

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**С.А. Алексеев, А.Л. Дмитриев, Ю.Т. Нагибин,
Е.М. Никущенко, А.С. Супрун, В.А. Трофимов,
А. Туркбоев, В.Т. Прокопенко, А.Д. Яськов**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2012

С.А. Алексеев, А.Л. Дмитриев, Ю.Т. Нагибин, Е.М. Никущенко, А.С. Супрун, В.А. Трофимов, А. Туркбоев, В.Т. Прокопенко, А.Д. Яськов.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Учебное пособие.
- СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 81 с.

Учебное пособие предназначено для студентов 3 и 4 курсов ИФФ, обучающихся по направлениям «Лазерная техника и лазерные технологии» (200500), «Техническая физика» (223200) и по другим направлениям подготовки бакалавров и магистров.

Рекомендовано к печати Решением ученого совета ИФФ: НИУ ИТМО (протокол № 11 от 08.11.2011 г.)



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012

© С.А. Алексеев, А.Л. Дмитриев,
Ю.Т. Нагибин, Е.М. Никущенко,
А.С. Супрун, В.А. Трофимов,
А. Туркбоев, В.Т. Прокопенко,
А.Д. Яськов.

Введение

С сентября месяца 2011 года на первых курсах бакалавриата и магистратуры в учебный процесс вводятся новые государственные образовательные стандарты, согласно которым разработаны новые Учебные планы подготовки бакалавров и магистров. Однако на 2-4 курсах бакалавриата и 6 курсе магистратуры обучение продолжается по действующим в настоящий момент Учебным планам.

На четвертом курсе бакалавриата по действующим Учебным планам для направления 223200 «Техническая физика» читается дисциплина «Экспериментальные методы исследования», включающая в себя как теоретическую (лекции), так и практическую (лабораторный практикум) части. В новых Учебных планах данная дисциплина получила несколько иное название «Методы оптико-физических и лазерных исследований», но лабораторный практикум в основном остается прежним.

Данное учебно-методическое пособие включает в себя вопросы исследования оптического поля, которое может рассматриваться как самоизлучающий источник, у которого исследуются параметры излучения, так и не самоизлучающий источник. В последнем случае исследуются параметры излучения, проваимодействовавшего с объектом исследования. Изменение параметров излучения до и после взаимодействия определяется оптическими и физическими свойствами исследуемого объекта. Задача в проведении исследования состоит в том, чтобы зафиксировать существующими оптическими методами изменение параметров излучения после взаимодействия с веществом, то есть, измененную интенсивность, поляризацию, оптическую частоту и т.д.

Целью проведения настоящего лабораторного практикума является привитие студентам практических навыков в исследовании оптического поля с целью получения необходимой информации об объекте исследования для его дальнейшего использования.

Данный лабораторный практикум является полезным для студентов и аспирантов, обучающихся по оптическим специальностям и направлениям.

Лабораторные работы выполняются бригадами по два – три человека. Каждая лабораторная работа рассчитана на четыре часа аудиторных занятий. Перед выполнением лабораторной работой студенту необходимо провести самостоятельную внеаудиторную подготовку, используя это учебное пособие и дополнительную литературу. Перед началом лабораторной работы преподаватель проводит собеседование и допускает студента к выполнению работы. После выполнения работы каждый студент индивидуально составляет отчет, который защищает на следующем занятии. Инструкции к компьютерным программам, используемым в лабораторных работах, можно получить у преподавателя или лаборанта. Они не вошли в данное пособие, так как могут меняться со временем.

В отчет должны входить следующие разделы:

1. цели и задачи лабораторной работы;
2. основные теоретические положения;
3. описание методики эксперимента и экспериментальной установки;
4. описание экспериментальных данных;
5. анализ и математическая обработка экспериментальных данных ;
6. выводы и заключение.

Отчет может быть оформлен как на компьютере (желательно), так и аккуратно рукописно.

Перед началом лабораторного практикума все студенты проходят обязательный инструктаж по правилам техники безопасности в учебной лаборатории.

Лабораторная работа №1

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Цель работы

- изучить метод ближнего поля для измерения профиля показателя преломления волоконных световодов (ВС);
- измерить функцию профиля показателя преломления для многомодовых ВС.

Основные теоретические сведения

Волоконные световоды (ВС) являются основой измерительных приборов и волоконно-оптических систем передачи информации. Эти системы активно разрабатываются и внедряются в технике средств связи и обработки информации, в промышленности, медицине, в научных исследованиях. Знание основных характеристик ВС необходимы современному физику и оптику-исследователю.

Волоконный световод представляет собой двухслойную коаксиальную цилиндрическую структуру в виде сердцевины и оболочки радиусами a и b , соответственно, с показателями преломления n_1 и n_2 , причем $n_1 > n_2$. Относительная разность показателей преломления сердцевины и оболочки ВС равна:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (1)$$

и обычно лежит в пределах $0,003 \div 0,010$. Известны одномодовые в ИК-диапазоне световоды с радиусом сердцевины $a = 3 \div 5$ мкм и многомодовые, для которых $a = 25 \div 100$ мкм. Диаметр оболочки обычно в пределах $125 \div 300$ мкм. Указанные типы ВС характеризуются резким изменением показателя преломления на границе сердцевины и оболочки. Разработаны также градиентные ВС с плавным изменением функции $n(r)$ профиля показателя преломления,

$$n(r) = n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^\rho]^{1/2}, \quad (2)$$

где ρ - параметр профиля ($\rho = 2, \dots, \infty$).

Одной из важных характеристик ВС является числовая апертура (NA), определяющая максимальный угол Θ_0 ввода излучения в ВС, при этом

$$NA = n_0 \cdot \sin \Theta_0 = n_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3)$$

где n_0 - показатель преломления прозрачной среды перед торцом ВС (например, в воздухе $n_0 \approx 1$). Числовая апертура характеризует эффективность ввода излучения в ВС, равную отношению

$$\eta = \frac{\text{мощность излучения, введенная в ВС}}{\text{мощность излучения, подводимая к ВС}} \quad (4)$$

При возбуждении ВС ламбертовским источником с радиусом $r \leq a$, расположенным в непосредственной близости у торца ВС,

$$\eta = (NA)^2 \quad (5)$$

Практически распространенным способом возбуждения ВС является фокусировка света на входной торец волокна. Эффективность такого ввода излучения в ВС в значительной степени определяется качеством обработки (например, скола) торца ВС, угловыми параметрами подводимого излучения и точностью его фокусировки на сердцевину ВС. Численно эффективность η ввода излучения определяется либо в безразмерных единицах (процентах), либо в децибелах (дБ), при этом потери α излучения при вводе в ВС (в децибелах) равны

$$\alpha = -10 \lg \eta \quad (6)$$

Высокоэффективное возбуждение ВС соответствует $\alpha \sim 1$ дБ, что сравнительно просто достигается в многомодовых и затруднительно для одномодовых ВС.

Радиальное распределение $n(r)$ показателя преломления волоконного световода является одной из важнейших его характеристик, непосредственно определяющих свойства дисперсии, а также оптических потерь световода. Правильным выбором функции $n(r)$ профиля показателя преломления (ППП) можно обеспечить ширину полосы пропускания в многомодовых световодах величиной, сравнимой с полосой пропускания одномодовых световодов. Измерение и контроль ППП необходимы для обеспечения технологического процесса производства волоконных световодов.

Существует несколько методов определения распределения $n(r)$ ВС, основанных на различных физических принципах.

Метод ближнего поля

Одним из сравнительно легко осуществимых на практике и вместе с тем достаточно точных при работе с многомодовыми световодами является метод ближнего поля. Он позволяет определить распределение показателя преломления в сердцевине оптического волокна по измерениям интенсивности света в ближней зоне, т. е. непосредственно у выходного торца волоконного световода. При этом используется то обстоятельство, что энергия излучения, переносимого направляемыми модами волоконного световода, пропорциональна разности показателей преломления $(n_1 - n_2)$ сердцевины и оболочки при условии, что распределение энергии излучения по всем модам на входе световода равномерное. На основе уравнений геометрической оптики, с учетом условия отсечки направляемых мод, выводится алгебраическое соотношение между распределе-

нием интенсивности света в ближней зоне (непосредственно у выходного торца световода) и функцией профиля показателя преломления $n(r)$.

Распространение β направляемой моды световода выполняется при условии

$$n_2 k < \beta < n_1 k, \quad (7)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ (волновое число), n_1 и n_2 соответственно максимальные и минимальные значения показателя преломления световода. Косинус угла Θ положения луча относительно оси световода для моды с фиксированной величиной β (рис. 1) равен

$$\cos \Theta = \frac{\beta}{k \cdot n(r)}, \quad (8)$$

а предельный угол $\Theta = \Theta_r$, соответствующий $\beta = n_2 \cdot k$, удовлетворяет равенству

$$\cos \Theta_r = \frac{n_2}{n(r)}. \quad (9)$$

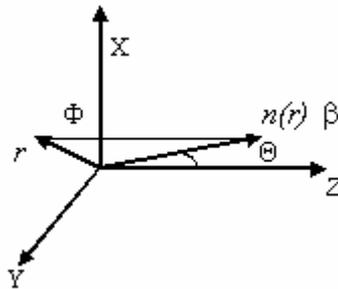


Рис. 1. Геометрические соотношения в ВС; ось световода направлена вдоль Z.

Угол Θ_r равен максимальному углу ввода, при котором световой луч, входящий в волокно в точке с радиусом r , распространяется в сердцевине световода практически без потерь.

Обозначим $S(\Theta)$ плотность интенсивности излучения, равную мощности света, приходящейся на единицу площади и единицу телесного угла в световоде. Поток излучения dP , входящий через элемент площади $d\sigma$ в элемент телесного угла $d\Omega$ равен

$$dP = S(\Theta) d\sigma d\Omega = S(\Theta) \frac{\cos \Theta}{n^2} dW, \quad (10)$$

где dW – элемент объёма в фазовом пространстве, обладающий свойством инвариантности (сохранения) вдоль любого пучка света и заданный расположением и направлением распространения этого пучка. Согласно теореме Лиувилля и на основе принципа сохранения энергии, для любых точек (1) и (2) вдоль направления луча выполняется

$$\left. \begin{aligned} dW_1 &= dW_2 \\ dP_1 &= dP_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

С учётом (10) отсюда следует, что

$$\left(S(\Theta) \frac{\cos\Theta}{n^2}\right)_1 = \left(S(\Theta) \frac{\cos\Theta}{n^2}\right)_2. \quad (12)$$

На основе (12) вычислим поток излучения, вводимый в световод под различными углами (рис. 2).

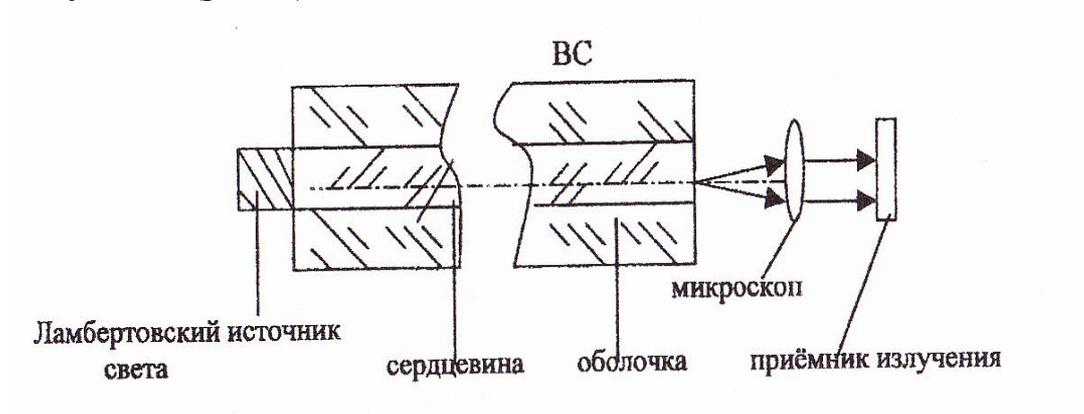


Рис. 2. Принцип измерения ППП по методу ближнего поля.

Для ламбертовского излучателя $S(\Theta) \approx S = \text{const}$ и $\cos\Theta \approx 1$, при этом можно показать, что

$$dP = S \frac{n^2(r)}{n_2^2} \sin\Theta d\Theta d\Phi. \quad (13)$$

Интегрируя это выражение, получим

$$P(r) = S \frac{n^2(r)}{n_2^2} \int_0^{2\pi} d\Phi \int_0^{\Theta_2} \sin\Theta d\Theta = 2\pi S \frac{n(r)}{n_2^2} [n(r) - n_2]. \quad (14)$$

В (13,14) n_2 – показатель преломления оболочки ВС. Если $(n(r) - n_2) \ll n_2$, то

$$P(r) = \frac{n_1(r) - n_2}{n_1 - n_2} P_{\max}, \quad (15)$$

где максимальные значения $n_1 = \max n(r)$ и $P_{\max} = \max P(r)$.

Взаимосвязь искомого распространения $n(r)$ с измеряемой в эксперименте величиной $P(r)$ имеет вид

$$n(r) = n_2 + (n_1 - n_2) \frac{P(r)}{P_{\max}}. \quad (16)$$

Можно показать, что точное выражение для $n(r)$, в котором соотношение $n(r)$ и n_2 произвольно, равно

$$n(r) = \left[(n_1^2 - n_2^2) \frac{P(r)}{P_{\max}} + n_2^2 \right]^{1/2}. \quad (17)$$

Формулы (16,17) лежат в основе экспериментальной процедуры измерения ППП по методу ближнего поля, общая схема которого показана на рис. 2. При использовании этих формул необходимо задание численных значений минимального n_2 и максимального n_1 показателей преломления материалов волоконного световода, которые обычно определяются на основе других независимых измерений.

