих разделов рекомендованной литературы. При подготовке к защите лабораторной работы лучше каждому студенту самостоятельно выполнять расчеты, построить графики, обрабатывать данные, подготовить ответы на контрольные задания для самопроверки. На все вопросы, появившиеся в ходе выполнения работы, обязательно надо искать ответы, возможно, для этого просто необходимо вспомнить пройденный материал. И еще, настоятельно рекомендуется приходить на консультации к преподавателю, не стесняться и задавать вопросы, обсуждать с ним прочитанный материал и анализировать полученные данные. Только в этом случае учебный процесс будет интересным, результативным и полезным.

Лабораторная работа № 1

Спектральные исследования на автоматическом спектрофотометре

Цель работы – ознакомиться с оптической схемой и характеристиками монохроматора МДР-206, с принципом работы автоматического спектрофотометра. Выполнить измерения спектрального коэффициента пропускания многослойного диэлектрического фильтра.

Задание по работе:

1. Ознакомиться с принципом работы управляемого спектрально-вычислительного комплекса, оптической схемой и конструкцией монохроматора МДР-206, а также с оптической схемой осветителя.

2. Выполнить настройку оптической схемы измерительного комплекса. Совместно с преподавателем проверить правильность соединения разъемов между устройствами.
3. Ознакомиться с порядком задания команд в управляющей компьютерной программе, обеспечивающей запись спектра. Определить значение параметров в программе сканирования для файлов данных.
4. Записать спектр пропускания многослойного диэлектрического фильтра.
5. Выполнить количественную обработку спектра пропускания фильтра.
6. Подготовить отчет и сделать выводы по работе.

1. Теоретическая часть

1.1 Принцип работы монохроматора

Для изучения характеристик монохроматора необходимо ознакомиться с принципом его работы. Рассмотрим ход лучей в оптической схеме прибора. На рис. 1.1-а) показано, как в фокальной плоскости прибора происходит формирование спектра. Диспергирующий элемент 1 (призма, дифракционная решетка) предназначен для разложения исходного пучка на систему параллельных монохроматических пучков. Эту функцию элемента называют *пространственной оптической фильтрацией*. Если излучение содержит два колебания близких по длинам волн λ и $\lambda+d\lambda$, то в фокальной плоскости 3 камерного объектива 2 образуются два смещенных друг относительно друга монохроматических изображения входной щели. Каждое из изображений имеет ширину S^* в фокальной плоскости. Если угол между монохроматическими параллельными пучками с длинами волн λ и $\lambda+d\lambda$ на выходе из диспергирующей системы равен $d\varphi$, то справедливо соотношение

$$\frac{dl^*}{d\lambda} = \frac{f_2}{\sin \varepsilon} \cdot \frac{d\varphi}{d\lambda}, \quad (1.1)$$

где dl^* - расстояние между центрами монохроматических изображений щели в фокальной плоскости, f_2 - фокус камерного объектива 2, ε - угол наклона фокальной плоскости к оптической оси объектива.

Если в конструкции монохроматора фокальная плоскость строго перпендикулярна оптической оси прибора, то для $\varepsilon=90^\circ$ получаем формулу

$$\frac{dl}{d\lambda} = f_2 \frac{d\varphi}{d\lambda}, \quad (1.2)$$

Это отношение называют *линейной дисперсией* монохроматора, а величину $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ - *угловой дисперсией* диспергирующего элемента. Часто вместо линейной дисперсии используют обратную ей величину, называемую *обратной линейной дисперсией*, которая показывает, какой спектральный интервал

длин волн приходится на единицу длины спектра в фокальной плоскости прибора.

$$\frac{d\lambda}{dl} = f_2 \frac{d\lambda}{d\varphi}, \quad (1.3)$$

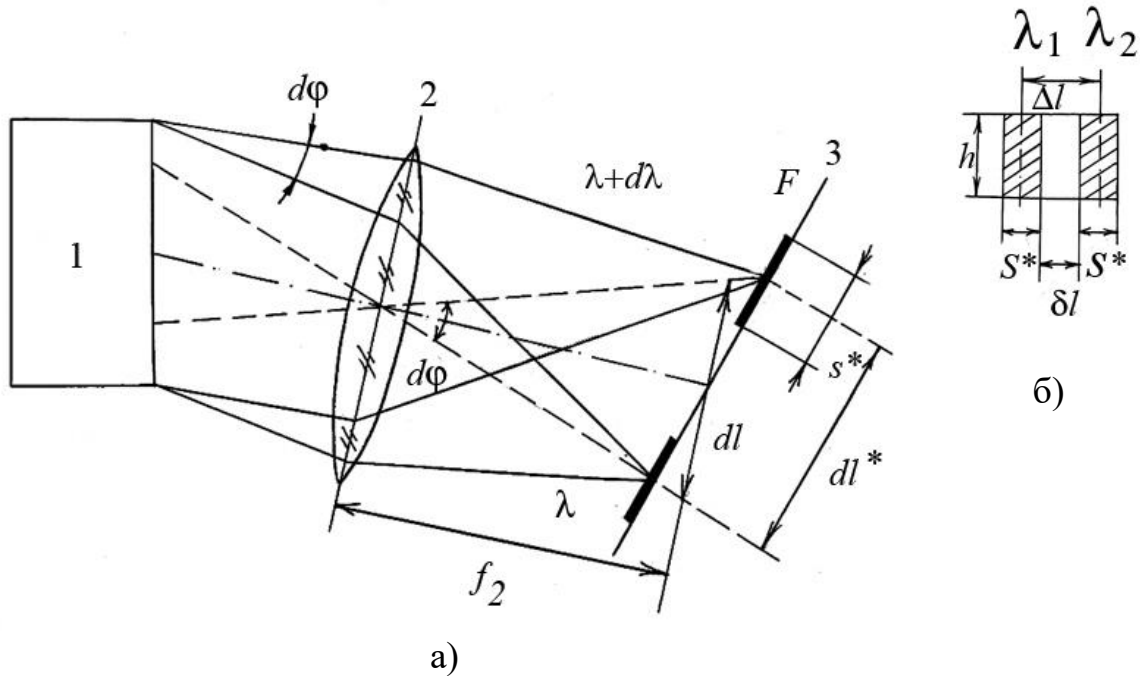


Рисунок 1.1 – а) ход лучей в монохроматоре: 1 – диспергирующий элемент, 2 – камерный объектив; 3 – фокальная плоскость; б) взаимное расположение монохроматических изображений щели в фокальной плоскости

Линейная дисперсия является важной характеристикой монохроматора. Чем больше отношение $\frac{dl}{d\lambda}$, тем больше будет расстояние dl в фокальной плоскости камерного объектива между центрами изображений щели, как это видно из рис. 1.1-а), для заданных значений длин волн λ_1 и λ_2 .

Чем больше расстояние dl , тем с большей точностью оно может быть измерено, и соответственно с большей точностью может быть определена и разность длин волн

$$d\lambda = \lambda_2 - \lambda_1. \quad (1.4)$$

Рассмотрим взаимное расположение монохроматических изображений входной щели, как это показано на рис. 1.1-б). Из рисунка видно, что расстояние между внутренними краями изображений щели равно

$$\delta l = \Delta l - S^*, \quad (1.5)$$

где Δl - расстояние между центрами монохроматических изображений, S^* - ширина изображений в фокальной плоскости.

В практике спектральных измерений может быть случай, когда ширина монохроматических изображений $S^* > \Delta l$. При этом $\delta l < 0$, то есть два

монохроматических к изображения пересекутся в одну широкую полосу, и на практике уже нельзя гарантировать измерение на двух отдельных длинах волн. Также видно, что если расстояние между центрами изображений $\Delta l > S^*$, то это связано с уменьшением ширины монохроматических изображений щели. Такой вариант соотношения размеров позволит повысить точность определения длин волн в изучаемом спектре.

Однако уменьшение величины ширины изображения щели S^* в фокальной плоскости связано с уменьшением ширины входной щели монохроматора. Для правильного выбора размера входной щели нужно учесть значение *нормальной ширины* входной щели S_0 монохроматора, которая равна

$$S_0 = f_1 \cdot \frac{\lambda}{d_1}, \quad (1.6)$$

где f_1 - фокусное расстояние коллиматора, d_1 - световой диаметр коллиматора, λ - измеряемая длина волны, мм. Коллиматор – это узел (например, линза) в оптической схеме для формирования параллельного пучка и направления излучения на входную грань призмы или на рабочую поверхность дифракционной решетки.

Уменьшение размера входной щели, так чтобы ее текущий размер $S < S_0$, не приводит изменению ширины ее изображения S^* . Ширина изображения S^* останется постоянной, что связано с явлением дифракции излучения на апертуре диспергирующего элемента монохроматора.

При выполнении спектральных исследований для измерения коэффициента пропускания изучаемого объекта надо также выбрать шаг измерения по длинам волн $\Delta \lambda_{\text{изм.}}$ так, чтобы выполнялось условие

$$\Delta \lambda_{\text{изм.}} > \delta \lambda, \quad (1.7)$$

где $\delta \lambda$ - спектральная ширина *аппаратной функции* монохроматора спектрофотометра.

Если ширина входной щели будет больше ширины нормальной щели $S \gg S_0$, то влиянием дифракции и аберрациями на размер изображения входной щели в фокальной плоскости можно пренебречь. В этом случае изображение выходной щели представляется в виде прямоугольника шириной S^* . Тогда на участке длины в фокальной плоскости для выходной щели размером S_2 при условии, что $S_1 = S_2$, можно рассчитать выделяемый выходной щелью спектральный интервал

$$\delta \lambda = S_2 \frac{d\lambda}{dl}, \quad (1.8)$$

где S_2 - рабочая ширина выходной щели спектрофотометра, $\frac{d\lambda}{dl}$ - обратная линейная дисперсия монохроматора.

Спектральный интервал $\delta \lambda$, выделяемым монохроматором, различен в разных диапазонах спектра и зависит от размера ширины выходной щели прибора и линейной дисперсии.

Перед проведением спектральных измерений для длин волн λ_H и λ_K , ограничивающих спектральный диапазон измерения, рассчитывают по формуле (1.6) значение нормальной ширины щели S_0 . Далее выбирают ширину входной щели S_1 монохроматора так, чтобы её размер отвечал условиям $S \gg S_0$. Далее оценивают выделяемый выходной щелью S_2 спектральный интервал длин волн $\delta\lambda$ с учетом формулы (1.8), и исходя из соотношений (1.7) к (1.8), выбирают шаг измерения по длинам волн $\Delta\lambda_{изм}$.

На рис.1.2 показано, как выбор шага измерения влияет на результаты эксперимента. Между двумя соседними отсчетами на длинах волн λ_i и λ_{i+1} расстояние по шкале длин волн равно $\Delta\lambda$, оно постоянно при автоматической регистрации сигнала в заданном диапазоне длин волн от λ_H до λ_K .

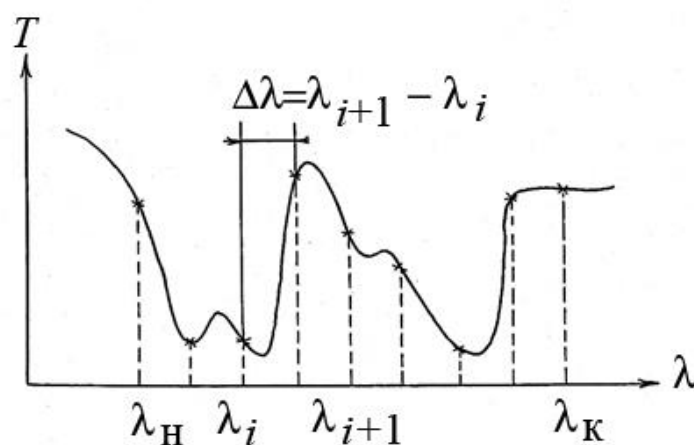


Рисунок 1.2 – К выбору шага измерения спектра по длинам волн

Если известна априорная информация о спектральных свойствах объекта, о положении максимумов поглощения в спектре, то можно оценить по имеющимся данным оптимальное значение $\Delta\lambda$, так, чтобы при измерении не было потери информации. Далее значение $\Delta\lambda$ и есть шаг измерения $\Delta\lambda_{изм}$, но его значение должно удовлетворять соотношению (1.7).

1.2. Описание монохроматора МДР-206

Монохроматоры предназначены для получения монохроматического излучения в широком спектральном диапазоне. На основе монохроматоров с использованием дополнительных устройств можно собирать автоматизированные спектральные установки для решения конкретных задач. Монохроматоры не являются средством измерения. Они

используются в научных и промышленных лабораториях в качестве отдельных приборов или в составе исследовательских комплексов.

Общий вид монохроматора показан на рисунке 1.3. Из рисунка видно, что конструкция матричного фотоприемника позволяет закрепить его на выходную щель монохроматора. В таблице 1.1 приведены технические характеристики монохроматора МДР-206.



Рисунок 1.3 – Внешний вид монохроматора МДР-206

Таблица 1.1 – Технические характеристики монохроматора МДР-206

Наименование характеристики	МДР-206
Спектральный диапазон, нм	от 190 до 5000
Фокусное расстояние зеркальных объективов, мм	180
Относительное отверстие	1:4
Пределы раскрытия щелей, мм	0 и 4,2
точность отсчета, мм при раскрытии от 0 до 0,2 мм при раскрытии от 0,2 до 4,2 мм	0,001 0,01
Питание монохроматоров осуществляется от сети переменного тока напряжением	(220 ± 22) В с частотой (50 ± 1) Гц

В монохроматоре МДР-206 используются сменные дифракционные решетки, их характеристики приведены в таблице 1.2. Размер

заштрихованной части всех решеток равен 50×40 мм, решетки работают в первом порядке спектра.

Таблица 1.2 – Характеристики дифракционных решеток

Число штрихов на миллиметр	1200	600	300
Рабочая область спектра, нм	200-1250	380-2500	760-5000
Область максимальной концентрации энергии, нм	500	1000	2000
Обратная линейная дисперсия, нм/мм МДР-206	4.3	8.6	17.2

1.3 Оптическая схема монохроматора

Оптическая схема монохроматора МДР-206 приведена на рисунке 1.4. Излучение от осветительной системы попадает на входную щель 1 монохроматора и проходит через нее. Далее пучок отражается от поворотного зеркала 2 и падает на сферическое зеркало 3. Входная щель 1 расположена в фокусе зеркала 3, поэтому после отражения от зеркала 3 уже параллельный пучок падает на дифракционную решетку 4. В результате дифракции излучения образуется система параллельных монохроматических пучков, которые при помощи сферического зеркала 5 и поворотного зеркала 6 направляются в плоскость выходной щели 7. На рабочую область спектра могут налагаться спектры высших порядков. Чтобы устранить их влияние, в комплект к монохроматору входит турель со сменными светофильтрами.

На входную щель монохроматора может быть установлена насадка, ограничивающая высоту входной щели.

В качестве источников излучения в малогабаритном осветителе монохроматора используется излучение галогенной лампы или дейтериевой лампы, излучение от которых при помощи зеркального сферического зеркала ($f'=101,5$ мм) направляется на входную щель. Переключение источников излучения позволяет выполнять исследования в заданном диапазоне спектра.

Конструкция осветителя позволяет собирать на базе монохроматора разные оптические схемы для выполнения исследований разными методами.

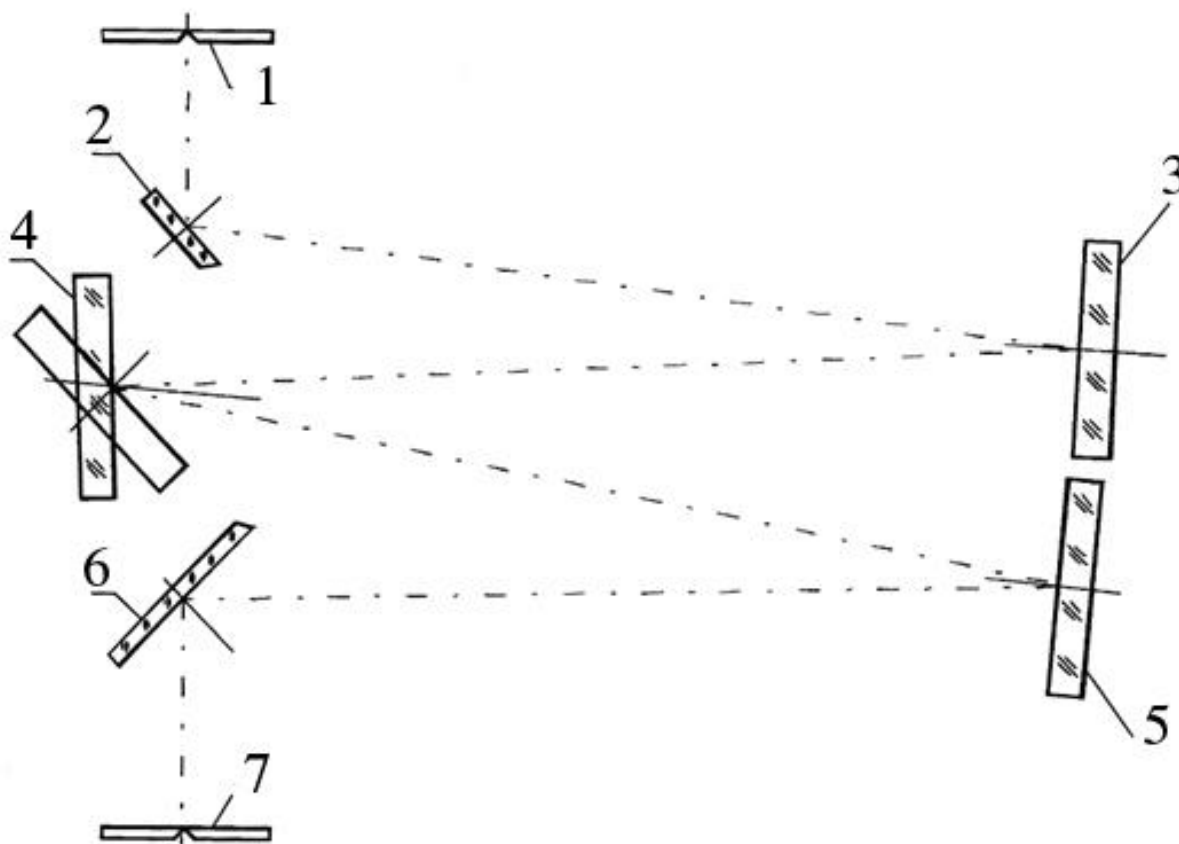


Рисунок 1.4 – Оптическая схема монохроматора: 1- входная щель; 2 – поворотное зеркало; 3 – сферическое зеркало; 4 – дифракционная решетка; 5 – сферическое зеркало; 6 – поворотное зеркало; 7 – выходная щель монохроматора

На входную щель монохроматора может быть установлена насадка, ограничивающая высоту входной щели.

Осветитель, конденсор, турель со светофильтрами, монохроматор крепятся при помощи стоек на рельс. Индикатор длины волны и кнопки управления расположены на передней панели монохроматора. В режиме ручного управления шаговым двигателем для поворота дифракционной решетки используют специальные кнопки, для автоматической записи данных в конструкции прибора предусмотрен разъем для подключения компьютера.

В памяти монохроматора хранятся данные для управления каждой их используемых решеток. Для управления работой монохроматора разработана специальная программа, которая и используется при проведении спектральных исследований.

2. Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с принципом работы спектрального комплекса и оптической схемой монохроматора МДР-206.
2. Совместно с преподавателем проверить правильность установки устройств комплекса (малогабаритного источника, конденсора, держателя образца, турели со светофильтрами) на рельсе и подключение устройств в разъемы. С порядком подключения отдельных устройств комплекса можно ознакомиться при необходимости в руководстве [1].
3. Измерения коэффициента пропускания образца многослойного диэлектрического фильтра выполняют в диапазоне длин волн 350–800 нм. В измерениях используют дифракционную решетку 1200 штрихов/мм.
4. Выполнить расчет нормальной ширины щели монохроматора и выделяемый выходной щелью спектральный интервал. На основании полученных данных подобрать шаг сканирования спектра.
5. Для записи экспериментальных данных в память компьютера можно более подробно ознакомиться с методикой работы программы управления монохроматором МДР-206 [2]. Необходимо обратить внимание на функционал панели «Меню», панели инструментов, на порядок работы с графическим полем на экране монитора, основными управляющими командами и встроенным калькулятором. При выполнении лабораторной работы получить инструктаж у преподавателя и при записи, обработке и сохранении данных руководствоваться краткой инструкцией пользователя управляющей программой.
6. Выполнить измерение спектра пропускания многослойного диэлектрического фильтра. Перед измерением на панели управления условиями сканированием указать диапазон измерений (350–800 нм), шаг сканирования в нм, скорость сканирования нм/мм, время накопления данных в сек. На рабочем столе монитора компьютера создать директорию для сохранения файлов с данными.
7. В спектральном диапазоне 350–800 нм провести измерения и выполнить расчет коэффициента пропускания по формуле

$$T(\lambda) = \frac{S(\lambda) - S_t(\lambda)}{S_0(\lambda) - S_t(\lambda)}, \quad (1.9)$$

где $S(\lambda)$ - аналитический сигнал; $S_t(\lambda)$ - сигнал темнового тока; $S_0(\lambda)$ - опорный сигнал. Регистрацию аналитического сигнала выполняют, когда в измерительном канале расположен исследуемый образец, а опорный сигнал регистрируют, выполняя исследования без образца в канале измерения.

8. При помощи встроенного калькулятора выполнить расчет спектра пропускания фильтра $T(\lambda)$, далее представить полученные данные в виде графика оптической плотности $D(\lambda)$, учитывая связь этой величины с коэффициентом пропускания. Необходимо сохранить рассчитанные значения коэффициента пропускания и оптической плотности в виде отдельных файлов данных. Построения графиков для отчета по лабораторной работе можно сделать в любом графическом пакете.
9. Выполнить анализ экспериментального спектра $T(\lambda)$, отметить на графике положение полос поглощения, максимального и минимального значений коэффициента пропускания.
10. Подготовить отчет по лабораторной работе, который должен включать краткие сведения по теории, основные формулы, экспериментальные графики и расчетные спектры, результаты анализа данных и выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

1. Поясните принцип работы монохроматора. Объясните назначение каждого элемента в оптической схеме монохроматора.
2. Какие характеристики монохроматора используют для анализа пригодности прибора к проведению спектральных исследований с большим разрешением?
3. Дайте определение нормальной ширины щели.
4. Как надо выбирать шаг сканирования по длинам волн при измерении спектра?
5. Поясните принцип работы автоматического спектрофотометра.
6. Охарактеризуйте источники и приемники, которые могут работать в составе спектрального комплекса.
7. Какие измерения можно выполнять на изучаемом автоматическом спектрофотометре?

Список литературы

1. Монохроматор МДР-206. Руководство по эксплуатации, ООО «ЛОМО ФОТОНИКА», 2007 г. 40 с.
2. Порядок работы с программой управления монохроматором МДР-206. Руководство пользователя, ООО «ЛОМО ФОТОНИКА», 2007 г. 50 с.
3. Бутиков Е.И. Оптика: учеб. пособие для студентов физических специальностей вузов. – 3-е изд., доп. – Лань, 2012. – 608 с.
4. Нагибина И.М., Москалев В.А., Рудин В.Л. Прикладная физическая оптика: учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2002. – 565 с.

Лабораторная работа № 2

Спектрофотометрическое исследование окрашенных растворов

Цель работы – ознакомление с методикой измерения спектров поглощения водных растворов кристаллогидратов на спектрофотометре и выполнение расчетов молекулярных характеристик веществ.

Задание на работу:

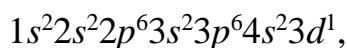
1. Изучить теоретическую часть работы и ознакомиться с методикой регистрации спектров на спектрофотометре.
2. Измерить спектр пропускания водного раствора кристаллогидрата $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ или $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ известной концентрации.
3. Построить графики спектров пропускания, оптической плотности и коэффициента экстинкции, выполнить количественную обработку результатов эксперимента.
4. Оформить отчет по лабораторной работе, в который включить краткие теоретические сведения, расчетные формулы, экспериментальные графики, выводы по работе.