Описание экспериментальной установки

Схема лабораторной установки изображена на рис. 3. Тепловой источник света (1) (лампа накаливания или светодиод) с широким угловым спектром равномерно освещает входной торец световода (3). Увеличенное микроскопом (5) изображение выходного торца световода проектируется на ПЗС-матрицу камеры (6). Изображение торца отображается на экране монитора и далее программным путем осуществляется выборка сигнала строки или столбца в центре изображения торца световода, соответствующего распределению $P(x,y)$ интенсивности света на выходном торце ВС. В установке используется видеокамера VEC631.

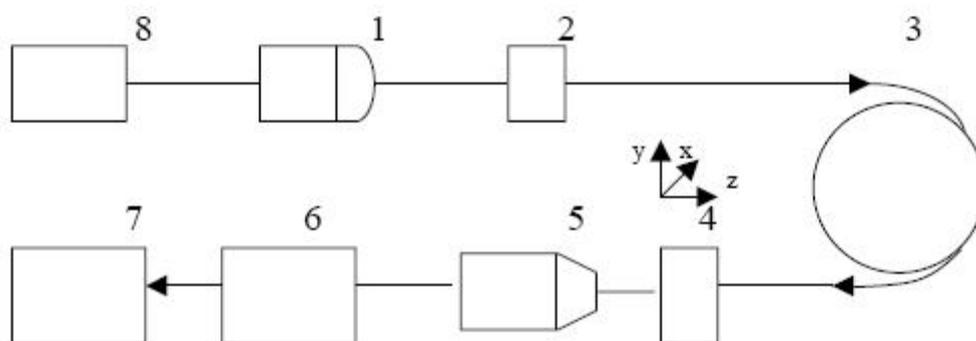


Рис. 3. Схема лабораторной установки.

1 – осветитель; 2,4 - держатели ВС; 3 – ВС; 5 – микроскоп;
6 - ПЗС-камера; 7 – компьютер; 8 - блок питания осветителя.

Проведение измерений

Перед начало измерений ознакомиться с описанием программы OSC WDM.

1. Включить приборы лабораторной установки (рис. 3). Запустить программу OSC WDM добиться чёткого изображения освещенного торца ВС на мониторе. При необходимости произвести юстировку микроскопа вращением юстировочных винтов.

2. В пункте меню «Настройка»/«Выбор параметров накопления» установить число кадров накопления в однократном режиме равным 50. Включить режим накопления и получить усредненную картину изображения торца волокна. Картину с экрана сохранить в виде графического файла.

3. В окнах «График по X» и «График по Y» получить графики распределения $P(x)$ и $P(y)$. Результаты сохранить в виде текстовых файлов для последующей обработки с помощью средств Excel.

4. Для ввода воспользоваться командой «Открыть файл», установить опцию «Показать все файлы» и выбрать сохраненный с помощью программы OSC WDM файл. Построение графиков для отчета производить стандартными средствами Excel.

5. При расчетах искомой зависимости $n(r)$ использовать точную формулу (17), полагая в ней $n_1=1,490$ и $n_2=1,480$. Выполнить оценку погрешностей измерений функции $n(r)$.

Задание

- измерить распределение $P(r)/P_{\max}$ и рассчитать по ним функции $n(r)$ (ППП) для предложенных типов ВС;

- по измерениям, проводимых в п.п. 2-5 оценить относительную погрешность полученных данных.

Контрольные вопросы

- Что такое числовая апертура ВС и какие свойства ВС она отображает?

- В чём сущность метода ближнего поля?

- Каковы основные источники ошибок измерения в данной работе?

- Что такое ламбертовский источник света?

Литература

1. Чео П.К. Волоконная оптика. – М.: Энергоатомиздат, 1998.

2. Гроднев И.И., Ларин Ю.Т., Теумин И.И. Оптические кабели. М.: Энергоатомиздат, 1991.

3. Дмитриев А.Л. Волоконно-оптические системы передачи информации (учебное пособие). –Л.: ЛИТМО, 1991.

4. Котюк А.Ф. и др. Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем. – М.: Радио и связь, 1987.

5. Маркузе Д., Пресби Х. ТИИЭР, 1980, том 68, с.32-57.

Лабораторная работа № 2

ДИСПЕРСИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Цель работы

Овладение методами и приемами измерения показателя преломления кристалла в видимой области спектра.

Основные теоретические сведения

Диэлектрическая проницаемость кристалла является одной из важнейших его характеристик, зависящих от кристаллической структуры и химического состава вещества. В общем случае диэлектрическая проницаемость является комплексной величиной:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2, \quad (1)$$

где ε_1 , ε_2 – вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости.

Диэлектрическая проницаемость связана с комплексным показателем преломления $N^* = n - ik$ известным соотношением

$$\varepsilon^* = N^{*2} = (n - ik)^2 = n^2 - k^2 - i 2nk, \quad (2)$$

где n – показатель преломления, k – показатель поглощения среды, описывающие соответственно набег фазы и затухание амплитуды световой волны при ее распространении в среде. Из выражений (1) и (2) следует:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= n^2 - k^2, \\ \varepsilon_2 &= 2nk. \end{aligned} \quad (3)$$

Отметим, что за пределами полос поглощения, где $k = 0$, мнимая часть диэлектрической проницаемости $\varepsilon_2 = 0$, а вещественная часть диэлектрической проницаемости ε_1 связана с вещественной частью комплексного показателя преломления n (который становится в области прозрачности показателем преломления среды в обычном понимании) соотношением, аналогичным выражению (2) $\varepsilon_1 = n^2$.

Исследования спектральных зависимостей n и k (или ε_1 и ε_2), т. е. зависимостей этих характеристик от частоты излучения, позволяют определить характеристические параметры вещества, такие как ширина запрещенной зоны в особых точках \vec{k} – пространства, отвечающих особенностям функции междузонной плотности состояний (особенностям Ван-Хова). Другими определяемыми здесь характеристиками являются длинноволновая диэлектрическая проницаемость (в длинноволновой области прозрачности от полосы поглощения),

описывающая суммарный вклад полосы в статическую поляризуемость кристалла, силы осцилляторов для соответствующих переходов.

В общем случае задача нахождения перечисленных характеристик по оптическим спектрам является довольно сложной. Это связано с тем, что в кристаллах вместо дискретных уровней энергии формируются энергетические зоны. Каждой паре энергетических уровней в пределах зон может быть сопоставлен эквивалентный осциллятор, и задача нахождения упомянутых характеристик вещества решается в результате интегрирования квазинепрерывных по частоте распределений. Однако во многих случаях удовлетворительные результаты по определению ширины запрещенной зоны, длинноволновой диэлектрической проницаемости и сил осциллятора можно получить, используя в отношении кристалла модели классического гармонического осциллятора. Замена непрерывных по частоте распределений осцилляторов одним эквивалентным осциллятором означает, что кристалл представляется как совокупность невзаимодействующих частиц (аналогично частицам, образующим идеальный газ).

Хорошее феноменологическое объяснение зависимости оптических постоянных вещества от частоты излучения можно получить, исходя из простой классической теории Лоренца, которая рассматривает вынужденные колебания гармонических осцилляторов, представляющих собой связанные электроны кристалла под действием электрического поля электромагнитной волны. Уравнение движения связанных электронов имеет вид:

$$m\ddot{x} + m\gamma\dot{x} + m\omega_0^2 x = -\bar{e}E_x \exp(i\omega t), \quad (4)$$

где $m\gamma\dot{x}$ – тормозящая сила (пропорциональная скорости \dot{x});

$m\omega_0^2 x$ – квазиупругая возвращающая сила (пропорциональная смещению x);

$\bar{e}E_x \exp(i\omega t)$ – вынуждающая сила, действующая со стороны приложенного электрического поля.

Решение уравнения (4) будем искать в виде гармонического колебания:

$$x = x_0 \exp(i\omega t), \quad (5)$$

где x_0 – амплитуда колебания.

Подстановка (5) в (4) позволяет определить амплитуду колебаний (5) в виде:

$$x_0 = -\frac{\bar{e}E_x}{m[(\omega_0^2 - \omega^2) + i\gamma\omega]}. \quad (6)$$

Таким образом, выражение (5) является решением уравнения (4), если амплитуда x_0 определяется выражением (6).

Для нахождения диэлектрической проницаемости воспользуемся материальным уравнением системы уравнений Максвелла, описывающим поляризацию среды:

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (7)$$

где \vec{D} и \vec{E} – векторы индукции и напряженности электрического поля;

\vec{P} – вектор поляризации среды (суммарный дипольный момент единицы объема вещества), а ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума.

Для рассматриваемой нами одномерной задачи уравнение (7) может быть переписано:

$$\varepsilon = 1 + \frac{P_x}{\varepsilon_0 E_x}, \quad (8)$$

где $P_x = \bar{e} N x_0$, а N – концентрация связанных электронов данного типа (их число в единице объема вещества). Тогда, из (6) и (8) следует:

$$\varepsilon = (n - ik)^2 = 1 + \frac{N \bar{e}^2}{m \varepsilon_0 [(\omega_0^2 - \omega^2) + i \gamma \omega]}, \quad (9)$$

откуда, разделив вещественную и мнимую части выражения (3), можем получить:

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 = 1 + \left(\frac{N \bar{e}^2}{m \varepsilon_0} \right) \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk = \left(\frac{N \bar{e}^2}{m \varepsilon_0} \right) \frac{\gamma \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}. \quad (11)$$

Из этих выражений также следует, что для частот $\omega = \omega_0$ имеется максимум поглощения k (или $\varepsilon_2 = 2nk$), а показатель преломления n (или $\varepsilon_1 = n^2 - k^2$) быстро возрастает при уменьшении ω (аномальная дисперсия показателя преломления).

В области высоких и низких частот от $\omega = \omega_0$ поглощение k ($\varepsilon_2 = 2nk$) быстро затухает. Показатель преломления при этом проходит через минимум на коротковолновом крае полосы поглощения и через максимум – на длинноволновом крае полосы.

При $\omega \rightarrow 0$ показатель преломления стремится к постоянному значению:

$$n_\infty^2 = 1 - \frac{N \bar{e}^2}{m \varepsilon_0 \omega_0^2}. \quad (12)$$

Параметр γ , входящий в уравнение (4) и дисперсионные соотношения (10) и (11), представляет собой ширину полосы поглощения на уровне 1/2.

Величину

$$\omega_p^2 = \left(\frac{N\bar{e}^2}{m\epsilon_0} \right), \quad (13)$$

как плазменную частоту для валентных электронов. В области высоких частот входящую в дисперсионные выражения (10), (11) и (12), можно рассматривать по отношению к резонансной частоте $\omega \gg \omega_0$ валентные электроны ведут себя как свободные (несвязанные) частицы, поэтому в применении к таким электронам становится возможным использование понятий плазма и плазменные эффекты, в том числе плазменный резонанс, так же как в случае свободных электронов.

В выражении (13) величина N представляет собой концентрацию валентных электронов.

В длинноволновой области спектра, где $\omega_0 - \omega \gg \gamma\omega$, $n^2 \gg k^2 \cong 0$, т.е. в области прозрачности вещества, для диэлектрической проницаемости и показателя преломления из дисперсионного выражения (11) следует:

$$\epsilon_1 = n^2 = 1 + \left(\frac{N\bar{e}^2}{m\epsilon_0} \right) \left(\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (14)$$

Это выражение, а также выражение (12), получаемое из (14) при $\omega = 0$, были положены в основу диэлектрической модели, используемой для систематизации, объяснения и прогнозирования многих свойств кристаллов. С позиции квантовой механики, гармоническому осциллятору с резонансной частотой ω_0 , постоянной затухания γ и амплитудой $\omega_p^2 = \left(\frac{N\bar{e}^2}{m\epsilon_0} \right)$ поставлена в соответствие двухуровневая квантовомеханическая система с энергетическим зазором

$$E'_g = E_m - E_n = \eta\omega_0 \text{ и временем жизни уровня } \tau_n^m = \frac{1}{\gamma}.$$

Применение модели гармонического осциллятора к кристаллу и возникающие при такой замене трансформации оптических спектров ϵ_1 и ϵ_2 показаны на рис. 1.

В левой части рисунка схематически изображены зонная структура кристалла (рисунок 1, а) и спектры ϵ_1 и ϵ_2 , которые возникают в таком кристалле вследствие междузонных переходов. Эти переходы формируют полосу поглощения, охватывающую диапазон частот от E_g и $\eta\omega_{\max}$. В пределах полосы мнимая часть диэлектрической проницаемости ϵ_2 имеет сложный характер частотной зависимости с одним или несколькими характерными максимумами, отвечающими особенностям Ван-Хова. В пределах этой полосы зависимость $\epsilon_1(\eta\omega)$

также является довольно сложной (немонотонной). Однако в длинноволновой области (отмечена как область прозрачности) зависимость $\varepsilon_1(\eta\omega)$ монотонна. Такой монотонный характер для области прозрачности дает и модель классического гармонического осциллятора.