1. Теоретическая часть

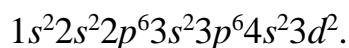
1.1 Переходные металлы и их кристаллогидраты

Группу химических элементов, в которую входят десять веществ от титана до галлия, называют переходными металлами. Электронная оболочка M у атомов переходной группы имеет пять дополнительных $3d$ орбиталей и становится 18-электронной. Рассмотрим кратко строение электронных оболочек элементов этой группы веществ.

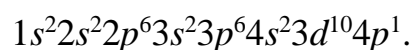
Электронная формула химического элемента скандия Sc , предшествующего в периодической системе титану Ti , имеет вид



то есть у элемента один электрон находится на d орбитали. У титана Ti электронная формула, характеризующая заполнение оболочек, равна



Завершает ряд переходных металлов элемент галлий Ga , у которого заполнение электронных $3d$ орбитали происходит полностью:



Логично было бы считать переходными металлами десять элементов от скандия до цинка, но вопрос исключения из списка Sc и присоединения Ga остается дискуссионным. Основной аргумент – сходность физических и химических свойств Sc с алюминием Al и иттрием Y, химическими элементами III группы. В других периодах системы химических элементов есть переходные элементы, но они более тяжелые.

Титан Ti, ванадий V, хром Cr, марганец Mn, железо Fe, кобальт Co, никель Ni, медь Cu, цинк Zn и галлий Ga не имеют близких им по свойствам более легких аналогов. Их химические свойства не меняются резко с изменением атомного номера, как свойства других элементов. В таблице 2.1 приведены данные о плотности и температуре плавления переходных химических элементов.

Таблица 2.1 – Плотность и температура плавления переходных металлов

№ п.п.	Химический элемент	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	T _{пл.} , °C
1	Ti	4.50	1680
2	V	5.96	1900
3	Cr	7.19	1890
4	Mn	7.44	1250
5	Fe	7.87	1539
6	Co	8.90	1492
7	Ni	8.90	1453
8	Cu	8.90	1083
9	Zn	7.10	420
10	Ga	5.80	30

У переходных металлов и их сплавов очень высокая твердость (Ni – 3.8, Cr – 9.0, Fe – 4.5, Cu – 3.0) и прочность. Для сравнения у Al значение твердости равно 2,9 по условной 10-балльной шкале. Такие свойства объясняются сильной химической связью между атомами в металле.

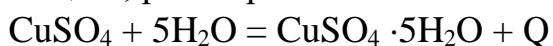
Большинство соединений переходных металлов имеют характерную окраску. Каждое соединение V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu интенсивно окрашено, причем цвет зависит не только от атомного номера данного металла, но и от степени окисления элемента. У Ti максимальная степень окисления +3 (Ti₂O₃), у V, Cr, Mn соответственно +5 (V₂O₅), +6 (CrO₃), +7 (Mn₂O₇). Однако эти соединения легко восстанавливаются до соединений, в которых элементы имеют степени окисления +2 или +3. Для элементов Fe, Co, Ni,

Cu, Zn максимальные степени окисления +2 и +3 (Fe_2O_3 , Co_2S_3 , NiO, CuO, ZnO).

Цвет соединения переходных элементов зависит от характера неметаллического элемента или аниона, с которым соединен данный металл. Поэтому считают, что цвет таких соединений связан с наличием у химического элемента незаполненной электронной *M*-оболочки, то есть она содержит менее 18 электронов. Если в химическом соединении переходного элемента *M*-оболочка заполнена, например в ZnSO_4 или у CuCl , то такие соединения бесцветны. Интересно, что заполненность *M*-оболочки определяет и способность вещества притягиваться к сильным магнитным полям, то есть соединение обладает парамагнитными свойствами.

Металлы переходных элементов образуют соединения, которые содержат *кристаллизационную воду*. Такие вещества называют *кристаллогидратами*.

Сернокислая медь CuSO_4 имеет белый цвет. При химической реакции с водой, выделяется не только большое количество тепла, но и продукт реакции меняет цвет, раствор становится светло синим.



Если полученный раствор подвергнуть выпариванию, то образуется кристаллогидрат $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, который называют медным купоросом, и его кристаллы имеют светло синюю окраску. В таблице 2.2 приведены данные о разных соединениях с участием металлов переходных элементов и указана их окраска.

На рис. 2.1 показано, что ион Fe^{+2} имеет четыре *3d* орбитали с одинаковыми неспаренными электронами и одну *3d* орбиталь с парой электронов. Кроме того, у иона остаются незанятыми три орбитали *4p* и *4s* орбиталь.

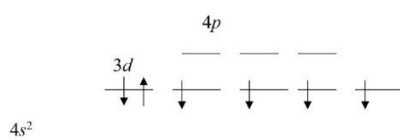


Рисунок 2.1 – Электронная конфигурация иона Fe^{+2}

Поэтому такой ион легко образует соединения $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Шесть молекул воды присоединяются к иону железа в виде комплекса $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$, а седьмая молекула занимает место в кристалле вблизи иона сульфата. Силы взаимодействия молекулы воды с катионом железа так велики, что ионы железа удерживают вокруг себя слой из этих молекул. Поэтому такую воду и называют кристаллизационной. Такие соединения образуют не только металлы переходных элементов, но другие вещества, например алюминиевые квасцы $\text{Al}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, сульфат магния $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Таблица 2.2 – Цвет химических соединений металлов переходных элементов

№ п.п.	Формула соединения	Название соединения	Цвет соединения
1	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	гидрид сульфата железа(II)	голубовато-зеленый
2	$\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	гидрид хлорида хрома (III)	зеленый
3	$\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	хромовые квасцы	тёмно-фиолетовый
4	MnCO_3	родохрозит	розово-красный
5	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	гидрид хлорида железа (III)	желтый
6	$\text{KFe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	железные квасцы	светло-фиолетовый
7	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	гидрид хлорида кобальта (II)	красный
8	CoO	окись кобальта (II)	черный (в растворе синий)
9	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	гидрид хлорида меди (II)	желтый
10	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	гидрид сульфата никеля	зеленый
11	Cu_2O	окись меди (I)	красный

При приготовлении растворов из гидратированных кристаллов переходных металлов образуются окрашенные растворы, в которых возникает аква-ионы типа $[\text{Me}(\text{H}_2\text{O})_6]^{n+}$. В таблице 2.3 приведены данные об окраске таких водных растворов.

Окрашенные водные растворы широко используют для приготовления жидкостных светофильтров благодаря их избирательному поглощению.

Поглощение электромагнитного излучения ионами металла сопровождается переходом электронов из $3d$ оболочки. В аква-ионах металла энергии $3d$ орбиталей не одинаковы, как например у тех же атомов в парах металла. Окружение иона молекулами воды снимает вырождение, а значит переход электрона из основного состояния в возбужденное

сопровождается поглощением разной энергии, следовательно, изменится местоположение максимумов полос поглощения и окраска растворов.

Таблица 2.3 Окраска ионов металлов в водном растворе

Число d-электронов	Число неспаренных d-электронов	Ион металла	Цвет
0	0	K^+, Ca^{2+}, Sc^{3+}	бесцветный
1	1	Ti^{3+}	розово-фиолетовый
2	2	V^{3+}	зеленый
3	3	Cr^{3+}	фиолетовый
4	4	Cr^{2+}	голубой
5	5	Mn^{2+}	бледно-розовый
6	4	Fe^{2+}	зеленый
7	3	Co^{2+}	розовый
8	2	Ni^{2+}	зеленый
9	1	Cu^{2+}	голубой
10	0	Cu^+, Zn^{2+}, Ga^{3+}	бесцветный

2. Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы:

1. У преподавателя получить рекомендации по измерению спектров водных растворов на автоматическом спектрофотометре.
2. Выполнить измерение спектра поглощения окрашенного раствора. Диапазон исследований и параметры сканирования спектра согласовать с преподавателем.
3. Построить графики коэффициента пропускания и оптической плотности $\tau=f(\lambda)$ и $D=f(\lambda)$. Расчет оптической плотности выполняют по формуле

$$D = \ln\left(\frac{1}{\tau}\right) = \varepsilon C_m d, \quad (2.1)$$

где ε - коэффициент экстинкции вещества, (литр/моль·см); C_m – концентрация раствора, (моль/литр); d – толщина поглощающего слоя раствора, (см).

4. Рассчитать спектр коэффициента экстинкции $\varepsilon = f(\lambda)$ с учетом значения концентрации раствора C_m и толщины измерительной кюветы d . По графику определить максимальное значение коэффициента экстинкции ε_{max} и найти местоположение на шкале длин волн значение λ_{max} . Отметить положение максимума поглощения на графике.
5. На графике коэффициента экстинкции $\varepsilon = f(\lambda)$ по шкале длин волн отметить значения λ_1 и λ_2 , для которых величина коэффициента экстинкции уменьшается в два раза и равна $\frac{\varepsilon_{max}}{2}$. Далее необходимо найти величину *полуширины* $\Delta\lambda$ в спектре коэффициента экстинкции. Рассчитать величину полуширины $\Delta\tilde{\nu}_{1/2}$, выразив значение этого параметра в волновых числах. В этом случае вместо длин волн используются волновые числа $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$, см⁻¹.
6. В спектрометрических исследованиях используется характеристика, которая называется *интегралом поглощения*, и она рассчитывается по формуле

$$A = \int \varepsilon(\nu) d\nu. \quad (2.2)$$

Из формулы видно, что для определения численного значения этой характеристики необходимо выполнить интегрирование функции, описывающей коэффициент экстинкции.

Но численное значение интеграла поглощения можно определить по другой формуле, которая дает хорошее приближение в расчетах

$$A = 1,07 \cdot \varepsilon_{max} \Delta\tilde{\nu}_{1/2}. \quad (2.3)$$

7. Если известно значение интеграла поглощения A , можно найти величину *силы осциллятора*

$$f_{погл.} = \frac{3mc}{\pi e^2 C_m} \cdot \Theta(n) \cdot A, \quad (2.4)$$

где m , e – масса и заряд электрона, c – скорость света, $\Theta(n)$ – корректирующий множитель. Для водного раствора

$$\Theta(n) = \frac{9n}{(n^2+2)^2}, \quad (2.5)$$

где $n=1,33$ показатель преломления воды.

В классической теории поглощение реальных молекул изучают на моделях осцилляторов, частоты колебания которых совпадают с положением максимумов полос поглощения молекул. У осциллятора i есть заряд e_i и масса m_i .

Сила осциллятора – это множитель, который определяет долю заряда и массы электрона, при которой поглощающая способность

данного осциллятора равна поглощающей способности реальной молекулы

$$\frac{e_i^2}{m_i} = f_i \frac{e^2}{m}. \quad (2.6)$$

Так как молекула обладает набором собственных частот поглощения, то, согласно классической теории, сумма всех сил осцилляторов f_i равна числу электронов в реальной молекуле:

$$\sum_i f_i = z. \quad (2.7)$$

Сила осциллятора является мерой интенсивности полосы поглощения, но подлинный смысл f_i раскрывает квантовая теория.

$$f_i = \frac{3mh\nu_{max}}{\pi e^2} B^\uparrow, \quad (2.8)$$

где B^\uparrow – интегральный по частоте коэффициент Эйнштейна, определяющий вероятность переходов в молекуле и интенсивность полосы поглощения, ν_{max} – максимум полосы поглощения, (Гц).

Вероятность перехода связана с матричным элементом дипольного момента $|\mu_{jk}|$ соотношением

$$B^\uparrow_{jk} = \frac{8\pi^3}{3h^2} \cdot |\mu_{jk}|^2, \quad (2.9)$$

где переход электрона происходит с уровня j на уровень k .

8. Рассчитать величину матричного элемента дипольного момента по формуле

$$|\mu| = 0.83 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt{\frac{f_{погл.}}{\bar{\nu}_{max}}}, \quad (\text{эл. ст. ед.} \cdot \text{м}). \quad (2.10)$$

Значение дипольного момента выразить также в единицах измерения системы СИ.

9. Подготовить отчет по лабораторной работе, который должен включать краткие сведения по теории, основные формулы, экспериментальные графики и расчетные спектры, результаты анализа данных и выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

1. Охарактеризуйте строение электронных оболочек химических элементов переходной группы.
2. Как свойства химических элементов переходной группы зависят от заполненности электронных оболочек?
3. Какие вещества называют кристаллогидратами?
4. Почему соединения с металлами из переходной группы имеют окраску?
5. Какие характеристики можно рассчитать по спектрам пропускания?
6. В чем физический смысл интеграла поглощения?