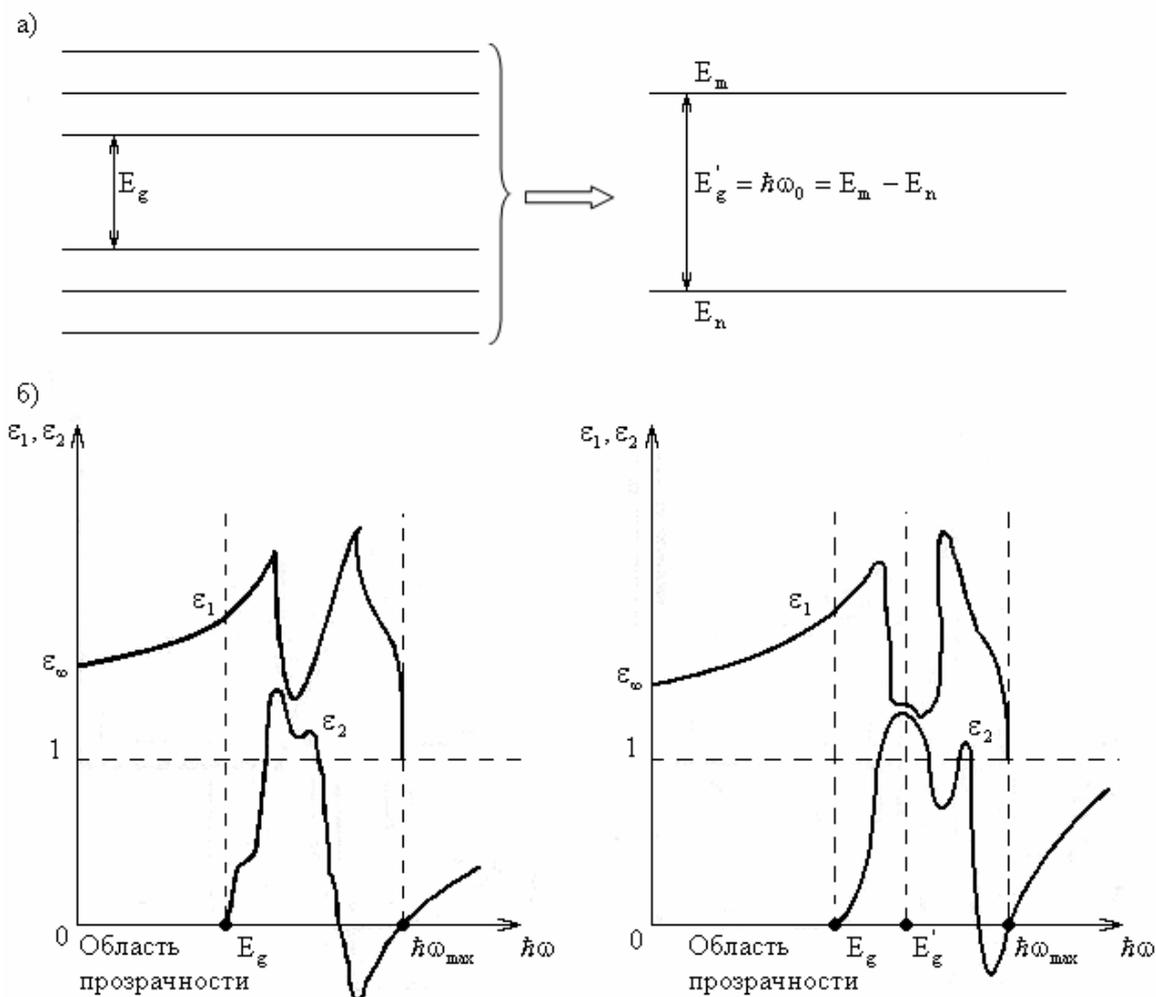


Рис. 1. Зонная структура кристалла и спектры ε_1 и ε_2 .

Поэтому для определения параметров эквивалентного гармонического осциллятора можно воспользоваться выражением (14), выбрав дисперсионные параметры ω_p^2 и ω_0^2 так, чтобы дисперсия $n(\eta\omega)$ (или $\varepsilon_1(\eta\omega)$) в области прозрачности для одного осциллятора и распределение осцилляторов совпадали. При интегрировании по полосам поглощения в случае непрерывных по частоте распределений осцилляторов это означает, что в рассматриваемой области правило сумм истощено, т.е. в диэлектрическую проницаемость здесь дают вклад все осцилляторы, отвечающие энергетическим уровням зонной диаграммы кристалла, и сумма сил осцилляторов по всем переходам равна единице $\sum_{cv} f_{cv} = 1$.

Описание экспериментальной установки

В ходе работы необходимо выполнить экспериментальное измерение зависимости показателя преломления от длины волны излучения для неизвестного образца кристалла.

Измерения выполняются методом призмы: по преломлению световых лучей в призме, изготовленной из исследуемого материала. Для измерений угла преломления лучей исследуемую призму устанавливают в положение наименьшего отклонения. Ход лучей в призме показан на рис. 2.

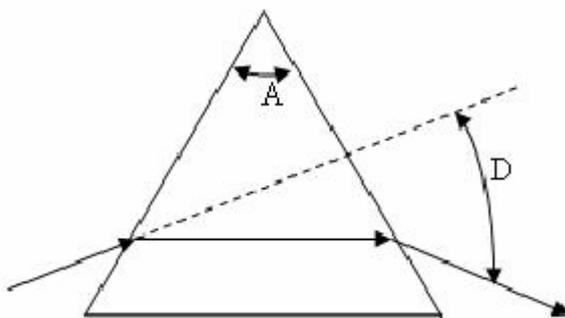


Рис. 2. Ход лучей в призме

В положении наименьшего отклонения показатель преломления вещества связан с преломляющим углом A и углом наименьшего отклонения D выражением (15), которое используется в работе для нахождения показателя преломления.

$$n = \frac{\sin \frac{(A + D)}{2}}{\sin \frac{A}{2}}, \quad (15)$$

Измерение показателя преломления производится на установке, функциональная схема которой изображена на рис. 3.

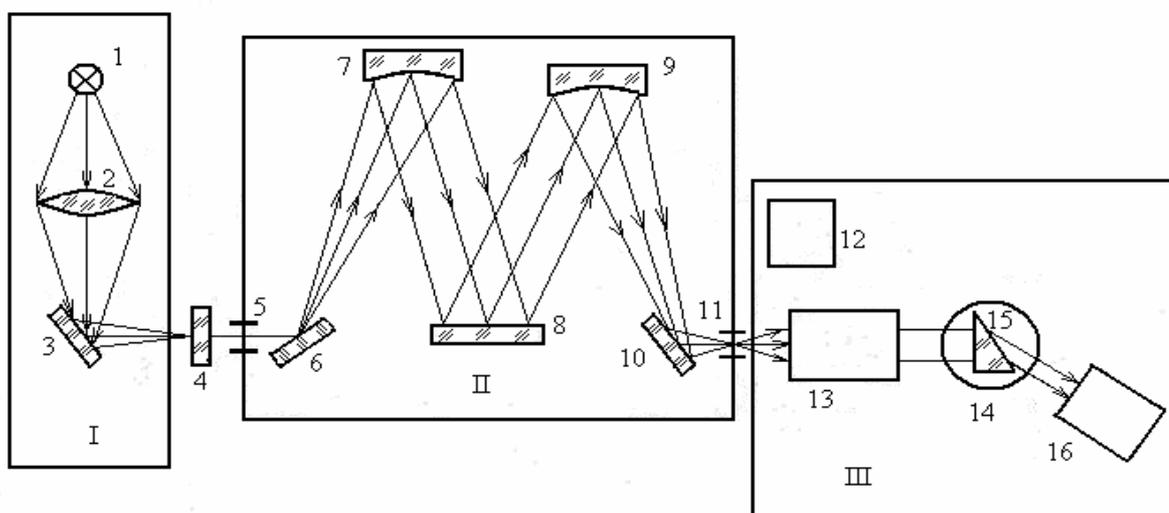


Рис. 3. Функциональная схема установки

В состав установки входят:

I – осветитель, содержащий источник света 1 – галогенная лампа накаливания, объектив 2 и поворотное плоское зеркало 3;

II – монохроматор МДР-23, содержащий входной фильтр 4, входную щель 5, поворотное зеркало 6, внеосевое параболическое зеркало 7, дифракционную решетку-реплику 8, внеосевое параболическое зеркало 9, поворотное зеркало 10, выходную щель 11;

III – гониометрический узел, на основе гониометра Г5, содержащий дисковый модулятор излучения 12, зрительную трубу 13, гониометрический столик 14 с образцом-призмой 15, зрительную трубу 16, установленную на поворотной алидаде гониометра.

Работа установки происходит следующим образом. Изображение нити накала лампы 1 при помощи объектива осветителя 2 и поворотного зеркала 3 формируется на входной щели 4 монохроматора МДР-23. При этом на входной щели 5 монохроматора установлен обрезающий фильтр 4, выбранный из комплекта принадлежностей монохроматора в соответствии с рабочим спектральным интервалом и служащий для подавления нерабочих порядков дифракции.

В качестве диспергирующего элемента в монохроматоре используется плоская дифракционная решетка-реплика 8 с постоянной $N = 1200$ штр/мм, работающая в параллельном пучке света. Преобразование входного расходящегося пучка излучения в параллельный пучок осуществляется параболическим зеркалом 7, на которое излучение от входной щели, расположенной в фокусе зеркала, подается плоским поворотным зеркалом 6. Параболическое зеркало 9 и плоское поворотное зеркало 10 фокусируют дифрагированное излучение на входной щели 11 монохроматора.

Выходящее монохроматическое излучение модулируется дисковым модулятором-прерывателем 12 и подается на входную щель коллиматора 13 гониометра. Параллельный монохроматический пучок света освещает входную грань призмы 15, установленной на поворотном столике 14 гониометра.

Преломленный в призме пучок света собирается зрительной трубой 16. Выходящее излучение (изображение входной щели коллиматора гониометра) наблюдается визуально в окуляре зрительной трубы. Отсчет углов производится по отсчетному устройству гониометра.

Устройство гониометра

На рисунке 4 показан внешний вид гониометра Г5. В состав гониометра входят автоколлиматор 1, микроскоп 2, корпус 3, столик 4 с лимбом и осевой системой. Посредством маховичка 5 по шкале 6 осуществляется фокусировка автоколлиматора. На шкале есть деления и индекс « ∞ ». Винт 7 нужен для юстировки визирной оси по вертикали. Кольца 8 удерживают окуляры. Лампа, закрытая колпачком 9, освещает лимб гониометра. Ось лимба устанавливается в вертикальное положение винтами 10 по уровню 11. С помощью маховичка 12 при завинченном винте 13 производится поворот лимба относительно столика.

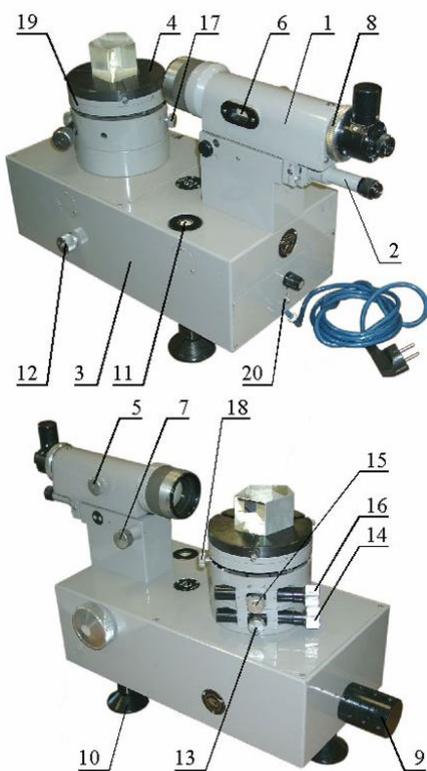


Рис. 4. Внешний вид гониметра

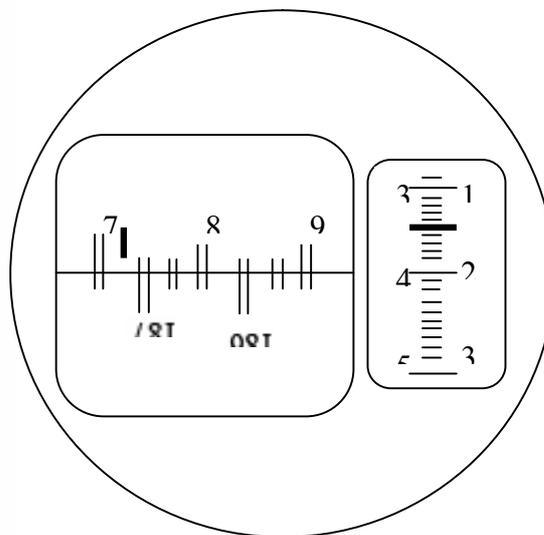


Рис. 5. Поле зрения

Лимб можно вращать как от руки, так и микрометрическим винтом 14 также при завинченном винте 13. При неподвижном лимбе столик вращается от руки при завинченном винте 13 и отпущенном винте 15, а также посредством микрометрического винта 16 при завинченных винтах 15 и 13. Чтобы правильно установить призму, столик наклоняют в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с помощью винтов 17 и 18. Посредством колец 19 варьируется высота столика. Прибор включают с помощью тумблера 20 на передней панели прибора.

На рисунке 5 показано поле зрения отсчётного микроскопа. Чтобы снять отсчёт по лимбу, маховичок оптического микрометра поворачивают до совмещения верхних и нижних изображений штрихов лимба в левом окне. Число градусов определяется как ближайшая левая от вертикального индекса цифра. Число десятков минут - как число интервалов, лежащих между верхним штрихом, соответствующим отсчитанному числу градусов, и нижним оцифрованным штрихом, отличающимся от верхнего на 180° . Число единиц минут необходимо смотреть на шкале в правом окне по левому ряду чисел. Число десятков секунд - по правому ряду чисел. Число единиц секунд равно числу делений между штрихом, определённым как отсчёт десятков секунд, и неподвижным горизонтальным индексом. На рисунке 5 показан угол $7^\circ 13' 15''$.