7. Как в расчетах используют значение силы осциллятора и в чем заключается физический смысл этой величины?
8. Что характеризует интегральный по частоте коэффициент Эйнштейна?

Список литературы

1. Бутиков Е.И. Оптика: учеб. пособие для студентов физических специальностей вузов. – 3-е изд., доп. – Лань, 2012. – 608 с.
2. Нагибина И.М., Москалев В.А., Рудин В.Л. Прикладная физическая оптика: учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2002. – 565 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Измерение спектров НПВО и расчет оптических постоянных красителя

Цель работы – изучение явления нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), измерение спектров НПВО красителя и расчет спектров оптических постоянных – показателя преломления и показателя поглощения красителя.

Задание по работе:

1. Изучить теорию метода спектроскопии НПВО.
2. Записать спектр НПВО и спектр многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) образца в диапазоне длин волн 350–800 нм.
3. По спектрам НПВО, измеренным для поляризованного излучения, определить длины волн полос поглощения и рассчитать спектры показателя преломления и поглощения красителя. Сравнить полученные значения оптических постоянных с литературными данными для заданной длины волны.
3. По спектрам МНПВО, измеренным для поляризованного излучения, определить длины волн полос поглощения и по спектрам отражения рассчитать толщину слоя красителя.
4. Составить отчет по лабораторной работе.

1. Теоретическая часть

Оптические свойства вещества характеризуются показателем преломления n и показателем поглощения k . Методы оптического пропускания и зеркального отражения не всегда применимы для

определения оптических постоянных вещества, если поглощающие свойства характеризуются значением показателя поглощения в пределах $0,004 < \kappa < 0,4$.

Метод НПВО относится к методам спектроскопии отраженного света, когда излучение падает из прозрачной оптически более плотной среды в оптически менее плотную поглощающую среду в условиях полного внутреннего отражения. Величина коэффициента отражения для углов падения, превышающих угол полного внутреннего отражения $\theta_{кр}$, зависит от взаимодействия затухающей волны с веществом образца. При полном внутреннем отражении вся энергия отражается обратно в первую среду. Но часть энергии распространяется во второй среде вдоль границы раздела. Проникновение части энергии во вторую среду лежит в основе физического явления НПВО.

Известно, что наблюдение явления полного внутреннего отражения (ПВО) становится возможным, если угол падения излучения на границу двух сред θ становится больше критического $\theta_{кр}$.

Значение критического угла определяется по закону преломления Снеллиуса:

$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \varphi, \quad n_2 > n_1 \quad (3.1)$$

где n_2 и n_1 – показатели преломления первой и второй сред. При $\theta = \theta_{кр}$ угол преломления $\varphi = \frac{\pi}{2}$, т. е. $\sin \varphi = 1$.

$$\sin \theta_{кр} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.2)$$

Если угол падения $\theta > \theta_{кр}$, то всё падающее излучение на границу сред отражается обратно в первую среду.

Однако во второй, оптически менее плотной среде электромагнитное поле не равно нулю. Во второй среде в условиях ПВО возникает неоднородная волна. В оптически менее плотной первой среде из-за суперпозиции падающей и отраженной волн возникает стоячая волна.

Пусть на границу раздела двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 , причем $n_1 > n_2$, падает излучение под углом θ (рис. 3.1). Для преломленной волны, распространяющейся вдоль оси x' , справедливо выражение для напряженности электромагнитного поля E_φ

$$\begin{aligned} E_\varphi &= E_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{x'}{v_2} \right) \right] = E_0 \exp \left[i\omega \left(t - \frac{x \sin \varphi + z \cos \varphi}{v_2} \right) \right] = \\ &= E_0 \exp \left[-\frac{i\omega z \cos \varphi}{v_2} \right] \exp \left[i\omega \left(t - \frac{x \sin \varphi}{v_2} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Выражение (3.3) можно преобразовать с учетом соотношения

$$\cos \varphi = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta \right)^2} = \pm i \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta \right)^2 - 1}. \quad (3.4)$$

Тогда получим:

$$E_{\varphi} = E_0 \exp \left[\mp \frac{\omega z}{v^2} \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta\right)^2 - 1} \right] \exp \left[i\omega \left(t - \frac{x}{v_2 / \sin \varphi} \right) \right] =$$

$$= E_0 \exp \left(-\frac{z}{d_{\text{пр}}} \right) \exp \left[i\omega \left(t - \frac{x}{v_2 / \sin \varphi} \right) \right]. \quad (3.5)$$

Выражение (3.5) описывает неоднородную волну, которая распространяется вдоль поверхности раздела в направлении оси X . Амплитуда волны зависит от координаты z , которая определяет расстояние от поверхности раздела вглубь образца. Физический смысл имеет только знак «-», так как знак «+» в показателе экспоненциальной функции соответствует возрастанию амплитуды во второй среде.

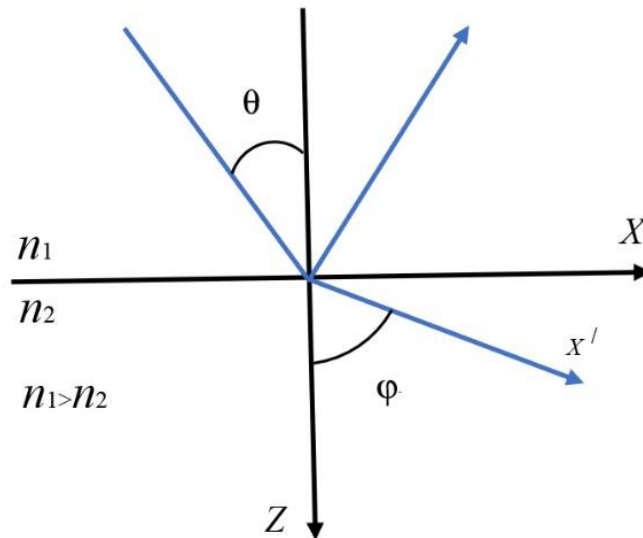


Рисунок 3.1 – К выводу выражений (3.3) – (3.5)

Знак "минус" характеризует волну, амплитуда которой убывает по мере проникновения во вторую среду, то есть затухающую волну. *Глубина проникновения* $d_{\text{пр}}$ затухающей волны определяется как расстояние от поверхности раздела, на котором амплитуда электрического поля уменьшается в e раз. Можно выполнить расчет величины $d_{\text{пр}}$ по формуле

$$\frac{2\pi}{\lambda_2} d_{\text{пр}} \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta\right)^2 - 1} = 1, \quad (3.6)$$

тогда

$$d_{\text{пр}} = \frac{\lambda_2}{2\pi \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta\right)^2 - 1}} = \frac{\lambda_1}{2\pi \sqrt{\sin^2 \theta - n_{21}^2}}, \quad (3.7)$$

где λ_0 – длина волны в вакууме; λ_1 – длина волны в оптически более плотной среде; $n_{21} = n_2/n_1$ – относительный показатель преломления; θ – угол падения излучения на границу раздела двух сред.

Из анализа формулы (3.7) следует: 1) при фиксированном угле падения глубина проникновения $d_{\text{пр}}$ будет возрастать с увеличением относительного показателя преломления n_{21} ; 2) глубина проникновения зависит от длины

волны λ_1 излучения; 3) для фиксированной длины волны λ_1 и относительного показателя преломления n_{21} глубина $d_{\text{пр}}$ уменьшается с увеличением угла падения θ . Если угол падения будет близким к критическому углу $\theta \rightarrow \theta_{\text{кр}}$, тогда значение $d_{\text{пр}} \rightarrow \infty$.

Если оптически менее плотная среда является поглощающей, то наблюдается нарушенное ПВО (НПВО). В этом случае часть энергии во второй среде поглощается, и при отражении уже не происходит полного возвращения энергии в первую среду. Измеряемый коэффициент отражения не будет достигать 100%.

Уравнения Френеля, в которых проведена замена действительного показателя преломления n_2 на комплексный показатель $\widehat{n}_2 = n_2 - ik_2$, используют для аналитического описания отражения в условиях НПВО.

Для понимания механизма взаимодействия затухающей волны с поглощающей средой используют приближения о небольшой величине поглощения в массивных образцах и тонких пленках. Это приближение справедливо для большинства материалов. Величину взаимодействия затухающей волны со слабо поглощающей средой описывают, используя понятие “эффективной толщины” $d_{\text{эфф}}$ поглощающего слоя.

Закон Бугера-Ламберта-Бера выполняется при проведении спектральных исследований методом НПВО. Тогда с учетом закона сохранения энергии величина поглощения может быть выражена через коэффициент отражения $A = 1 - R$, для значений $A < 0,1$. Поэтому справедлива формула, которая хорошо подтверждается практическими исследованиями,

$$R \approx e^{-\alpha d_{\text{эфф}}}, \quad (3.8)$$

где α – натуральный показатель поглощения $\alpha = \frac{4\pi k_2}{\lambda_2}$, $d_{\text{эфф}}$ – эффективная толщина слоя.

Эффективная толщина поглощающего слоя $d_{\text{эфф}}$ эквивалентна действительной толщине слоя вещества d , для которой в измеренном спектре пропускания получится такая же величина поглощения, какая наблюдается в спектре НПВО.

Для многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) формула (3.8) имеет вид:

$$R_{\Sigma} = e^{-\alpha N d_{\text{эфф}}} \quad (3.9)$$

где N – число отражений.

Для массивных образцов, у которых толщина d намного больше глубины проникновения $d_{\text{пр}}$, с учетом приближения о малом поглощении для перпендикулярной (\perp) и параллельной поляризации (\parallel) зондирующего излучения выражения для эффективных толщин можно получить из формулы (3.7):

$$d_{\text{эфф}}^{\perp} = \frac{\lambda n_{21} \cos \theta}{\pi(1-n_{21}^2)(\sin^2 \theta - n_{21}^2)^{1/2}}; \quad (3.10)$$

$$d_{\text{эфф}}^{\parallel} = \frac{\lambda n_{21} \cos \theta (2 \sin^2 \theta - n_{21}^2)}{(1-n_{21}^2)\pi[(1+n_{21}^2) \sin^2 \theta - n_{21}^2](\sin^2 \theta - n_{21}^2)^{1/2}}. \quad (3.11)$$

Эффективная толщина для образцов в виде тонких пленок при условии $d \ll d_{\text{пр}}$ определяется по формулам:

$$d_{\text{эфф}}^{\perp} = \frac{4n_{21}d \cos \theta}{1-n_{31}^2}, \quad (3.12)$$

$$d_{\text{эфф}}^{\parallel} = \frac{4n_{21}d \cos \theta [(1-n_{32}^4) \sin^2 \theta - n_{31}^2]}{(1-n_{31}^2)[(1+n_{31}^2) \sin^2 \theta - n_{31}^2]}, \quad (3.13)$$

где $n_{31} = \frac{n_3}{n_1}$, $n_{32} = \frac{n_3}{n_2}$ – относительные показатели преломления соответствующих сред. Уравнения (3.10) и (3.11) обеспечивают точность в измерениях в несколько процентов при $\frac{2\pi d}{\lambda} < 0,1$ и поглощении $\kappa_2 < 0,1$.

Спектральные исследования методом НПВО для изучения поглощающих свойств тонких пленок и массивных образцов выполняют в поляризованном свете. Для заданного угла падения измеряют спектры коэффициентов отражения R_{\perp} и R_{\parallel} , либо интенсивность отраженного света при двух углах падения при известном состоянии поляризации излучения.

Уравнение Френеля для излучения, отраженного от границы раздела двух сред – прозрачной среды 1 и среды 2 с комплексным показателем преломления $\hat{n}_2 = n_2 - ik_2$, имеет следующий вид:

$$R_{\perp} = \left[\frac{n_1 \cos \theta - [(n_2 - ik_2)^2 - n_1^2 \sin^2 \theta]^{1/2}}{n_1 \cos \theta + [(n_2 - ik_2)^2 - n_1^2 \sin^2 \theta]^{1/2}} \right]^2, \quad (3.14)$$

$$R_{\parallel} = \left[\frac{(n_2 - ik_2)^2 \cos \theta - n_1 [(n_2 - ik_2)^2 - n_1^2 \sin^2 \theta]^{1/2}}{(n_2 - ik_2)^2 \cos \theta + n_1 [(n_2 - ik_2)^2 - n_1^2 \sin^2 \theta]^{1/2}} \right]^2, \quad (3.15)$$

где θ – угол падения.