Проведение измерений

1) Установить в центре столика гониометра призму симметрично относительно поворотных винтов наклона столика.

2) Произвести юстировку призмы на столике автоколлимационным методом. Для этого установить рабочие грани призмы перпендикулярно оптическим осям коллиматора и зрительной трубы. Для юстировки производить наклон столика с призмой при помощи соответствующей подвижки алидады до появления в поле зрения автоколлимационного изображения окулярного креста. Наклоняя зрительную трубу и столик, совместить автоколлимационные изображения окулярного креста при отражении от обеих граней с самим крестом.

3) Снять отсчеты углов (по отсчетному устройству гониометра), отвечающие автоколлимационному изображению обеих граней и вычислить преломляющий угол призмы A (измерения преломляющего угла произвести два-три раза).

4) Из данных длин волн в диапазоне прозрачности материала установить одну из рабочих длин волн по отсчетному устройству монохроматора.

5) Визуально установить призму в положение наименьшего отклонения, наблюдая за смещением изображения щели гониометра в поле зрения зрительной трубы при повороте призмы и фиксируя при этом угол наименьшего отклонения.

6) В положении наименьшего отклонения измерить углы, соответствующие падающему и преломленному лучам (направление на щель прямого и преломленного лучей), и по разности этих углов найти угол отклонения A ;

8) Осуществить измерение показателя преломления для данной длины волны излучения два-три раза.

9) По формуле (15) вычислить показатель преломления.

10) Прodelать рассмотренную процедуру измерения углов и вычисления показателя преломления для всех данных длин волн в пределах рабочего спектрального интервала.

11) Результаты измерения углов A и D и найденные показатели преломления в зависимости от длин волны свести в Таблицы 1 и 2.

12) На основании полученных значений показателя преломления для данных длин волн определить материал призмы.

Содержание отчета

- Цель работы.
- Заполненные таблицы экспериментальных и расчетных данных.
- Чертеж хода лучей в исследуемой призме, вычисления углов A и D .
- Вычисления показателя преломления (для всех длин волн). Найденный материал призмы.
- Выводы.

Таблица 1. Измерение преломляющего угла.

№	Угол для I рабочей грани (град, мин, сек), 2-3 измерения	Угол для II рабочей грани (град, мин, сек), 2-3 измерения	A(град, мин, сек), A _{ср}

Таблица 2. Определение показателя преломления.

№	λ -(мкм)	φ_0 (град, мин, сек), 2-3 измерения	φ (град, мин, сек), 2-3 измерения	D = $\varphi - \varphi_0$ (град, мин, сек)	n, n _{ср}

Контрольные вопросы

- Как связаны комплексная диэлектрическая проницаемость и комплексный показатель преломления?
- Дайте определение особенностям Ван-Хова.
- Поясните зависимости оптических постоянных вещества от частоты излучения, пользуясь классической теорией Лоренца.
- Дайте определение плазменной частоте.
- Дайте определение резонансной частоте гармонического осциллятора.
- Дайте определение постоянной затухания.
- Как связаны векторы индукции и напряженности электрического поля, а также вектор поляризации среды?

Литература

- 1.-Харрисон У. А. Электронная структура и свойства твердых тел. – М.: Мир, 1983.
- 2.-Алексеев С.С., Прокопенко В.Т., Яськов А.Д. Экспериментальная оптика полупроводников. – СПб.: Политехника, 1994, 248.

Лабораторная работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ПЛЁНОК МЕТОДОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПЕРЕМЕННОГО УГЛА ПАДЕНИЯ

Цель работы

- овладение методикой измерения параметров тонких плёнок из анализа интерференционной картины переменного угла падения;
- закрепление навыков обработки результатов измерений методами регрессионного анализа.

Основные теоретические сведения

Широкое распространение при определении толщины и оптических постоянных тонких слоёв получили методы, основанные на освещении исследуемого слоя под различными углами падения. Основной из этих методов, называемый в научно-технической литературе VAMFO (Variable Angle Monochromatic Fringe Observation), включает определение углового положения интерференционных экстремумов в отражённом от слоя свете. Рассмотрим сущность метода VAMFO применительно к определению толщины и показателя преломления однородного слоя.

Исследуемый слой освещается пучком монохроматического света с длиной волны λ под углом падения Θ на рис. 1.

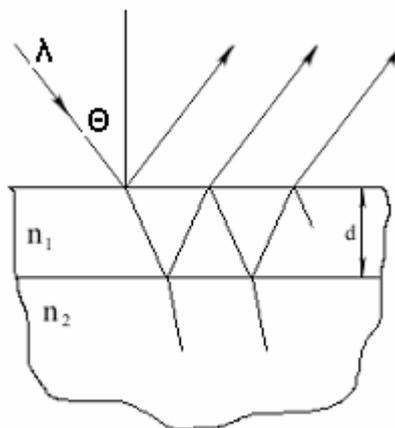


Рис. 1. Ход лучей в тонкой плёнке при наклонном падении светового пучка

Оптическая разность хода δ интерферирующих лучей вычисляется по общеизвестной формуле:

$$\delta = 2d(n^2 - \sin^2 \Theta)^{1/2} + \lambda/2, \quad (1)$$

где d - толщина слоя; n – показатель преломления слоя. При его измерении в отражённом от слоя свете будут возникать чередующиеся максимумы и минимумы интенсивности света (рис. 2).

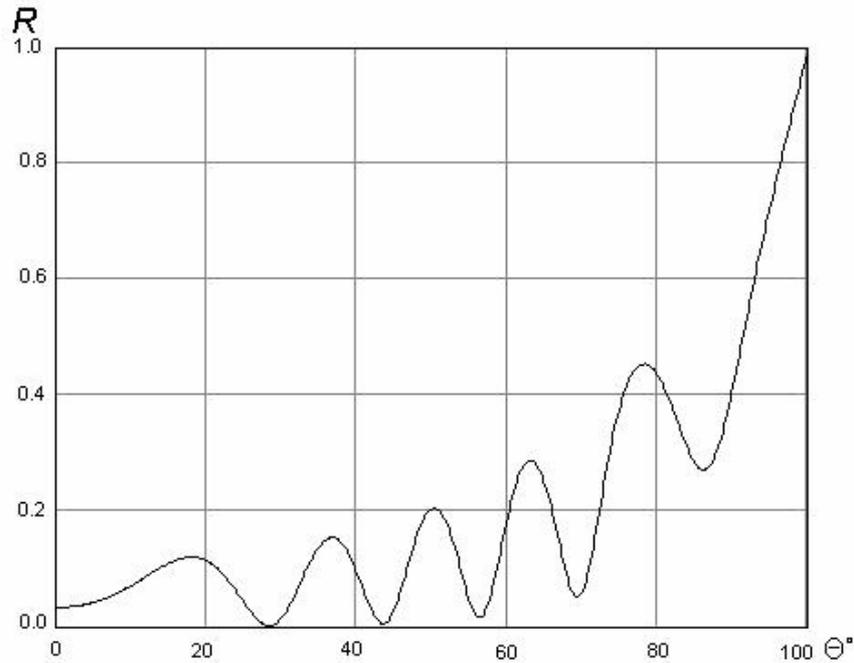


Рис. 2. График зависимости $R(\Theta)$ для отражающей системы с параметрами: подложка $n = 1.45$; плёнка $n = 2.0$; $d = 7\text{мкм}$; длина волны $\lambda = 0,633\text{мкм}$

Для двух интерференционных экстремумов различных порядков, соответствующих двум углам падения, можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} 2d(n^2 - \sin^2\Theta)^{1/2} &= m\lambda \\ 2d(n^2 - \sin^2\Theta')^{1/2} &= m'\lambda, \end{aligned} \quad (2)$$

где m и m' – порядки интерференционных экстремумов.

Система уравнений (2) элементарно решается относительно толщины слоя в следующем виде:

$$d = (m - m')\lambda / 2[(n^2 - \sin^2\Theta)^{1/2} - (n^2 - \sin^2\Theta')^{1/2}]. \quad (3)$$

Величина $(m - m')$, входящая в формулу (3), равна числу интерференционных экстремумов, образующихся в диапазоне углов падения от Θ до Θ' . Для определения показателя преломления формулу (3) необходимо подставить в одно из выражений (2), в результате чего можно получить следующее неявное относительно n уравнение:

$$d = (m - m')(n^2 - \sin^2\Theta)^{1/2} / [(n^2 - \sin^2\Theta)^{1/2} - (n^2 - \sin^2\Theta')^{1/2}]. \quad (4)$$

Порядок m можно определить, установив его связь с порядком, соответствующим $\Theta = 0$ и определяемым путём подсчёта числа интерференционных полос от края слоя при их визуальном наблюдении. Если этот порядок определить невозможно, то фиксируют угловые положения интерференционных экстремумов в некотором диапазоне углов от Θ до Θ' . Далее подбирают показателя

тель преломления таким образом, чтобы интерференционному максимуму соответствовало целое значение порядка, а интерференционному минимуму – полуцелое значение. Пример нескольких итераций подбора показателя преломления представлен в Таблице 1. Данная методика подбора показателя преломления обеспечивает относительную погрешность менее 0,2%. Приведённая процедура подбора показателя преломления легко программируется на компьютере. Задача в этом случае сводится к минимизации целевой функции вида:

$$Z(n) = \sum_{k=1}^M \{ [m_{2k} - \text{int}(m_{2k})]^2 + [m_{k-1} - \text{int}(m_{2k-1}) + 0.5]^2 \}, \quad (5)$$

при условии, что экстремум с порядковым номером $k = 1$ соответствует минимуму, или:

$$Z(n) = \sum_{k=1}^M \{ [m_{2k} - \text{int}(m_{2k}) + 0.5]^2 + [m_{k-1} - \text{int}(m_{2k-1})]^2 \}, \quad (6)$$

при условии, что экстремум с порядковым номером $k=1$ соответствует максимуму, где M - число анализируемых экстремумов.

Таблица 1. Пример подбора показателя преломления.

	Θ	n =1,460		n =1,477		n =1,476	
		$n^2 - \sin^2 \Theta$	d	$n^2 - \sin^2 \Theta$	d	$n^2 - \sin^2 \Theta$	d
min	14,80	0,9846	12,18	0,985	12,50	0,9849	12,49
max	28,50	0,9451	11,69	0,9463	12,01	0,9463	12,00
min	38,70	0,9037	11,18	0,9059	11,50	0,9059	11,49
max	47,20	0,8645	10,70	0,8678	11,01	0,8677	11,00
min	56,10	0,8227	10,18	0,8271	10,50	0,8269	10,49

Проведение измерений

В ходе работы необходимо выполнить измерения толщины и показателя преломления тонкой плёнки на подложке для предложенных образцов.

Экспериментальная часть работы состоит в регистрации интерференционной картины, полученной при отражении от исследуемого образца параллельного пучка света с изменяющимся углом падения.

Измерения проводятся с помощью рефрактометра отражательного типа. В схеме рефрактометра обеспечивается изменение угла падения излучения от внешнего источника на исследуемый объект в диапазоне $45^\circ \dots 69^\circ$. В приёмном канале установлен фотоприёмник, выполненный на основе германиевого фото диода. Источником излучения служит He-Ne лазер с длиной волны $\lambda=0.633\text{мкм}$. Исследуемые образцы - диэлектрическая плёнка ZrO на стеклянной подложке.

При проведении измерений рекомендуется пользоваться следующей методикой:

1. Установить образец на предметный столик рефрактометра.
2. Наклонами столика добиться правильности углового положения отражающей поверхности образца по максимальному отсчёту регистрируемого сигнала фотоприёмника рабочего канала. Следить, чтобы отражение от нижней поверхности образца не попадало на фотоприёмник.
3. П.п. 1 и 2 выполнить для граничных значений угла падения $45^\circ \dots 69^\circ$. К дальнейшему выполнению работы следует приступить лишь убедившись в сохранении юстировки при изменении в пределах при $45^\circ \dots 69^\circ$. Не следует выставлять значение угла меньше 45° и больше 69° во избежание поломки прибора.
4. Произвести измерение зависимости регистрируемого сигнала от угла падения. Диапазон изменения угла падения $45^\circ \dots 69^\circ$ с шагом 1° . Результаты измерений свести в Таблицу 2 и отобразить графически.
5. Выполнить п.п. 1 – 4 для других предложенных образцов.

Обработка и анализ результатов

Обработка полученных экспериментальных данных выполняется в два этапа. При обработке необходимо учесть поправку величины угла $+3,5^\circ$.