Разделив уравнения (3.14) и (3.15) на действительную и мнимую части, получают два уравнения для расчета значений оптических постоянных n_2 и κ_2 . Оптические постоянные тонких пленок можно найти из уравнений для эффективных толщин. Для фиксированного угла экспериментальные значения коэффициентов отражения для поляризованного излучения R_{\perp} и R_{\parallel} используют для нахождения отношения

$$\frac{d_{\text{эфф}}^{\perp}}{d_{\text{эфф}}^{\parallel}} = \frac{1-R_{\perp}}{1-R_{\parallel}}. \quad (3.16)$$

Если известны n_1 и n_3 , то с помощью уравнений (3.12) и (3.13) вычисляют показатель преломления n_2 . Далее для известной толщины пленки, вычислив $d_{\text{эфф}}^{\perp}$ и $d_{\text{эфф}}^{\parallel}$, можно рассчитать значение натурального показателя поглощения α и показателя поглощения κ_2 из формул

$$R_{\perp} = \exp(-\alpha d_{\text{эфф}}^{\perp}) \text{ и } R_{\parallel} = \exp(-\alpha d_{\text{эфф}}^{\parallel}). \quad (3.17)$$

Исследования методом НПВО выполняют с использованием специальных измерительных ячеек – элементов НПВО или элементов МНПО. Изучаемый образец находится в контакте с поверхностью рабочей гранью элемента. Излучение проходит через такой элемент и испытывает полное внутреннее отражение.

Для описания свойств элемента НПВО используют следующие характеристики: рабочий угол θ падения излучения; размер светового отверстия S_0 ; число N отражений; количество проходов пучка через измерительную ячейку; n_1 – показатель преломления материала, из которого изготовлен элемент и качество подготовки измерительной грани элемента.

Для регистрации контрастных спектров НПВО необходимо правильно подобрать элемент НПВО. На рис. 3.2 приведены примеры конструкций элементов НПВО и МНВО, которые используются в лабораторной работе. Показатели преломления материалов, из которых изготовлены измерительные ячейки, равны соответственно $n_1=1,65$ и $n_1=1,45$.

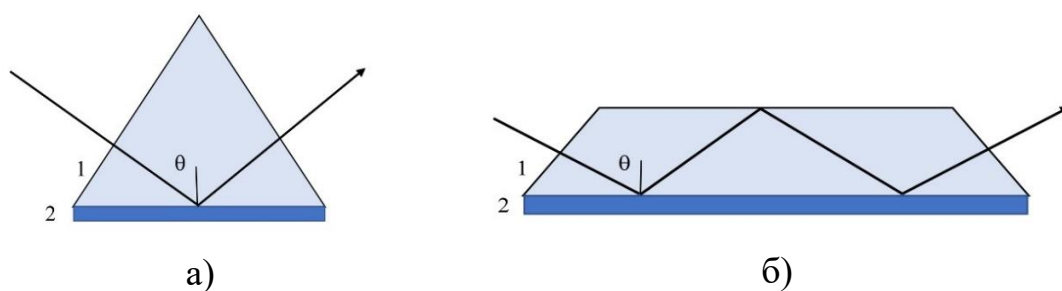


Рисунок 3.2 – Конструкции измерительных ячеек: а) – элемент НПВО; б) – элемент МНПО

2. Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться со схемой эксперимента. Измерительная схема собрана на базе спектрально-вычислительного комплекса и монохроматора МДР-206.
2. Рассчитать рабочие углы θ элементов НПВО и МНПО, используемых в эксперименте, предварительно выполнив измерения граней ячеек.
3. Получить у преподавателя образец красителя. Ознакомиться с правилами работы с веществом в лабораторных условиях, с методикой нанесения красителя на поверхность рабочей грани измерительной ячейки, а также с оптическими свойствами. В лабораторной работе используется на выбор несколько образцов красителя.

4. В диапазоне 350–800 нм выполнить измерения сигнала, регистрируемого приемником для темнового тока.
5. Установить элемент НПВО в измерительный канал и выполнить измерения потока излучения в диапазоне 350–800 нм, прошедшего через измерительную ячейку. Измерения выполняются для одного угла падения излучения на рабочую грань элемента НПВО, но для двух состояний поляризации излучения.
6. Нанести краситель на поверхность рабочей грани элемента НПВО и в том же спектральном диапазоне выполнить измерения потока излучения, прошедшего через измерительную ячейку. Измерения выполняются для двух состояний поляризации зондирующего излучения.
7. Установить элемент МНПВО в измерительный канал и в диапазоне 350–800 нм выполнить измерения потока излучения, прошедшего через измерительную ячейку. Измерения выполняются для одного угла падения излучения на рабочую грань элемента МНПВО, но для двух состояний поляризации зондирующего излучения.
8. Нанести краситель на поверхность рабочей грани элемента МНПВО и в том же спектральном диапазоне выполнить измерения потока излучения, прошедшего через измерительную ячейку. Измерения выполняются для двух состояний поляризации зондирующего излучения.
9. С учетом величины сигнала темнового тока выполнить вычисления коэффициентов отражения по формуле

$$R(\lambda) = \frac{S(\lambda) - St(\lambda)}{S_0(\lambda) - st(\lambda)}, \quad (3.18)$$

где $S(\lambda)$ - аналитический сигнал; $St(\lambda)$ - сигнал темнового тока; $S_0(\lambda)$ - опорный сигнал. Опорный сигнал получают при измерениях до нанесения красителя на поверхность рабочих граней элементов НПВО и МНПВО, а аналитический сигнал – после нанесения красителя. Расчет выполняются с учетом того, что измерения проводились в поляризованном свете.

10. Построить графики спектров НПВО и МНПВО изучаемого красителя. В спектрах отметить положения максимумов полос поглощения λ_{max} и для этих длин волн найти значения коэффициентов отражения.
11. По экспериментальным спектрам НПВО красителя выполнить расчет спектров оптических постоянных. В расчетах сделать предположение, что в эксперименте используется модельное приближение о слое, как о толстой пленке, размер которой превышает глубину проникновения затухающей волны. В расчетах использовать формулы (3.8), (3.10) и (3.11). Сравнить полученные значения оптических постоянных с литературными данными для заданной длины волны.
12. Выполнить расчеты толщины пленки красителя, когда измерения выполнялись с использованием элемента МНПВО.

13. Подготовить отчет по лабораторной работе, включив в него расчетные графики, результаты анализа данных и выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

1. Объясните физическую природу явления нарушенного полного внутреннего отражения.
2. Какие модельные приближения используются для количественной обработки спектров НПВО и МНПВО?
3. Как соотносятся между собой глубина проникновения затухающей волны в поглощающей оптически менее плотной среде и эффективная толщина образца?
4. Можно ли использовать формулы Френеля для аналитических расчетов в спектроскопии НПВО?
5. Какой из спектров (пропускания, спектр отражения или спектр НПВО) наиболее пригоден для интерпретации экспериментальных данных при изучении поглощения в тонких пленках?
6. Как правильно выбрать измерительную ячейку и рабочий угол при измерении спектров НПВО слабо поглощающих сред?
7. Какие характеристики элементов НПВО и МНПВО влияют на получение контрастных спектров?

Список литературы

1. Бутиков Е.И. Оптика: учеб. пособие для студентов физических специальностей вузов. – 3-е изд., доп. – Лань, 2012. – 608 с.
2. Нагибина И.М., Москалев В.А., Рудин В.Л. Прикладная физическая оптика: учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2002. – 565 с.

Лабораторная работа № 4

Исследование явления рассеяния излучения в мутных средах

Цель работы – ознакомиться с явлением рассеяния излучения в мутных средах и опытом Д. Тиндаля. Методом компьютерного моделирования выполнить расчет характеристик рассеяния излучения (0,36–0,78 мкм) для заданной среды, результаты расчетов представить в виде графиков.

Задание по работе:

1. Изучить теорию рассеяния излучения в мутных средах и познакомиться с разными видами рассеяния излучения в веществе.

2. Выполнить расчеты интенсивности рассеянного света в видимом диапазоне спектра, построить индикатрисы рассеяния для разных углов наблюдения рассеяния, оценить степень поляризации рассеянного излучения.
3. Исследовать зависимость интенсивности рассеянного излучения при изменении размера рассеивающих частиц.
4. Подготовить отчет, сделать выводы по работе.

1. Теоретическая часть

1.1 Виды рассеяния

При взаимодействии излучения с веществом возникает явление рассеяния излучения. Изучив свойства рассеянного излучения видимого диапазона (рассеянного света), то есть его интенсивность, состояние поляризации и спектральный состав, можно объяснить многие явления природы. Изучение механизма рассеяния излучения позволяет получить сведения о структуре молекул, молекулярных кристаллов и жидкостях, о природе межмолекулярных сил.

Рассеяние света обусловлено существованием в среде *оптических неоднородностей*, которые могут быть разными по форме, размерам и физической природе.

Закономерности рассеяния света *мутными средами* изучал английский ученый Джон Тиндаль (1820–1893), и такой вид рассеяния часто называют эффектом Тиндаля или тиндалевским рассеянием. К мутным средам относят туманы, дымы, эмульсии, суспензии, коллоидные растворы. В таких средах присутствуют частицы иной физической природы. Мутные среды широко распространены в естественной природе и возникают в результате промышленной деятельности человека.

Крупные частицы веществ, размеры которых сравнимы и больше длины волны излучения, могут стать оптическими неоднородностями на пути излучения. Если концентрация рассеивающих частиц становится большой, то такие скопления частиц могут стать непрозрачными для излучения из-за потерь света на рассеяние. Рассеяние излучения на крупных частицах было изучено немецким физиком Густовом Ми (1868–1957) и такой вид рассеяния называют рассеянием Ми. Он изучил закономерности рассеяния света на крупных металлических частицах сферической формы.

Если размеры частиц меньше длины волны излучения, то такие *мелкодисперсные системы* практически прозрачны. Этот вид рассеяния связывают с исследованиями английского ученого Джона Уильяма Стретта Рэлея (1842–1919). Он математически решил задачу рассеяния излучения на

частицах малого размера и объяснил наблюдаемые в эксперименте закономерности. Такой вид рассеяния называют *рэлеевским*.

Рассеяние света может наблюдаться и в совершенно *чистых средах*, например, в газах и жидкостях. Явление рассеяния возникает из-за хаотического теплового движения молекул, приводящего к появлению оптических неоднородностей. Если количество молекул в элементарном объеме чистого вещества меняется во времени случайным образом, то возникают локальные изменения его плотности и показателя преломления. На таких флуктуациях плотности и происходит рассеяние излучение.

1.2 Рассеяние света мутными средами

В мутных средах рассеяние излучения происходит на чужеродных частицах для оптической среды. Такие частицы находятся во взвешенном состоянии в газе, жидкости и в твердом веществе. Они известны под названием *эмульсий* (частицы жидкости в жидкости), *суспензий* (твердые частицы в жидкости), *дымы* (твердые частицы в газах). Если линейные размеры частиц меньше длины волны, то интенсивность рассеянного света можно рассчитать по формулам Рэлея.

В физической модели, описывающей явление рассеяния, сделаны следующие предположения. Рассеивающие частицы имеют сферическую форму с радиусом r , а оптические свойства частицы характеризуются показателем преломления n , и частицы не обладают электропроводящими свойствами.

При распространении излучения в среде с такими частицами под воздействием переменного электрического поля у них возникают дипольные моменты, величина которых меняется с частотой возбуждающего излучения. В этом случае частица сама становится источником излучения вторичных электромагнитных волн. Если найти суммарную интенсивность вторичных колебаний, то можно описать параметры рассеянного излучения в любой точке изучаемого объема.

Неравенство, определяющее условие, при котором можно рассчитать характеристики рассеянного света, имеет вид

$$\frac{2\pi nr}{\lambda} \ll 1, \quad (4.1)$$

где λ - длина волны излучения. Из условия (4.1) можно найти соотношение между размерами частиц, их оптическими свойствами и длиной волны света для решаемой задачи. Схема опыта Д. Тиндаля приведена на рис. 4.1.