1. Определение угловой координаты анализируемого экстремума целесообразно проводить методом параболической регрессии. В этом случае анализируемая зависимость $I(\Theta)$ вблизи экстремума заменяется параболической функцией вида:

$$I(\Theta) = b_0 + b_1\Theta + b_2\Theta^2 \quad (7)$$

Поиск интервала аппроксимации производится предварительно по графику снятых угловых зависимостей $I(\Theta)$. На интервале аппроксимации должно укладываться не менее трёх отсчётов Θ_k (рекомендуемое число $N=5 - 10$), и изменение функции $I(\Theta)$ должно составлять 20 – 30% от размаха интерференционной картины (разность соседних минимума и максимума). Значения коэффициентов параболы можно найти из решения системы из трёх уравнений:

$$b_0N + b_1\sum_{k=1}^N \Theta_k + b_2\sum_{k=1}^N \Theta_k^2 = \sum_{k=1}^N I_k \quad (8)$$

$$b_0\sum_{k=1}^N \Theta_k + b_1\sum_{k=1}^N \Theta_k^2 + b_2\sum_{k=1}^N \Theta_k^3 = \sum_{k=1}^N \Theta_k I_k \quad (9)$$

$$b_0\sum_{k=1}^N \Theta_k^2 + b_1\sum_{k=1}^N \Theta_k^3 + b_2\sum_{k=1}^N \Theta_k^4 = \sum_{k=1}^N \Theta_k^2 I_k. \quad (10)$$

Используя полученные коэффициенты b_0, b_1, b_2 , можно найти координату вершины параболы Θ_M , соответствующую искомому экстремуму по формуле:

$$\Theta_M = -b_1/2b_2 \quad (11)$$

По приведённой процедуре должны быть определены все экстремумы снятых экспериментальных зависимостей.

2. Расчёт толщины и показателя преломления плёнки производится путём решения оптимизационной задачи по алгоритму, приведённому в разделе 1 (формулы (5) и (6)). В упрощённом варианте допускается ручная подгонка показателя преломления путём заполнения таблицы, аналогичной Таблице 1. Найденное значение показателя преломления подставляется затем в формулу (3) для расчёта толщины плёнки.

Для расчета координаты вершины параболы и толщины пленки возможно использовать готовые программы.

Таблица 2. Результаты измерений.

Θ°	Образец №			Образец №			Образец №		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
45									
46									
....									
69									

Таблица 3

	Образец №	Образец №	Образец №
n			
m			
Θ_{\max} [град]			
Θ_{\min} [град]			
d [мкм]			

Контрольные вопросы

- поясните механизм возникновения интерференции при отражении плоской волны от тонкопленочной планарной структуры. Дайте определение полос наклона и равной толщины;

- дайте характеристику известным вам интерференционным методом измерения толщины и показателя преломления пленки, сравните их с рассмотренным методом;

- проанализируйте источники случайной и систематической погрешности измерений в данной работе.

Литература

1. Б.М. Кормаков, Б. А. Шапошников. Измерение параметров оптических покрытий., Машиностроение, 1986.

2. Технология тонких плёнок. Справочник, Пер. с англ.; под ред. Л. Майселла, Р. Гленгла. Т.1, 2 М Сов. Радио. 1977.

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Цель работы

- освоить принцип работы двухлучевого интерферометра линейных перемещений Майкельсона;
- рассчитать параметры перемещения подвижных элементов.

Основные теоретические сведения

Методы лазерной интерферометрии широко применяются в научном эксперименте и промышленности. Высокая временная и пространственная когерентность лазерного излучения позволила создать прецизионные бесконтактные приборы для решения большого класса задач, связанных с измерением физических величин, которые могут быть выражены через длину. Особенно успешным оказалось использование интерферометров для исследования механического движения – изменение таких его параметров, как перемещение (линейное, угловое), скорость, ускорение.

Точность измерения длины, этой фундаментальной физической величины, зависит от уровня развития физической науки и оказывает значительное влияние на прогресс в промышленной технологии, такой, например, как производство интегральных схем с микронными и субмикронными размерами и алмазного точения прецизионных зеркал. Лазерное излучение является весьма близким приближением к идеальной монохроматической волне. Её пространственный период служит удобной мерой для контроля размеров материальных объектов.

Принципиальная схема лазерного интерферометра перемещений Майкельсона представлена на рисунке 1.

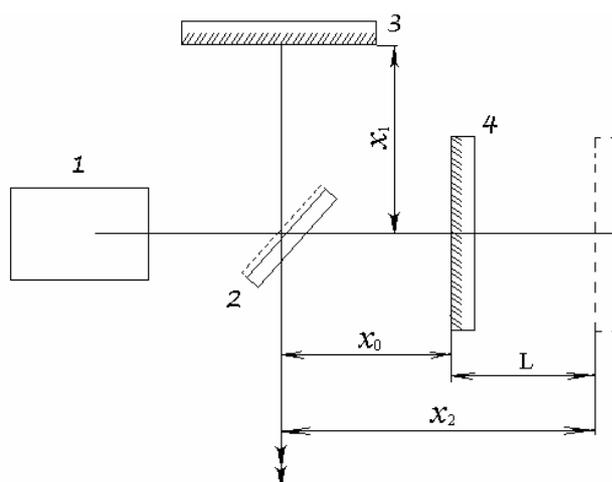


Рис.1. Оптическая схема интерферометра для измерения линейных перемещений

Он состоит из четырёх элементов: лазера 1, светоделителя 2 и двух отражателей 3 и 4. Отражатель 4 перемещается на искомый отрезок L . Пучки света

после прохождения интерферометра и отражения от зеркал 3 и 4 рекомбинируют в светоделителе 2. Явление интерференции наблюдают по направлению, указанному на рисунке двойными стрелками. Амплитуды интерферирующих пучков, возвращаемых отражателями 3 и 4, можно записать

$$E_{1,2} = a_{1,2} \exp\{-i(\omega_{1,2}t + 4\pi x_{1,2})/\lambda_{1,2}\}; \quad (1)$$

здесь $a_{1,2}$, $\omega_{1,2}$, $\lambda_{1,2}$ - амплитуды, угловые частоты и длины волн интерферирующих пучков; x_1 и x_2 показаны на рисунке 1. Для упрощения рассуждений и, не допуская большой ошибки, можно считать, что $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$. Тогда распределение интенсивности в результирующей интерференционной картине будет определяться следующим образом:

$$I = (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos[4\pi(x_2 - x_1)/\lambda - (\omega_2 - \omega_1)t]. \quad (2)$$

$$\text{Обозначим: } a_1^2 + a_2^2 = A_0; \quad 2a_1a_2 = A; \quad x_2 = x_0 \pm \int_0^t v(t)dt,$$

где $v(t)$ - скорость перемещения зеркала 4. Выходной сигнал фотоприёмника:

$$U(t) = A_0 + A \cos[4\pi(x_0 - x)/\lambda \pm (4\pi/\lambda) \int_0^t v(t)dt - (\omega_2 - \omega_1)t]. \quad (3)$$

Первый член A_0 - постоянная составляющая, или интерференционный фон; второй член переменный содержит полезную информацию о величине перемещения отражателя. Амплитуда переменного сигнала равна A . Переменное слагаемое под знаком косинуса зависит от величины не скомпенсированной разности хода $x_0 - x_1$. В процессе работы прибора она практически остаётся постоянной.

Второе слагаемое под знаком косинуса – фаза переменной части сигнала. Они связаны с величиной перемещения следующим образом:

$$\varphi = (4\pi/\lambda) \int_0^t v(t)dt = (4\pi/\lambda)L. \quad (4)$$

Отсюда искомая величина перемещения отражателя:

$$L = (\lambda/2)(\varphi/2\pi) = (N + \Delta N)(\lambda/2). \quad (5)$$

Целая часть этого соотношения равна порядку интерференции N , т.е. числу полос, прошедших перед окном фотоприёмника; дробная ΔN соответствует перемещению в пределах одной полосы. Если учесть измерение перемещений производится в воздухе с показателем преломления n_B , то формула для определения длины имеет вид:

$$L = (N + \Delta N)(\lambda_{\text{ВАК}} / 2n_B). \quad (6)$$

Здесь $\lambda_{\text{ВАК}}$ - длина волны источника света в вакууме. Это соотношение является основным для интерферометров, измеряющих перемещения. Последнее слагаемое под знаком косинуса – дополнительный частотный сдвиг, величина которого обычно известна. Он вводится для того, чтобы перенести спектр сигнала в высокочастотную область и последующей фильтрацией исключить влияние фона A_0 .

На рисунке 2 представлена интерферограмма, т.е. зависимость распределения интенсивности интерференционного сигнала от разности хода (величины перемещения).

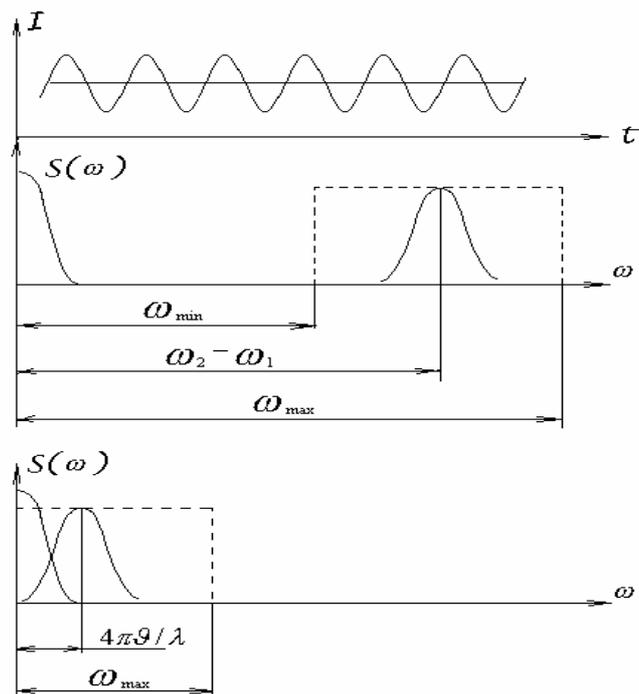


Рис. 2. Сигналы интерферометра

Интерферограмма всегда имеет положительное смещение A_0 , что приводит к появлению в спектре сигнала $S(\omega)$ составляющей на нулевой частоте. Экстремальные значения I расположены симметрично относительно уровня фона. Перед началом измерений, когда зеркала 3 и 4 неподвижны ($x_2 - x_1 = \text{const}$), через поле зрения интерферометра непрерывно перемещаются полосы с частотой $\omega_2 - \omega_1$. Это обусловлено переносом спектра сигнала в высокочастотную область. При движении отражателя 4 к разностной (опорной) частоте $\omega_2 - \omega_1$ добавляется частота полезного сигнала $\omega(t)$. Одному направлению движения отражателя соответствует область частот $(\omega_2 - \omega_1) - \omega(t)$, противоположному $(\omega_2 - \omega_1) + \omega(t)$. Спектр полезного сигнала в данном случае охватывает частотный интервал $\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}$ и на рисунке 2 отмечен штриховой линией.

Теперь полезный сигнал можно отделить при помощи обычной фильтрации.

При $\omega_2 = \omega_1$ переходим к классическим интерферометрам “постоянного тока”, у которых спектр сигнала не имеет предварительного смещения и перекрывается спектром интерференционного фона. Здесь полезный сигнал занимает в 2 раза более узкую полосу, чем в предыдущем случае. Положение верхней границы $\omega_{\max} = 4\pi v_{\max} / \lambda$ будет зависеть от скорости движения отражателя v_{\max} и полосы пропускания электронного тракта.

Описание экспериментальной установки

Установка для проведения лабораторных исследований представлена схемой, изображённой на рисунке 3. Универсальный набор оптико-механических узлов позволяет при необходимости собрать большинство наиболее распространённых схем двулучевых интерферометров.

Для определённости описание установки представлено для схемы, аналогом которой может служить интерферометр Майкельсона.

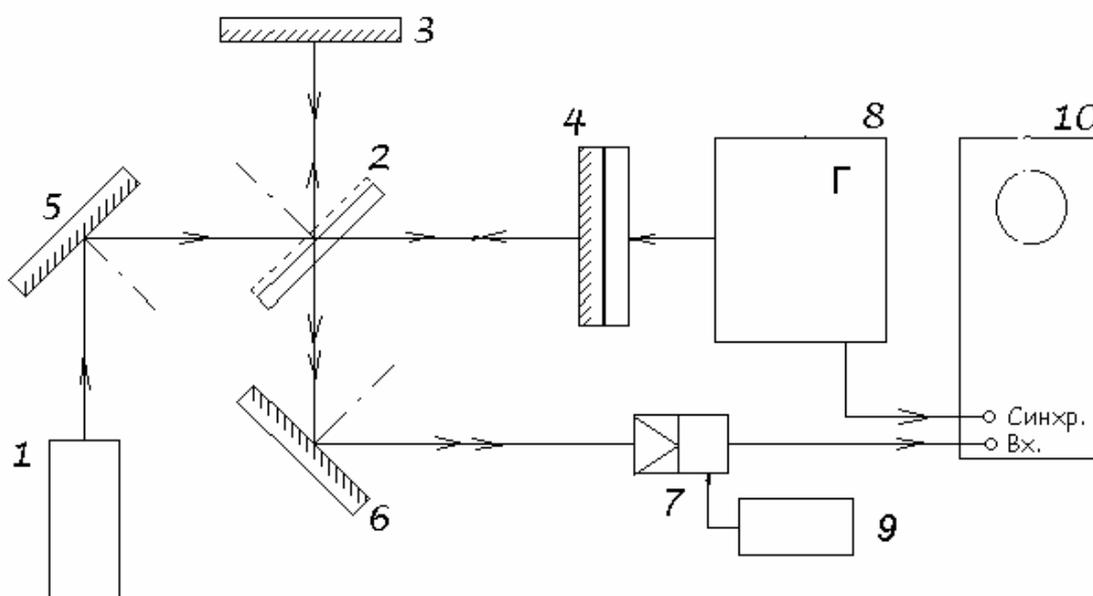


Рис. 3. Схема экспериментальной установки интерферометра перемещений

- 1 – He-Ne лазерный излучатель с длиной волны $\lambda=0.633$ мкм;
- 2 – светоделитель; 3 – зеркало интерферометра;
- 4 – зеркало интерферометра, установленное на пьезокерамике;
- 5,6 – поворотные зеркала; 7 – фотоприёмник;
- 8 – генератор низкочастотных сигналов;
- 9 – источник постоянного напряжения;
- 10 – осциллограф;

Лазерный излучатель, оптические элементы и фотоприёмник устанавливаются на металлической плите, при этом зеркала, светоделитель и фотоприёмник имеют подвижки, обеспечивающие необходимые условия юстировки опти-

ческой схемы. Зеркало 4 установлено на пьезокерамическом движителе мембранного типа КП-1.

Проведение измерений

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

1. Проводится юстировка оптической схемы интерферометра по максимуму сигнала на осциллографе.
2. Визуальное наблюдение ширины и количества интерференционных полос (сигналы биения) в зависимости от частоты, подаваемой на пьезокерамику (частота модуляции) и записать их в таблицу.
3. Визуальное наблюдение интерференционных полос при изменении величины амплитуды напряжения на пьезокерамике, составить аналогичную таблицу от амплитуды сигнала модуляции.
4. По измеренным величинам рассчитать величину и скорость перемещения подвижного зеркала в зависимости от частоты и амплитуды управляющего сигнала.

Подробная методика проведения лабораторных измерений приведена в описании на рабочем месте и зависит от аппаратуры.

Контрольные вопросы

- Что такое оптическая разность хода?
- Из каких частей состоит интерферометр перемещений Майкельсона?
- Что такое интерференционное поле?

Литература

1. Ландсберг Г.С. Оптика, М., 1976. (Общий курс физики).
2. Захарьевский А.Н. Интерферометры, М., 1952.
3. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении, Л., 1973.

Лабораторная работа № 5 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ He - Ne И ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРОВ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ - ПЕРО

Цель работы

- изучение принципа действия и устройства сканирующего интерферометра Фабри-Перо;
- применения интерферометра Фабри-Перо в анализе спектров излучения газового и полупроводникового лазеров.

Основные теоретические сведения

Сканирующий интерферометр Фабри-Перо.

Для исследования межмодового состава излучения He – Ne лазера в работе используется сканирующий интерферометр, представляющий собой высокочастотный интерферометр Фабри - Перо с периодически изменяемой базой. Его устройство схематически показано на рисунке 1.

На жестком массивном основании расположены две юстировочные головки 1 и 2, на которых укреплены зеркала 3 и 4. Зеркало 3 установлено непосредственно на головке 1, зеркало 4 связано с головкой 2 через пьезокерамический элемент 5. Юстировочные головки снабжены винтами (не показанными на рис. 1), которые позволяют в небольших пределах поворачивать зеркала относительно вертикальной и горизонтальной осей. С помощью головок 1,2 зеркала 3,4 выставляются строго параллельно.

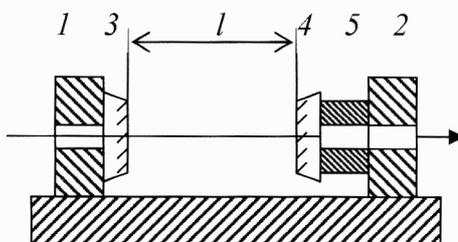


Рис. 1. Устройство сканирующего интерферометра

Пьезокерамический элемент 5 позволяет периодически изменять базу интерферометра ($l = 10$ см) на величину порядка длины световой волны. Он имеет форму полого цилиндра, внутренняя и наружная поверхности которого металлизированы и образуют цилиндрический конденсатор. Необходимое изменение длины цилиндра возникает при модулирующем напряжении на пьезокерамическом конденсаторе в несколько десятков вольт.

Если вдоль оси интерферометра распространяется излучение с длиной волны λ , то при выполнении условия

$$2l = m\lambda, \quad (m \text{ — целое число}), \quad (1)$$

возникает резонанс. Вводимое излучение с длиной волны, удовлетворяющей условию (1), полностью проходит через интерферометр. Если на интерферометр падает излучение с различными длинами волн, то одновременно может возникнуть несколько резонансов, Собственные моды интерферометра отличаются по частоте на величину

$$\Delta f = \frac{c}{2l}. \quad (2)$$

Величина Δf называется *дисперсионной областью* спектрального прибора. В единицах λ дисперсионная область сканирующего интерферометра равна

$$\Delta \lambda_{СИ} = \frac{\lambda}{m} = \frac{\lambda^2}{2l}. \quad (3)$$

В настоящей лабораторной работе сканирующий интерферометр Фабри - Перо используется как спектральный прибор высокой разрешающей силы. Разрешающая способность R спектрального прибора определяется отношением

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}, \quad (4)$$

где $\delta\lambda$ - минимальная разность длин волн, разрешимая спектрометром вблизи длины волны λ . При определении величины $\delta\lambda$ часто используют критерий разрешения Релея. Разрешающая способность интерферометра Фабри - Перо зависит от длины базы интерферометра l и коэффициента отражения зеркал r :

$$R = \frac{2\pi l}{\lambda(1-r)}. \quad (5)$$

В лазерной технике принято выражать $\delta\lambda$ разрешение интерферометра в единицах частоты:

$$\delta f = \nu \frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{c}{2l} \frac{1-r}{\pi}. \quad (6)$$

Как видно из (6), величина $(1-r)/\pi$ показывает, во сколько раз разрешение интерферометра меньше его межмодового интервала.

Описание экспериментальной установки

Параметры лабораторной установки.

Сканирующий интерферометр, применяемый в настоящей работе, имеет зеркала с коэффициентом отражения $r \approx 98,5\%$. Поэтому с его помощью можно разрешить две узкие спектральные линии, отличающиеся по частоте на величину порядка $0,005 \delta f$, т. е. (при $l = 10$ см) приблизительно на 7,5 МГц. Межмодо-

вое расстояние лазера при $L = 0.5$ м равно $\Delta\nu = 300$ МГц. Следовательно, используемый в работе сканирующий интерферометр подходит для исследования межмодового состава лазерного излучения.

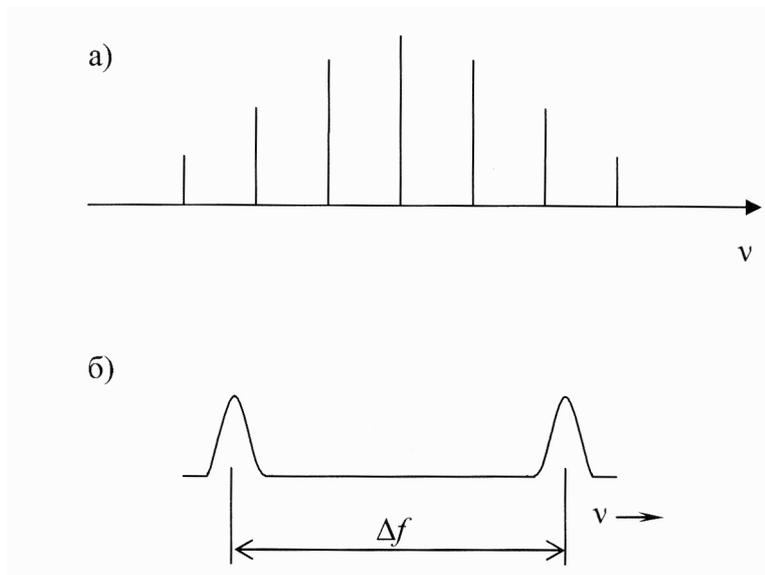


Рис. 2. Спектр генерации лазера (а) и спектр пропускания сканирующего интерферометра (б)

Рис. 2 схематически показывает соотношение между спектром генерации ОКГ (а) и спектральной характеристикой (б) сканирующего интерферометра (т. е. его спектром пропускания). Изменение расстояния между зеркалами сканирующего интерферометра приводит к сдвигу нижней «гребенки» по оси частот. При этом интерферометр последовательно настраивается на разные моды лазера.

Если одно из зеркал сканирующего интерферометра перемещать вдоль оптической оси, мощность прошедшего через интерферометр излучения изменяется (рис. 3). При этом выходной сигнал интерферометра, фиксируемый фотоприемником, например, ФЭУ, с высоким разрешением отображает тонкую структуру спектра лазерного источника.

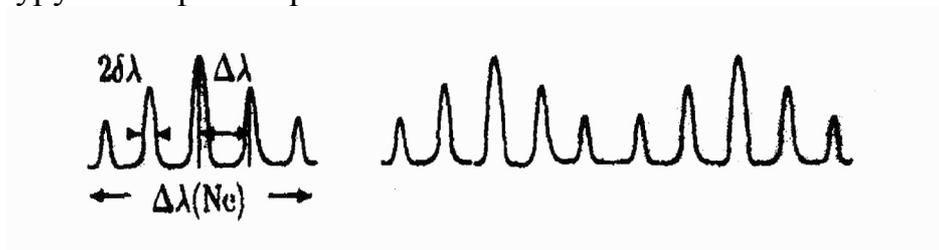


Рис. 3. Характерные осциллограммы: амплитуда колебаний зеркала сканирующего интерферометра $\approx \Delta\lambda(Ne)$ – слева; $\geq 2\Delta\lambda(Ne)$ – справа

Коллимированный луч лазера направляется в интерферометр Фабри - Перо. Выходной сигнал интерферометра фиксируется ФЭУ и регистрируется осциллографом. Чтобы получить сигнал подобный рис. 3 требуется тщательная настройка положения луча лазера.

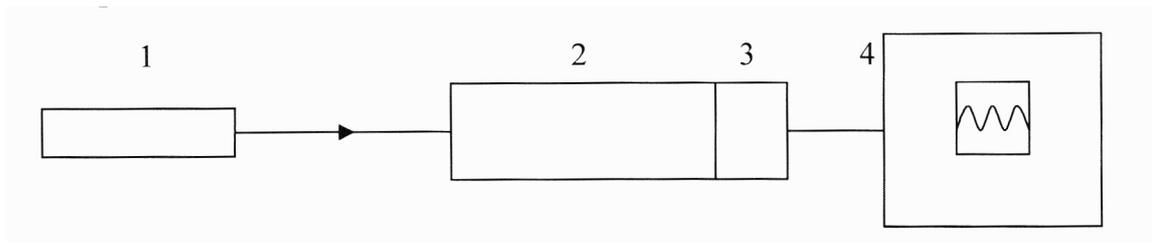


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1 – гелий-неоновый или полупроводниковый лазер;
 2 – интерферометр Фабри-Перо; 3 – ФЭУ;
 4 – осциллограф (аналоговый или цифровой).

Полупроводниковый лазер «ВИКСЕЛ»

«Викселы» - полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором (VCSEL – vertical-cavity surface-emitting lasers). В таких лазерах резонатор образован двумя объемными дифракционными решетками Брэгга и излучение генерируется в направлении, перпендикулярном плоскости подложки, являющейся основанием гетеро- и квантоворазмерных слоев полупроводников. Благодаря сверхкороткой, величиной несколько единиц-десятков мкм, длине L резонатора Фабри-Перо, викселы генерируют на одной продольной моде, при этом диаметр выходного пучка лазера достигает 20-30 мкм. Пороговый ток викселов крайне мал – до 2-5 мА, мощность излучения около 1 мВт. Приложением электрического поля в направлении оси резонатора в некоторых (консольных) вариантах VCSEL удастся осуществлять плавную перестройку длины волны генерации в полосе длин волн 1530 – 1560 нм.

Проведение измерений

1. Включить лазер, установить средний ток накачки.
2. Выполнить юстировку оптической схемы: посредством трехкоординатного стола обеспечить полную соосность (совпадение) оптических осей лазера и интерферометра. Сигнал при юстировке контролировать электронным осциллографом.
3. При использовании полупроводниковых лазеров типа «виксел», с помощью микрообъектива сфокусировать луч света, направляемый в интерферометр.
4. Включить модулятор интерферометра и осциллограф. Плавной настройкой оптической схемы добиться максимального выходного сигнала на экране осциллографа.
5. Установить частоту развертки, при которой на экране осциллографа отображается устойчивая картина исследуемого спектра.
6. Подключить цифровой осциллограф с компьютером и записать несколько выборок.
7. По ним рассчитать цену деления шкалы времени осциллографа, в МГц.
8. Рассчитать параметры спектра.

9. Распечатать на принтере картины спектров излучателей при нескольких значениях токов накачки лазеров.

Задание

1. Измерить спектры генерации гелий-неонового и полупроводникового («виксел») лазеров: измерить разность частот мод генерации и относительную мощность спектральных компонент (в долях относительно мощности наиболее интенсивной линии спектра).
2. Выполнить измерения п.1 при 2-3 значениях токов накачки лазеров.
3. Оценить величину погрешностей при отсчетах частоты и мощности спектральных составляющих спектра излучения источников.

В отчете привести данные расчетов спектральных параметров интерферометра, полученные данные измерений и дать их объяснение.

Контрольные вопросы

1. Принцип работы сканирующего интерферометра Фабри – Перо.
2. Принцип работы лазера «виксел».
3. Какие параметра влияют на разрешающую способность интерферометра?

Литература

1. Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. Приборы и их применение. М. Техносфера. 2006, 430с.
2. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения. СПб.: «Лань», 304с.
3. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М. «Высшая школа», 1981, 221с.
4. . Чео П.К. Волоконная оптика. – М.: Энергоатомиздат, 1998.