Пусть естественно-поляризованный свет с интенсивностью I_0 распространяется в направлении оси X через рассеивающую среду. Линия OA , которая расположена под углом β к оси X , определяет направление, вдоль которого распространяется рассеянное излучение. Интенсивность

рассеянного света можно охарактеризовать двумя составляющими: I_1 – составляющая, у которой вектор напряженности электрического поля рассеянного излучения перпендикулярен плоскости XOY , и I_2 – составляющая, у которой вектор напряженности электрического поля параллелен плоскости XOY . Интенсивности составляющих можно рассчитать по следующим формулам:

$$I_1 = I_0 \cdot \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \cdot N_0 \cdot \left(\frac{n^2 - n_0^2}{n^2 + 2n_0^2} \right) \cdot n_0^4 \cdot \frac{1}{2}, \quad (4.2)$$

$$I_2 = I_0 \cdot \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \cdot N_0 \cdot \left(\frac{n^2 - n_0^2}{n^2 + 2n_0^2} \right) \cdot n_0^4 \cdot \frac{\cos^2 \beta}{2}. \quad (4.3)$$

Угол β называют *углом рассеяния*, и он может меняться от 0° до 360° . Показатель преломления частицы обозначен через n , а показатель преломления окружающей среды как n_0 . N_0 – это количество частиц в единице элементарного объема, а объем одной частицы равен соответственно $V = \frac{4}{3}\pi r^3$. R – это длина отрезка OA , который определяет расстояние от рассеивающей частицы до точки наблюдения.

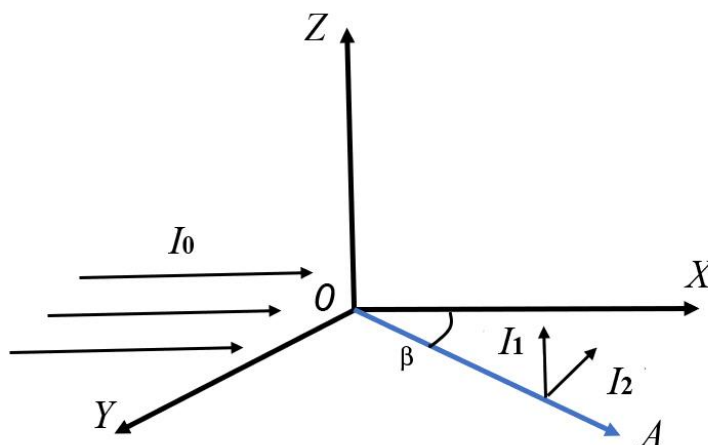


Рисунок 4.1 – К расчету интенсивности рассеяния в мутных оптических средах

Суммарная интенсивность рассеянного света для любого направления и в любой точке наблюдения можно рассчитать по формуле

$$I = I_1 + I_2 = I_0 \cdot \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \cdot N_0 \cdot \left(\frac{n^2 - n_0^2}{n^2 + 2n_0^2} \right) \cdot n_0^4 \cdot (1 + \cos^2 \beta). \quad (4.4)$$

Можно сделать некоторые выводы, вытекающие из формулы (4.4).

1. Интенсивность рассеянного света обратно пропорциональная четвертой степени длины волны возбуждающего света $I \sim \frac{1}{\lambda^4}$ и пропорциональна квадрату объема частиц V и концентрации частиц N_0 .
2. Совместим начало отсчета полярной системы координат с отдельной частицей и отложим в направлении угла рассеяния β отрезок, равный

интенсивности рассеянного излучения $I(\beta)$. Тогда, меняя направление угла 0° до 360° , можно получить поверхность, которая называется *индикатрисой рассеяния*.

Из формулы (4.3) видно, что если углы рассеяния становятся равными $\beta = \frac{\pi}{2}, \beta = \frac{3\pi}{2}$, то составляющая интенсивности рассеяния $I_2 = 0$, то есть рассеянный свет будет полностью поляризован. Вектор напряженности электрического поля такого излучения колеблется вдоль оси Z .

3. Степень поляризации характеризует состояние поляризации рассеянного света, и для ее расчета можно воспользоваться формулой

$$\Delta = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}, \quad (4.5)$$

При углах рассеяния $\beta = \frac{\pi}{2}, \beta = \frac{3\pi}{2}$ степень поляризации максимальна и становится равной единице. Для других углов рассеяния степень поляризации можно найти по формуле

$$\Delta = \frac{\sin^2 \beta}{1 + \cos^2 \beta}. \quad (4.6)$$

4. Если показатели преломления среды и материала частиц разной природы станут равны между собой, $n = n_0$, то явление рассеяния не будет наблюдаться.

2. Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы:

1. Экспериментальная часть задания, выполняемая методом компьютерного моделирования, может быть реализована в любом математическом пакете прикладных программ, обеспечивающем проведение численных расчетов и построение научных графиков. Полученные в результате моделирования данные далее должны быть включены в отчет по лабораторной работе.

2. Необходимо уточнить у преподавателя вариант задания, который определяет условия для виртуального эксперимента, выполняемого при помощи метода компьютерного моделирования.

3. Ознакомиться с теоретическими основами, математической моделью и с экспериментальными условиями, для которых методом компьютерного моделирования рассчитываются параметры рассеянного света в мутных средах. Варианты заданий и условия рассеяния приведены в таблице 4.1

4. Необходимо выполнить следующие модельные расчеты:

4.1 Исследовать характер изменения интенсивностей рассеянного излучения для составляющих I_1, I_2 , и суммарной I в спектральном диапазоне длин волн от 0,36 до 0,78 мкм для трех углов рассеяния $\beta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$. При этом сделать предположение, что размер частиц r , расстояние

до точки наблюдения R и число частиц N_0 остаются постоянными величинами. В расчетах положить интенсивность исходного пучка равной $I_0=1$.

Таблица 4.1 – Условия прохождения света через мутные среды

№ варианта	Природа частицы и среды	Размер одной частицы r , мкм	Показатель преломления		R , см	N_0	диапазон размеров частиц r , мкм
			частицы n	среды n_0			
1	вода в воздухе	0,025	1,33	1	10	10^5	0,025-0,04
2	уголь в воздухе	0,02	1,78	1	20	10^5	0,015-0,03
3	нефть в воде	0,025	1,5	1,33	35	10^5	0,015-0,03
4	уголь в воде	0,02	1,78	1,33	20	10^5	0,015-0,03
5	песок в воздухе	0,025	1,46	1	40	10^5	0,015-0,03

4.2 Изучить формы индикатрис рассеяния для составляющих интенсивностей света I_1 , I_2 , и суммарной интенсивности I , если угол рассеяния β будет меняться от 0° до 360° . Расчеты выполнить для длины волны $\lambda=0,4$ мкм. При этом сделать предположение, что размер частиц r , расстояние до точки наблюдения R и концентрация частиц N_0 остаются постоянными величинами. В расчетах положить интенсивность исходного пучка равной $I_0=1$.

4.3 Исследовать характер изменения для составляющих интенсивностей рассеянного света I_1 , I_2 и суммарной интенсивности I , если размеры рассеивающих частиц могут меняться. Диапазон изменений размеров частиц также приведен в таблице 4.1. Расчеты выполнить для длины волны $\lambda=0,4$ мкм. При этом сделать предположение, что расстояние до точки наблюдения R и число частиц N_0 остаются постоянными величинами. В расчетах положить интенсивность исходного пучка равной $I_0=1$.

4.4 Выяснить, как будет изменяться степень поляризации рассеянного света, если угол рассеяния β от меняется 0° до 360° .

5. Подготовить отчет по лабораторной работе. Итоги выполнения расчетного задания методом компьютерного моделирования оформить в виде графиков, при необходимости в виде таблиц.

6. Сделать выводы по исследованию рассеянного света мутной средой на основе анализа полученных данных.

Вопросы для самопроверки

1. Как рассеяние рассеяния излучения зависит от размера рассеивающих частиц?
2. Как интенсивность рассеянного света зависит от длины волны, если наблюдение выполняют для мелкодисперсной среды?
3. Почему интенсивность рассеянного света зависит от оптических свойств рассеивающих частиц?
4. Почему рассеянное излучение поляризовано?
5. Во сколько раз увеличится интенсивность рассеянного света, если показатель преломления рассеивающих частиц уменьшить в два раза по сравнению с первоначальным значением?
6. Почему формулы, используемые для описания рэлеевского рассеяния, пригодны для объяснения опыта Тиндаля?
7. В каком направлении интенсивность рассеянного излучения будет максимальна, если излучение распространяется в мелкодисперсной среде?

Список литературы

1. Бутиков Е.И. Оптика: учеб. пособие для студентов физических специальностей вузов. – 3-е изд., доп. – Лань, 2012. – 608 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика: учеб. пособие для студентов физических специальностей вузов. – 7-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 852 с.

Лабораторная работа № 5

Исследование молекулярного рассеяния света в жидкости

Цель работы – изучить теорию молекулярного рассеяния излучения в жидкости, методом компьютерного моделирования выполнить исследование влияния свойств вещества на интенсивность и индикатрисы рассеяния, проанализировать изменение интенсивности излучения при прохождении его через рассеивающую жидкость.

Задание по работе:

1. Изучить теоретическую часть лабораторной работы.

2. Выполнить расчеты коэффициентов молекулярного рассеяния, интенсивности рассеянного света, построить графики индикатрис рассеяния.
3. Исследовать влияние длины волны рассеиваемого света и флуктуаций анизотропии на характер рассеяния света жидкостями.
4. Подготовить отчет, сделать выводы по работе.

1. Теоретическая часть

1.1. Молекулярное рассеяние света жидкостью

Интенсивность молекулярного рассеяния излучения при прохождении через жидкость описывается формулой А. Эйнштейна

$$I = I_0 \frac{\pi^2 V}{2\lambda^4 L^2} \left(\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T^2 \beta_T kT (1 + \cos^2 \theta), \quad (5.1)$$

где I – интенсивность рассеянного света; I_0 – интенсивность излучения, проходящего через жидкость; V – объем рассеивающей жидкости, L – расстояние от объема до точки наблюдения; λ – длина волны излучения; ρ – плотность вещества; $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho}$ – изменение диэлектрической проницаемости жидкости, вызванное флуктуациями плотности вещества при заданной температуре T ; β_T – изотермическая сжимаемость жидкости; k – постоянная Больцмана, θ – угол рассеяния.

В этой формуле присутствуют как характеристики вещества, так и параметры, определяющие условия эксперимента: объем, занимающий жидкостью, расстояние до точки наблюдения, интенсивность зондирующего излучения.

Если ввести величину R , зависящую от условий эксперимента и равную

$$R = \frac{IL^2}{I_0 V}, \text{ см}^{-1}, \quad (5.2)$$

тогда получим коэффициент рассеяния

$$R = \frac{\pi^2}{2\lambda^4} \left(\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T^2 \beta_T kT (1 + \cos^2 \theta). \quad (5.3)$$

Если наблюдение рассеяния ведется перпендикулярно направлению распространения первичного пучка, то есть под углом $\theta=90^\circ$, тогда формула (5.3) примет вид

$$R_{90} = \frac{\pi^2}{2\lambda^4} \left(\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T^2 \beta_T kT. \quad (5.4)$$

Аналогично можно написать коэффициент рассеяния и для других углов наблюдения.

Тогда формулу (5.1) можно переписать в виде:

$$I = I_0 \frac{V}{L^2} R_{90} (1 + \cos^2 \theta). \quad (5.5)$$

Вместо коэффициента рассеяния используют коэффициент экстинкции h . Величина характеризует ослабление параллельного пучка падающего излучения, распространяющегося в однородной рассеивающей жидкости, но не поглощающей излучение.

Полное ослабление пучка при рассеянии можно рассчитать, но для этого нужно знать зависимость коэффициента рассеяния R от углов θ , ϕ , и выполнить интегрирование. Для расчета коэффициента экстинкции справедлива формула

$$h = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi R_{90} (1 + \cos^2 \theta) \sin \theta d\theta, \quad (5.6)$$

тогда находим, что

$$h = \frac{16}{3} \pi R_{90}. \quad (5.7)$$

Изменение интенсивности излучения при распространении в жидкости может быть вызвано не только молекулярным рассеянием, но и поглощением части излучения веществом. Если уменьшение интенсивности излучения, вызванное поглощением, определить с помощью коэффициента поглощения a , то полное ослабление интенсивности излучения на пути длиной x можно описать формулой

$$I = I_0 \exp(-mx), \quad (5.8)$$

где величину m рассматривают в виде суммы соответствующих коэффициентов

$$m = h + a. \quad (5.9)$$

Существуют два способа экспериментального определения коэффициента рассеяния R :

- 1) способом прямого измерения абсолютной интенсивности рассеянного излучения и последующего расчета коэффициента R ;
- 2) способом измерения коэффициента h при прохождении параллельного пучка света через рассеивающую жидкость известной толщины и расчета коэффициента рассеяния R .