Лабораторная работа № 6

RGB – ПАРАМЕТРЫ ГАЛОГЕННОЙ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Цель работы

- овладение методикой определения RGB – параметров галогенной лампы накаливания;
- овладение методикой обработки результатов определения RGB – параметров галогенной лампы накаливания;
- калибровка приёмника излучения;
- проверка калибровки приёмника излучения;
- определение цветовой температуры источника излучения.

Основные теоретические сведения

Если на прозрачное тело падает световой поток, то часть его отражается от поверхности тела, часть – проходит через него, а часть – поглощается. Отношение отражённого/ прошедшего/ поглощённого светового потока к падающему световому потоку называется коэффициентом отражения/ пропускания/ поглощения. Важно знать, как тело отражает, пропускает и поглощает монохроматическое излучение различных длин волн. Отношение отражённого/ прошедшего/ поглощённого монохроматического светового потока данной длины волны к монохроматическому световому потоку называется спектральным коэффициентом отражения/ пропускания/ поглощения. Тела и среды, избирательно отражающие, пропускающие и поглощающие свет разных длин волн, имеют различную окраску при освещении их белым светом. Таким образом, цвет тел зависит от их способности отражать, пропускать, поглощать падающий на них световой поток, а также от распределения светового потока в спектре освещающего их источника света. Качественной характеристикой цвета является цветность, которая определяется совокупностью цветового тона и чистоты. Цветовой тон – это параметр цвета, измеряемый средней длиной волны, соответствующей определённому участку спектра. Чистота – это параметр цвета, учитывающий степень разбавления спектрального цвета белым. Количественной характеристикой цвета является яркость, т. е. параметр, вызывающий ощущение повышенной силы света и освещенности поверхности. Для несамосветящихся объектов вместо яркости указывают спектральный коэффициент диффузного отражения.

Интенсивность и спектральный состав излучения зависят от температуры тела. При температуре приблизительно 800 К многие тела начинают светиться красным светом. С повышением температуры спектр смещается в сторону коротких длин волн. Наибольшую энергию выделяют тела с наибольшей поглощательной способностью. Тело с коэффициентом поглощения (поглощательной способностью), равным единице, называется абсолютно чёрным. Температура чёрного тела T_c , при которой цветность его излучения совпадает с цветностью излучения другого тела с собственной температурой T , называется цветовой температурой. Международная комиссия по освещению (МКО) приняла пропорции. Эти три цвета называют основными. Они обуславливают систему оп-

ределения цветов RGB. Единичными считают световые потоки стандартные источники излучения белого света. Стандартный источник А воспроизводит условия искусственного освещения лампами накаливания с коррелированной цветовой температурой 2856 К. Источник В воспроизводит прямой солнечный свет с коррелированной цветовой температурой 4870 К. Источник С воспроизводит рассеянный дневной свет с коррелированной цветовой температурой 6770 К. Источник D₆₅ воспроизводит освещение усреднённого дневного света с коррелированной цветовой температурой 6550 К.

Глаз воспринимает излучение в диапазоне от 380 до 760 нм (видимая часть спектра). Ощущение цвета, вызываемого излучением, зависит не только от его спектрального состава, но и от индивидуальных особенностей наблюдателя: от некоторого различия спектральной чувствительности глаза (чувствительности к монохроматическому излучению). Для однозначной оценки цвета в колориметрии МКО утвердила значения относительной спектральной световой эффективности V_λ – нормированной функции спектральной чувствительности – для стандартного фотометрического наблюдателя.

Глаз различает цвета благодаря колбочкам сетчатки глаза, содержащим три типа приёмников света. Эти приёмники обладают различными реакциями на излучение сложного спектрального состава. Возбуждение только одного из них даёт ощущение либо насыщенного красного цвета, либо насыщенного зелёного, либо насыщенного синего. Комбинации различных по интенсивности раздражений фоторецепторов, переработанные в мозговых зрительных центрах, дают различные зрительные ощущения.

Все существующие цвета могут быть получены посредством смешения трёх взаимно независимых цветов – красного, зелёного и синего, взятых в определенной основной цветов, которые образуют при смешении белый цвет. Также и основные цвета являются единичными цветами. Какой-либо цвет Ц можно выразить математически цветовым уравнением:

$$\text{Ц} = r'R + g'G + b'B, \quad (1)$$

где r' , g' , b' – координаты цвета, R, G, B - единичные векторы (орты) соответствующих основных цветов. r' , g' и b' показывают, сколько единиц каждого из основных цветов необходимо взять для получения данного цвета Ц. Основные цвета в системе RGB постоянны, а заданный цвет Ц определяется координатами цвета r' , g' и b' , являющимися переменными величинами. Во многих случаях удобно пользоваться относительными значениями координат цвета – координатами цветности: r, g и b.

$$\begin{aligned} r &= \frac{r'}{r'+g'+b'}; \\ g &= \frac{g'}{r'+g'+b'}; \\ b &= \frac{b'}{r'+g'+b'}. \end{aligned} \quad (2)$$

При этом

$$r + g + b = 1. \quad (3)$$

Любой цвет может быть найден с помощью цветового треугольника (рис. 1).

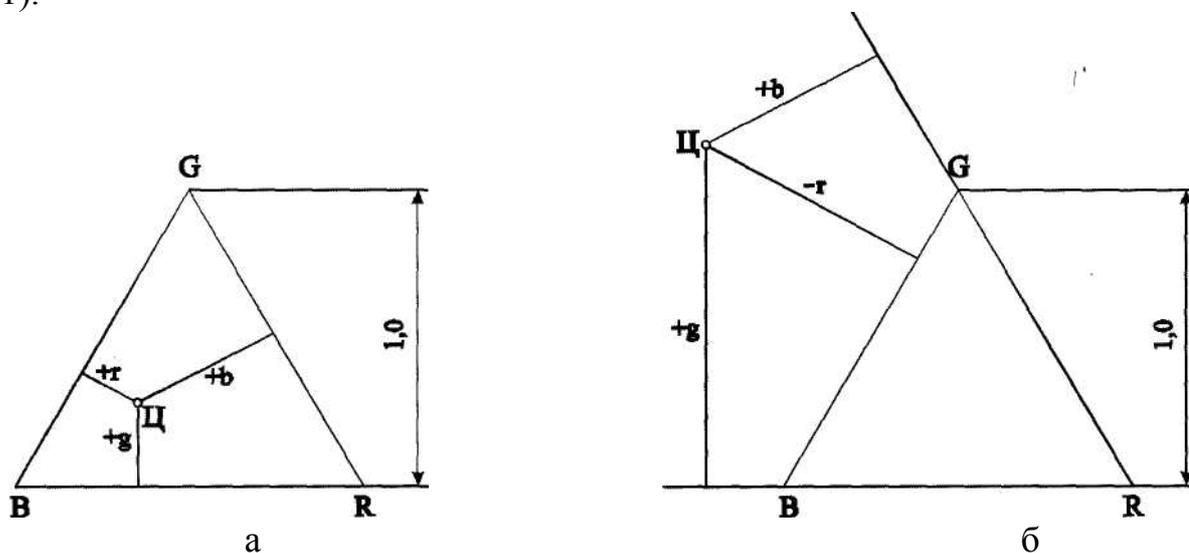


Рис.1. Изображение цвета посредством цветового треугольника

Алгебраическая сумма (с учетом знака) перпендикуляров, опущенных из любой точки внутри или вне равностороннего треугольника на его стороны, равна высоте этого треугольника. Если высоту равностороннего треугольника принять за единицу, то сумма перпендикуляров будет равна единице. Поскольку сумма координат цветности также равна единице, то каждый из перпендикуляров можно рассматривать как одну из координат цветности. Таким образом, любой цвет может быть изображен как точка внутри или вне равностороннего треугольника с единичной высотой. В вершинах цветового треугольника находятся основные цвета R, G и B. Цвета, которые можно получить посредством смешения трёх основных цветов R, G и B, в соответствии с цветовым уравнением размещаются внутри цветового треугольника (рисунок 1, а). Перпендикуляр, опущенный на сторону, которая лежит против вершины треугольника, где расположен основной цвет R, даёт координату цветности r. Также и остальные перпендикуляры соответственно дадут координаты цветности g и b. Цвета, которые можно получить посредством смешения цветов R, G и B, располагаются и вне цветового треугольника (рисунок 1, б). В этом случае перпендикуляры, опущенные из точки цвета на стороны треугольника, также равны координатам цветности и в сумме равны единице, но одна из координат цветности отрицательна. В центре тяжести цветового треугольника располагается белый цвет E, получающийся при смешении световых потоков основных цветов. На рисунке 2 показан цветовой треугольник с нанесённой линией спектральных цветностей.

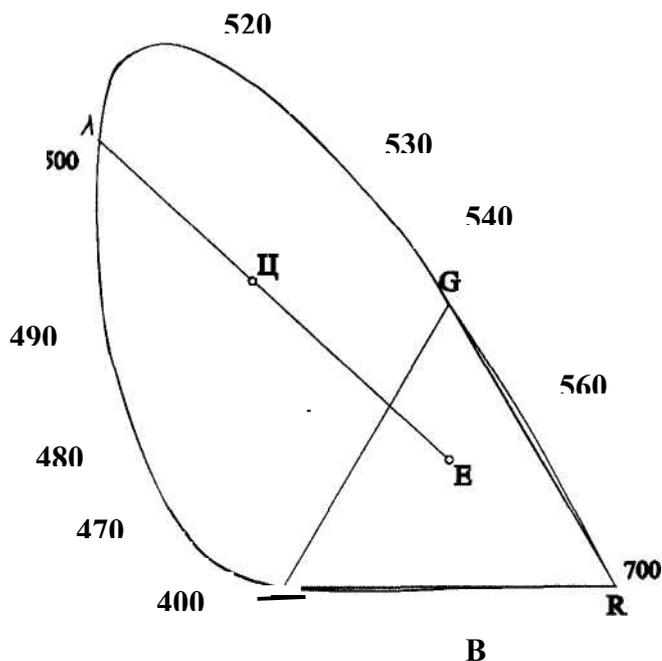


Рис. 2. Цветовой график в системе RGB

Цифры вдоль линии спектральных цветностей соответствуют длинам волн (в нанометрах) спектральных цветов. График, на котором расположены все существующие цвета, называется цветовым графиком. На линии, соединяющей белый цвет E с цветом Ц, расположены цвета, получающиеся при смешении в различных пропорциях спектрального цвета с длиной волны λ и белого цвета E. Наличие в системе RGB отрицательных координат цветности значительно усложняет колориметрические расчёты.

Поэтому МКО утвердила новую колориметрическую систему определения цвета XYZ. Как и система RGB, эта система построена на основе трёх основных цветов X, Y и Z, которые являются в этой системе единичными. Одинаковые количества основных цветов при сложении здесь также должны давать белый цвет E. Единичные цвета X, Y и Z выбраны так, что их сумма равна сумме единичных цветов R, G и B. Цвета X, Y и Z располагаются на цветовом графике системы RGB (рисунок 3).

Все существующие цвета находятся внутри цветового треугольника, в вершинах которого расположены основные цвета X, Y и Z. Основные цвета X, Y и Z можно выразить через основные цвета R, G и B. Так как область существующих цветов лежит внутри треугольника XYZ, то все координаты цветности для существующих цветов положительны. Какой-либо цвет Ц в системе XYZ можно выразить уравнением:

$$\text{Ц} = x'X + y'Y + z'Z, \quad (4)$$

где x' , y' и z' – координаты цвета.

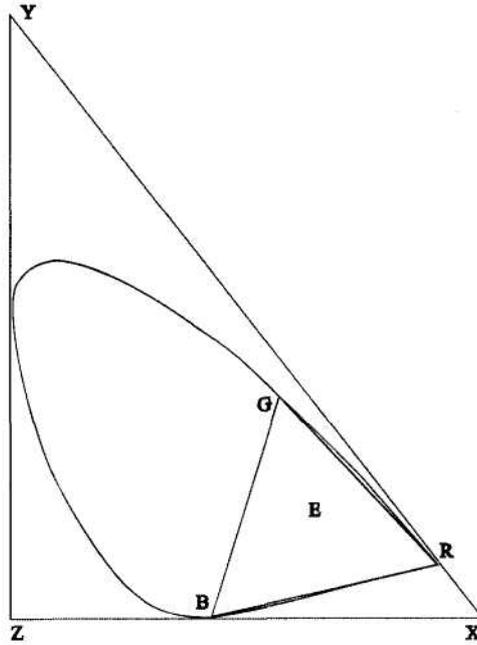


Рис.3. Основные цвета X,Y и Z на цветовом графике системы RGB

Координаты цветности x , y и z в системе XYZ:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{x'}{x'+y'+z'}; \\
 y &= \frac{y'}{x'+y'+z'}; \\
 z &= \frac{z'}{x'+y'+z'}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

При этом

$$x + y + z = 1. \tag{6}$$

На цветовом графике в системе XYZ по оси ординат располагаются координаты цветности y , а по оси абсцисс – x . Откладывая по осям значения x и y , находят точку, соответствующую цветности данного цвета. Проведя прямую линию из точки белого цвета E через точку с найденной цветностью до пересечения с линией спектральных цветов, можно определить необходимую длину волны. Система XYZ не отражает цветоразличительных свойств зрения: одинаковые расстояния на графике цветностей в различных его частях не соответствуют одинаковому зрительному различию между соответствующими цветами при одинаковой яркости. Таким образом, система XYZ является нелинейной.