Второй способ нахождения коэффициента R будет более эффективным, если численное значение коэффициента R велико, жидкость сильно рассеивает проходящее через нее излучение. Потери интенсивности, вызванные рассеянием, будут заметны даже на небольших расстояниях. Если среда слабо рассеивает излучение, то в эксперименте длина пути излучения x должна быть большой. Такие условия соответствуют экспериментальному изучению рассеяния света в атмосфере.

Определение коэффициента рассеяния R на основе экспериментальных измерений коэффициента экстинкции h при изучении молекулярного рассеяния света в чистых жидкостях, газах и кристаллах

часто сопровождается большими погрешностями и поэтому не всегда может быть полезным.

А вот экспериментальное измерение коэффициента экстинкции h может дать хорошие результаты, если среда является сильно рассеивающей, например, такие свойства имеют растворы полимеров и белков.

Для описания явления рассеяния используется понятие - *поперечное сечение для рассеяния* света Q . Поперечное сечение Q – это коэффициент пропорциональности между интенсивностью рассеянного излучения и интенсивностью излучения, падающего на рассеивающий объем:

$$Q = L^2 \frac{I}{I_0} = RV. \quad (5.10)$$

Сравнив выражения (5.1) и (5.10), получим для поперечного сечения

$$Q = I_0 \frac{\pi^2 V}{2\lambda^4} \left(\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T^2 \beta_T kT (1 + \cos^2 \theta). \quad (5.11)$$

Величину Q также используют, когда изучают рассеяние излучения на частицах.

1.2. Учет интенсивности излучения, рассеянного на флуктуациях анизотропии

Рассеяние излучения на флуктуациях плотности среды не сопровождается появлением локальных анизотропных свойств у среды, поэтому рассеянное излучение будет полностью поляризовано, если наблюдения выполняют под углом рассеяния $\theta=90^\circ$. На рис 5.1. показано, как ориентированы вектора \mathbf{E}_y и \mathbf{E}_z зондирующего излучения, индуцированные ими дипольные моменты \mathbf{P}_y и \mathbf{P}_z , и почему рассеянное излучение поляризовано $\mathbf{E}_{зр}$.

Можно учесть интенсивность излучения, рассеянного на флуктуациях, обусловленных анизотропией пространственной ориентации молекул вещества (флуктуации анизотропии) на пути излучения, рис. 5.2. В этом случае индуцированные дипольные моменты \mathbf{P}_i не совпадают по направлению с векторами \mathbf{E}_y и \mathbf{E}_z из-за анизотропии в свойствах среды, поэтому в рассеянном излучении появится составляющая с вектором $\mathbf{E}_{зр}$.

Обозначим интенсивность излучения, рассеянного на флуктуациях плотности и анизотропии, соответственно через I и i . Тогда интенсивность рассеянного излучения в среде равна

$$J = I + i. \quad (5.12)$$

Пусть естественно-поляризованное излучение распространяется вдоль оси X , а наблюдение рассеянного излучения выполняют вдоль оси Y , тогда ось Z перпендикулярна плоскости рассеяния. Очевидно, что регистрируемая интенсивность рассеянного излучения для флуктуации

плотности будет определяться компонентой $I=I_z$, а для рассеяния, вызванного флуктуациями анизотропии, интенсивностью $i=i_z+i_x$.

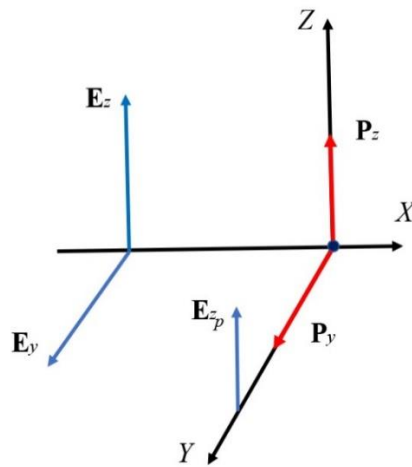


Рисунок 5.1 – К поляризации излучения, рассеянного на изотропной флуктуации

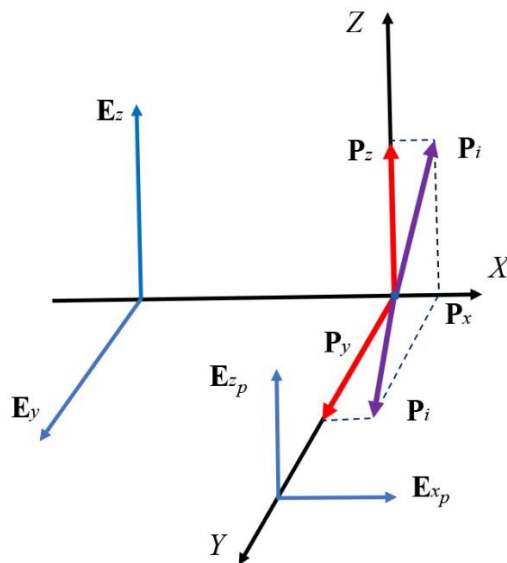


Рисунок 5.2 – К деполаризации излучения, рассеянного на флуктуации анизотропии

Таким образом, суммарная интенсивность рассеянного излучения будет равна

$$J = I_z + i_x + i_z. \quad (5.13)$$

Величина деполаризация Δ_u суммарного рассеянного излучения равна

$$\Delta_u = \frac{i_x}{I_z+i_x}. \quad (5.14)$$

Выразим интенсивность рассеянного излучения J через измеряемые на опыте величины Δ_u и ρ_u , где коэффициент деполаризации при рассеянии, обусловленный флуктуациями анизотропии, равен

$$\rho_u = \frac{i_x}{i_z}. \quad (5.15)$$

Воспользовавшись соотношениями (5.14), (5.15), формулу (5.13) перепишем в виде

$$J = I \left[1 + \frac{\Delta_u(1+\rho_u)}{\rho_u - \Delta_u} \right]. \quad (5.16)$$

Из экспериментов по изучению рассеянного излучения известно, что для рассеяния, вызванного флуктуациями анизотропии, коэффициент деполаризации характеризуется значением $\rho_u=0,85$, когда угол рассеяния равен $\theta=90^\circ$.

Тогда формулу (5.16) можно преобразовать к виду

$$J_{90} = I_{90} \frac{6+6\Delta_u}{6-7\Delta_u} \quad (5.17)$$

Учет рассеяния на флуктуациях анизотропии впервые был сделан французским ученым J. Cabannes (1885 – 1959), поэтому множитель

$$f(\Delta) = \frac{6+6\Delta_u}{6-7\Delta_u} \quad (5.18)$$

носит название фактора Кабанна.

Тогда в соответствии с формулами (5.13) и (5.17) интенсивность излучения, рассеянного на флуктуациях анизотропии, равна

$$i = I \frac{13\Delta_u}{6-7\Delta_u}. \quad (5.19)$$

Формула для расчета коэффициента рассеяния называется формулой Эйнштейна-Кабанна:

$$R_{90} = \frac{\pi^2}{2\lambda^4} \left(\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T^2 \beta_T kT \frac{6+6\Delta_u}{6-7\Delta_u} = R_{90} f(\Delta). \quad (5.20)$$

Формула (5.20) может теперь успешно использоваться для экспериментального исследования рассеяния излучения в жидкости.

2. Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы:

1. Экспериментальная часть задания, которая выполняется методом компьютерного моделирования, может быть реализована в любом математическом пакете прикладных программ, обеспечивающем проведение численных расчетов и построение научных графиков. Полученные в результате моделирования данные далее должны быть включены в отчет по лабораторной работе.

2. Необходимо уточнить у преподавателя вариант задания, который определяет условия для виртуального эксперимента, выполняемого методом компьютерного моделирования.
3. Ознакомиться теоретическими основами явления рассеяния излучения в жидкости, математической моделью и с экспериментальными условиями, для которых методом компьютерного моделирования рассчитываются характеристики рассеяния. Варианты заданий и условия рассеяния приведены в таблице 5.1.
4. Для двух образцов жидкости рассчитать коэффициенты рассеяния света R , когда наблюдение ведется под углом $\theta=90^\circ$, для этого воспользоваться формулой (5.4). В таблице 5.2 приведены постоянные жидкостей. В расчетах длина волны излучения λ должна быть выражена в см, коэффициент изотермической сжимаемости в Па^{-1} , постоянная Больцмана $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $T=293$ К.
5. Используя рассчитанные значения R_{90} , построить графики зависимости величины коэффициента рассеяния от угла рассеяния $R=f(\theta)$.
6. Выполнить расчет значений коэффициентов экстинкции h , используя формулу (5.7).
7. Исследовать характер изменения интенсивности зондирующего излучения, проходящего через рассеивающие среды, для этого необходимо воспользоваться формулой (5.8). В расчетах поглощением излучения жидкостью пренебречь, в качестве измерения единицы длины пути излучения в веществе использовать сантиметрах. Результаты компьютерного моделирования представить в виде графиков.

Таблица № 5.1 – Варианты заданий для моделирования молекулярного рассеяния света в жидкости

Вариант	Задание 1		Задание 2	
	жидкость 1	жидкость 2	жидкость 3	жидкость 4
1	вода	метиловый спирт	бензол	эфир
2	этиловый спирт	бензол	сероуглерод	толуол
3	толуол	сероуглерод	ацетон	вода
4	ацетон	вода	эфир	хлороформ
5	бензол	ацетон	толуол	вода

Таблица 5.2 – Параметры жидкостей для 20° С при $\lambda=4358 \text{ \AA}$

Жидкость	$\left(\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho}\right)_T$	$\beta_T \cdot 10^7 \text{ Па}^{-1}$
Вода	0,868	45,7
Метиловый спирт	0,902	127,1
Этиловый спирт	1,041	109,5
Бензол	1,620	93,2
Толуол	1,602	84,4
Сероуглерод	2,370	92,0
Ацетон	0,991	123,4

Таблица 5.3 – Параметры жидкостей для исследования молекулярного рассеяния в диапазоне температур 20° -30° С

Жидкость	$\lambda_1, \text{ \AA}$	R_{90}	$\lambda_2, \text{ \AA}$	R_{90}	$L, \text{ см}$	$V, \text{ см}^3$	$\Delta_u \cdot 10^2$
Бензол	4358	48,2	5461	16,4	20	5	9,3
Эфир		10,2		4,1	25	7	9,2
Толуол		60		20,5	30	10	48
Сероуглерод		151		47	10	5	62
Ацетон		14,8		4,2	25	10	11
Вода		3,08		1,05	30	15	8,8
Хлороформ		18,6		3,2	20	5	20

8. Выполнить исследования влияния длины волны λ рассеиваемого излучения на интенсивность рассеяния и вид индикатрисы рассеяния. В модельных расчетах использовать значения коэффициентов рассеяния излучения R_{90} вещества для разных длин волн, значения которых приведены в таблице 5.3. Расчеты выполнить с использованием формулы (5.5). Графики индикатрис рассеяния излучения построить в полярных координатах.
9. Учесть влияние флуктуаций анизотропии на величину коэффициента рассеяния, определяемое формулой (5.20), и повторить расчеты интенсивности рассеянного света для двух длин волн. Графики индикатрис рассеяния излучения построить в полярных координатах.
10. Подготовить отчет по лабораторной работе. Итоги выполнения экспериментально-расчетного задания методом компьютерного моделирования оформить в виде графиков, при необходимости в виде таблиц. Отчет по работе должен включать сопроводительный текст.

11. Сделать выводы по исследованию рассеянного излучения в жидкости на основе анализа полученных данных.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите причины появления молекулярного рассеяния в жидкостях.
2. Какие характеристики жидкостей и параметры эксперимента влияют на интенсивность рассеянного излучения?
3. Почему при наблюдении рассеяния излучения в жидкости, характеризующейся изотропными свойствами, рассеянное излучение линейно поляризовано?
4. Как поляризовано рассеянное излучение жидкостью, обладающей анизотропными свойствами?
5. Что характеризует коэффициент деполяризации рассеянного излучения?
6. Как в экспериментальных условиях можно измерить интенсивность рассеянного излучения на флуктуациях анизотропии?
7. Какую жидкость лучше выбрать для демонстрации на опыте явления рассеяния и почему?

Список литературы:

1. Бутиков Е.И. Оптика: учеб. пособие для студентов физических специальностей вузов. – 3-е изд., доп. – Лань, 2012. – 608 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика: учеб. пособие для студентов физических специальностей вузов. – 7-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 852 с.
3. Фаберлинский И.Л. Молекулярное рассеяние света. – М.: «Наука», 1965 г. – 512 с.

Лабораторная работа № 6

Изучение явления самофокусировки лазерного излучения в нелинейной среде

Цель работы – исследование влияния изменения напряженности электрического поля на показатель преломления веществ и определение параметров самофокусировки лазерного пучка в нелинейных оптических средах.

Задание по работе:

1. Ознакомиться с теоретической частью работы.
2. Все этапы задания по работе выполняются в графическом пакете, который обеспечивает представление результатов моделирования в виде таблиц и графиков.

3. Рассчитать диапазон изменений напряженности электрического поля, в котором будут наблюдаться нелинейно-оптические эффекты.
4. Для полученных значений напряженности электрического поля определить количественные параметры, характеризующие эффект самофокусировки – длину самофокусировки лазерного излучения в нелинейной среде, значение предельного угла, пороговой мощности, при которой наступает режим *самоканализации*.
5. Оформить отчет по лабораторной работе, в который включить результаты модельных расчетов и выводы по работе.

1. Теоретическая часть

В показатель преломления нелинейной оптической среды зависит от интенсивности излучения, поэтому распространение излучения в таких средах может сопровождается различными нелинейно-оптическими явлениями. Один из них – это эффект самофокусировки интенсивного излучения.

На рис. 6.1 приведена схема наблюдения явления самофокусировки интенсивного пучка. Параллельный пучок излучения большой интенсивности падает на слой вещества K . При помощи экрана $E-E$ можно наблюдать, как меняется размер пучка для разных положений экрана (1-4). Показатель преломления среды увеличивается с ростом освещенности, профиль распределения которой обозначен на рисунке в виде сечения $F-F$, и следовательно, лучи отклоняются к оси пучка. Если бы показатель преломления уменьшался с увеличением освещенности, то наблюдалось явление *саморасфокусировки*.

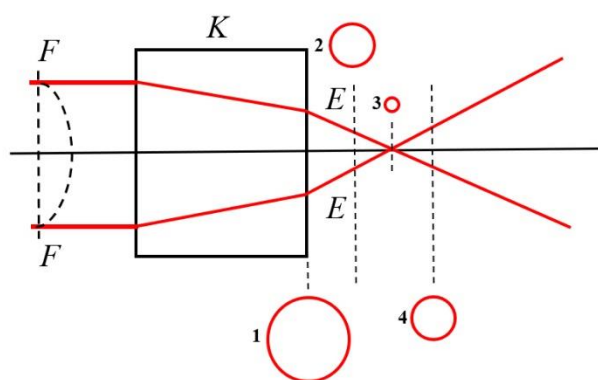


Рисунок 6.1 – Явление самофокусировки интенсивного пучка нелинейной оптической среде

Используя приемы компьютерного моделирования, в ходе выполнения задания по лабораторной работе необходимо выполнить

расчеты для исследования условий наблюдения явлений самофокусировки и самоканализации интенсивного излучения в конкретной нелинейной оптической среде. До выполнения работы рекомендуется самостоятельно изучить теорию, объясняющую причины изменения показателя преломления среды при взаимодействии с интенсивным излучением, например изложенной в [1].

2. Экспериментальная часть

Порядок выполнения работы:

1. Экспериментальная часть задания, которая выполняется методом компьютерного моделирования, может быть реализована в любом математическом пакете прикладных программ, обеспечивающем проведение численных расчетов и построение научных графиков. Полученные в результате моделирования данные далее должны быть включены в отчет по лабораторной работе.
2. Необходимо уточнить у преподавателя вариант задания, который определяет условия для виртуального эксперимента, выполняемого при помощи метода компьютерного моделирования.
3. Ознакомиться теоретическими основами явления самофокусировки, используемыми аналитическими выражениями, по которым методом компьютерного моделирования рассчитываются параметры самофокусировки. Варианты заданий для моделирования приведены в таблице 6.1.
4. Необходимо выполнить следующие модельные расчеты:

4.1 Сделав предположение, что интенсивность лазерного пучка I_0 меняется в диапазоне от 10^{21} до 10^{24} Вт·м², вычислить значение напряженности электрического поля E_0 для меняющихся значений интенсивности. Расчет выполняется по формуле (6.1), используемая система единиц измерения СИ,

$$I = \frac{c\varepsilon_0}{2} E_0^2, \quad (6.1)$$

где c – скорость света; электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф·м⁻¹.

4.2 Осуществить перевод полученных значений напряженности электрического поля волны E_0 из системы единиц СИ в систему единиц СГС, воспользовавшись соотношением, устанавливающим связь между единицами напряженности электрического поля в двух системах

$$1 \text{ В}\cdot\text{м} = 0,333\cdot 10^{-4} \text{ ед. СГСЭ.}$$

4.3 Используя расчетные данные E_0 и значения линейной n_0 и нелинейной частей n_2 показателя преломления вещества, приведенных в таблице 6.1 для заданного варианта расчета, определить диапазон изменений показателя преломления среды. Расчет выполняется в соответствии с соотношением

$$n = n_0 + n_2 E_0^2, \quad (6.2)$$

где n - значение показателя преломления вещества в световом поле большой интенсивности.

Таблица 6.1 – Варианты заданий для выполнения лабораторной работы

Вариант	λ_0 , мкм	Название вещества	Формула	n_0	$n_2 \cdot 10^{-11}$ ед. СГСЭ	a , см
1	0.7	сероуглерод	SC ₂	1.6321	0.44	0,5
						0,2
						0,1
2	0.7	нитробензол	C ₆ H ₅ N0 ₂	1,5240	0.16	0,5
						0,2
						0,1
3	0.7	бензол	C ₆ H ₆	1.5040	0.23	0,5
						0,2
						0,1
4	0.63	четырёх хлористый углерод	CCl ₄	1,5977	0.21	0,5
						0,2
						0,1
5	0.63	гексан	C ₆ H ₁₄	1,3749	0.18	0,5
						0,2
						0,1
6	0.7	этиловый спирт	CH ₃ CH ₂ COH	1,3613	0.11	0,5
						0,2
						0,1

4.4 Исследовать, как меняется величина длины самофокусировки $l_{\text{сф}}$ в указанном диапазоне изменения напряженности электрического поля E_0 . Расчеты необходимо выполнить для трех значений размера светового диаметра лазерного пучка, значения которых приведены в таблице 6.1. В основе модельных расчетов используется следующее соотношение

$$l_{\text{сф}} = a \sqrt{\frac{n_0}{2n_2 E_0^2}}, \quad (6.3)$$

где a – световой диаметр пучка.

4.5 Пусть лазерный пучок распространяется в нелинейно-оптической среде, как показано на рис. 6.2. Излучение с длиной волны λ_0 , большой интенсивности, в виде цилиндрического пучка диаметром $2a$ распространяется внутри нелинейной, изотропной и прозрачной среды. Лучи, которые падают на границу среды изнутри, переходят из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду.

Тогда можно исследовать характер изменения значений предельного угла в $\varphi_{\text{пред}}$, используя следующую формулу:

$$\varphi_{\text{пред}} = \arcsin\left(\frac{n_0}{n}\right) = \arcsin\left(\frac{n_0}{n_0 + n_2 E_0^2}\right). \quad (6.4)$$

4.6 Изучить характер изменения угла β , то есть угла между осью пучка и лучом, падающим на границу изнутри нелинейно-оптической среды

$$\beta = 90^\circ - \varphi_{\text{пред}} = \arccos\left(\frac{n_0}{n_0 + n_2 E_0^2}\right). \quad (6.5)$$

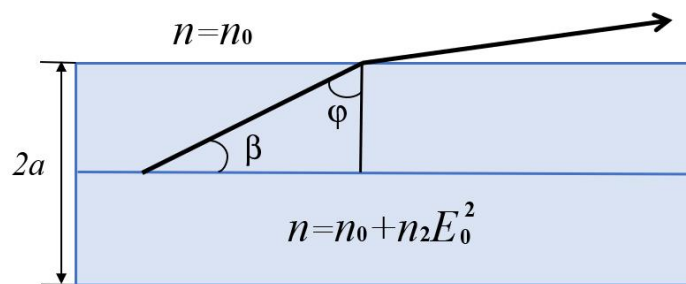


Рисунок 6.2 – Условия распространения лазерного пучка в нелинейной оптической среде

4.7 Определить, какие значения угла β примут предельные значения $\beta_{\text{пред}}$, воспользовавшись соотношением

$$\beta_{\text{пред}} = \arccos\left(\frac{n_0}{n_0 + n_2 E_0^2}\right). \quad (6.6)$$

Учсть, если угол $\beta > \beta_{\text{пред}}$, то лучи будут отклоняться от оси пучка, а для углов $\beta < \beta_{\text{пред}}$ отклонение лучей будет к оси пучка.

4.8 Выполнить расчет величины угла дифракции β_d на препятствии диаметром a . Расчет выполняется с использованием соотношения:

$$\beta_d = \frac{1.22\lambda_0}{n_0 a}, \quad (6.7)$$

где λ_0 - значение длины волны лазерного источника, приведенные в таблице 6.1.

4.9 Исследовать, при каких углах возникнет режим самоканализации, для этого при моделировании нужно воспользоваться соотношением

$$\beta_d = \beta_{\text{пред}} = \frac{n_2}{n_0} E_0^2. \quad (6.8)$$

4.10 Для рассматриваемых значений напряженности электрического поля E_0 излучения, выраженного в единицах измерения СИ, выполнить расчет мощности лазерного пучка излучения, используя формулу

$$W = \frac{cn_0}{4\pi} E_0^2 \pi a^2. \quad (6.9)$$

4.11 Исследовать, как меняется пороговое значение мощности лазерного пучка, при котором начинается эффект самоканализации

$$W_{\text{порог}} = A \frac{\lambda_0^2}{n_2}, \quad (6.10)$$

где A – постоянная величина, которую нужно выразить самостоятельно из рассмотренных ранее соотношений.

5. Численные значения величин, полученные по результатам модельных расчетов, представить в виде таблиц.
6. Графики зависимости $n=f(E_0)$, $l_{\text{сф}}=f(E_0)$, $\varphi_{\text{пред}}=f(E_0)$, $\beta_{\text{пред}}=f(E_0)$, $W=f(E_0)$ и $W_{\text{порог}}=f(E_0)$ оформить в графическом пакете.
7. Подготовить отчет по лабораторной работе. Итоги выполнения задания по численному моделированию должны включать краткую теорию, расчетные формулы, графики.
8. Сделать выводы по условиям наблюдения явления самофокусировки интенсивного излучения в нелинейной оптической среде на основе анализа полученных данных и включить их в отчет по работе.

Вопросы для самопроверки

1. В каких экспериментальных условиях можно наблюдать явление самофокусировки?
2. Что характеризуют предельные углы $\varphi_{\text{пред}}$ и $\beta_{\text{пред}}$?
3. При каких углах распространения β лучи внутри пучка отклоняются к его оси?
4. Почему наблюдается дифракция на препятствии диаметром $2a$?
5. Как должны соотноситься углы дифракции β_d и предельный угол $\beta_{\text{пред}}$, чтобы наблюдать явление самофокусировки?

6. Поясните физическую природу явления самоканализации.
7. Как отличаются условия наблюдения явления самофокусировки и самоканализации интенсивного излучения в нелинейной оптической среде?

Список литературы

1. Бутиков Е.И. Оптика: учеб. пособие для студентов физических специальностей вузов. – 3-е изд., доп. – Лань, 2012. – 608 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика: учеб. пособие для студентов физических специальностей вузов. – 7-е изд. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 852 с.

Жукова Екатерина Владимировна

Оптическая физика
Методические указания к лабораторному практикуму
Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49