МКО рекомендовало осуществлять переход от системы RGB к системе XYZ по формулам:

$$\begin{aligned}
 x' &= 0,4900r' + 0,3100g' + 0,2000b'; \\
 y' &= 0,1770r' + 0,8124g' + 0,0106b'; \\
 z' &= 0,0000r' + 0,0010g' + 0,9900b'.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Переход от системы XYZ к системе RGB:

$$\begin{aligned}
 r' &= 2,3646x' - 0,8965y' - 0,4681z'; \\
 g' &= -0,5152x' + 1,4264y' + 0,0888z'; \\
 b' &= 0,0052x' - 0,0144y' + 1,0092z'.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

МКО разработала универсальную схему, в основу которой легли стандартный фотометрический наблюдатель и цветовое пространство XYZ. В рамках этой схемы можно устанавливать соответствие цветов. МКО утвердила более однородную цветовую шкалу – CIE $L^*a^*b^*$. Поскольку цвет не может быть одновременно зелёным и красным или жёлтым и синим, в пространстве $L^*a^*b^*$ атрибуты "красный/зелёный" и "жёлтый/синий" обозначаются одними и теми же значениями. Здесь величина L^* – светлота, a^* – величина красной/зелёной составляющей, b^* – величина жёлтой/синей составляющей.

Координаты $L^*a^*b^*$:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116Y^* - 16; \\
 a^* &= 500(X^* - Y^*); \\
 b^* &= 200(Y^* - Z^*).
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для проведения лабораторной работы состоит из осветителя – галогенной лампы накаливания, приёмника – линейки ПЗС, соединённых тремя волоконными световодами, электронная система сбора и обработки данных, а также программного обеспечения. Три составляющие выходного сигнала приёмника определяются его спектральным откликом, спектральным распределением энергии осветителя, цветовыми характеристиками образца и др.

Работа с программой

Для запуска рабочей программы спектрометра используется файл RGB.EXE. Результаты измерения выводятся на экран в виде трёх окружностей красного, зелёного и синего цветов, яркость которых пропорциональна трём

сигналам датчика цвета. Для подавления спектрального отклика приёмника в диапазоне от 560 до 760 нм используется оптический фильтр из цветного стекла. Пересечение этих окружностей даёт цвет измеряемого образца. Красным цветом выводятся величины трёх сигналов и значения, используемые для изображения картинка. Для того, чтобы получить цвет, близкий к цвету измеряемого образца, необходимо произвести калибровку по белому образцу. Для измерения нужно нажать на клавишу «↑», а затем на клавишу в строке меню. Появляются три окружности максимальной яркости (255). Результаты измерений выводятся в виде строки со значком цвета и величинами R, G, B, которые нормированы на единицу. Всего может выводиться 20 строк, после чего первая строка заменяется новой. Данные сохраняются в текстовом файле после нажатия на кнопку с дискетой.

Проведение измерений

1) Калибровка приёмника излучения.

Необходимо преобразовать три составляющие выходного сигнала в значения системы XYZ. Для этого необходимо провести калибровку приёмника посредством трёх эталонных образцов с известными значениями в системе XYZ. Калибровка состоит в нахождении матрицы преобразования 3×3 , которая преобразует три выходные составляющие сигнала приёмника R, G, B в координаты X, Y, Z. В качестве эталонов используются оптические фильтры из цветного стекла. В каталоге цветного стекла есть данные значений цветности x, y. Измерив на приборе пропускание трёх фильтров, получают матрицу из трёх столбцов с величинами R, G, B.

Матрица преобразования:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ G_1 & G_2 & G_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \end{pmatrix}^{-1} \quad (10)$$

2) Проверка калибровки приёмника излучения.

Проверить точность калибровки можно с помощью других фильтров. Для этого на приборе снова измеряют пропускание новых фильтров, получают матрицу из трёх столбцов с величинами с величинами R, G, B и, используя матрицу преобразования, находят координаты цветности:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (11)$$

Найденные значения координат цветности проверяют по каталогу цветного стекла.

3) Определение цветовой температуры источника излучения.

Необходимо уменьшать напряжение и производить измерения, наблюдая на мониторе, как изменяется цвет излучения источника.

Содержание отчёта

- Цель работы.
- Описание методик измерения по каждой из решаемых задач.
- Качественный анализ полученных результатов и выводы по работе.

Контрольные вопросы

- Назовите основные параметры цвета.
- Чем отличаются стандартные источники излучения, принятые МКО?
- Что представляет собой цветовое уравнение?
- Как связаны координаты цвета и цветности?
- Как найти цвет с помощью цветового треугольника?
- Чем отличаются колориметрические системы RGB и XYZ?
- Как пользоваться колориметрической системой CIE $L^* a^* b^*$?

Литература

1. Каталог цветного стекла. – Л.: Машиностроение», 1967.
2. Гуторов М. М. Основы светотехники и источники света / М. М. Гуторов. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

Лабораторная работа № 7

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОПТИЧЕСКОЙ РАЗНОСТИ ФАЗ

Цель работы

- овладение методикой измерения поляризационных параметров оптического излучения;
- освоение метода "заданного угла" при измерении оптической разности фаз, внесенной двупреломляющим объектом;
- закрепление навыков обработки результатов измерений методом регрессионного анализа.

Основные теоретические сведения

Поляризационные измерения получили широкое распространение в технике оптико-физических измерений. В основе метода положено измерение параметров поляризованного оптического излучения, взаимодействующего с объектом, с последующей обработкой результатов в приближении задаваемой модели объекта.

Измерение параметров поляризованного излучения.

В современных приборах и технике эксперимента широкое применение получают цифровые методы обработки сигналов, имеющие более высокие метрологические характеристики (степень автоматизации, производительность, надежность, точность и др.). В технике поляризационных измерений таким методом является метод "вращающегося анализатора" с цифровым Фурье - детектированием выходного сигнала фотоприемника.

Рассмотрим сущность данного метода применительно к измерению параметров азимута и эллиптичности поляризованного излучения.

Поляризованное излучение имеет в общем случае эллиптическую поляризацию. При этом ортогональные компоненты светового вектора \vec{E} для выбранной системы координат (ось Z параллельна направлению распространения света) описываются выражениями вида:

$$E_x = E_{x0} \sin(\omega t + \delta_x), \quad (1)$$

$$E_y = E_{y0} \sin(\omega t + \delta_y). \quad (2)$$

Сложение ортогональных колебаний вида (1) и (2) на плоскости XY дает проекционную картину эллипса. При этом форма эллипса определяется параметрами!

$$\delta = \delta_y - \delta_x - \text{разность фаз}, \quad (3)$$

$$\text{tg}\psi = E_{x0}/E_{y0} - \text{отношение амплитуд} \quad (4)$$

Для описания формы эллипса часто используют также другую пару параметров, имеющих более наглядную геометрическую интерпретацию (рис.1): χ - азимут ориентации большой полуоси эллипса в выбранной системе координат и

$$\operatorname{tg} \gamma = b/a \quad - \text{эллиптичность, отношение полуосей эллипса.}$$

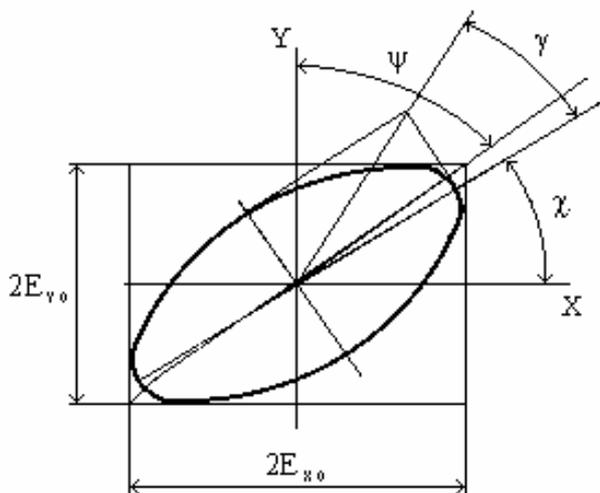


Рис. 1. Эллипс поляризации

Связь между параметрами ψ , δ , χ , γ задается формулами:

$$\cos 2\psi = -\cos 2\gamma \cos 2\chi, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} 2\gamma / \sin 2\chi, \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} 2\chi = -\operatorname{tg} 2\psi \cos \delta, \quad (7)$$

$$\sin 2\gamma = \sin 2\psi \sin \delta. \quad (8)$$

Представление эллипса поляризации двумя парами параметров и соотношения между ними имеют важное практическое значение. Непосредственно измеряемыми параметрами в большинстве измерительных схем являются величины χ и γ , для физической интерпретации результатов измерений часто более удобны параметры ψ и δ (например, при построении математической модели объекта с использованием законов Френеля для обработки результатов измерений). Схема измерения параметров поляризации по методу «вращающегося анализатора» приведена на (рис. 2).

Схема содержит анализатор (оптический элемент, пропускающий только линейную компоненту поляризации, направленную вдоль его главной плоскости) и фотоприёмное устройство, вырабатывающее сигнал, пропорциональный интенсивности излучения, прошедшего анализатор.

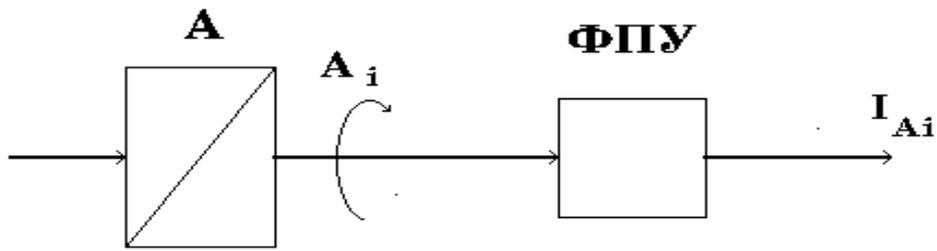


Рис. 2. Оптическая схема установки

Если анализатор поворачивается вокруг оптической оси, то выходной сигнал фотоприемника будет описываться зависимостью:

$$I_A = I_0 + I_m \sin[2(A + \varphi)], \quad (9)$$

где A - азимут анализатора,

I_0 - постоянная составляющая сигнала,

I_m - амплитуда переменной составляющей сигнала,

φ - фаза переменной составляющей. Приведенное выражение можно легко получить из закона Малюса.

Вид зависимости $I_A(A)$ представлен на (рис. 3).

Из рисунка следует; что ориентация анализатора A_{\max} , в момент достижения сигналом I_A максимального значения равна азимуту эллипса χ , а отношение минимального и максимального значений сигнала определяет эллиптичность:

$$\operatorname{tgy} = \frac{b}{a} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}} = \sqrt{\frac{I_0 - I_m}{I_0 + I_m}}. \quad (10)$$

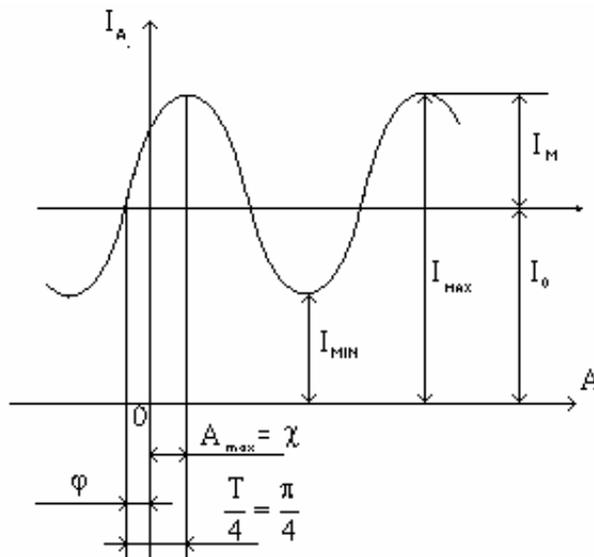


Рис.3. Фаза и амплитуда сигнала при измерении

Отметим также связь параметра χ с фазой φ синусоидального сигнала

$$\chi = \frac{\pi}{4} - \varphi. \quad (11)$$

Рассмотрим метод измерения параметров φ , I_{\min} , I_{\max} , с помощью цифрового Фурье-детектирования.

Представим периодическую зависимость (9) в виде ряда Фурье

$$I(A) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(kA) + b_k \sin(kA)], \quad (12)$$

где a_0 , a_k , b_k - коэффициенты Фурье.

Поскольку функция (9) является синусоидальной, то ряд Фурье (12) является ограниченным и содержит всего три члена

$$I(A) = a_0 + a_2 \cos 2A + b_2 \sin 2A. \quad (13)$$

Выражение (13) полностью адекватно выражению (9), при этом

$$2\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b_2}{a_2}, \quad (14)$$

$$I_m^2 = a_2^2 + b_2^2. \quad (15)$$

Определить коэффициенты Фурье a_0 , a_2 , b_2 , можно применив дискретное преобразование Фурье к функции $I(A)$. Исходными данными при этом является массив значений функции $I_i = I(A)$ на интервале, равном периоду функции, т.е. на полном обороте анализатора A . Значения аргумента A_i на интервале разбиения; равны $A_i = (4\pi/N)i$, где N - число точек разбиения.

При этом коэффициенты Фурье находятся по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i, \quad (16)$$

$$a_2 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \cos \frac{4\pi}{N} i, \quad (17)$$

$$b_2 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \sin \frac{4\pi}{N} i. \quad (18)$$

Параметры χ и γ с учетом (10),(11),(14) и (15) находятся по формулам:

$$\chi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{b_2}{a_2}, \quad (19)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \sqrt{\frac{a_0 - \sqrt{a_2^2 + b_2^2}}{a_0 + \sqrt{a_2^2 + b_2^2}}}. \quad (20)$$

Приведенный метод измерения поляризационных параметров реализован в ряде серийно выпускаемых поляризационно-оптических приборов - эллипсометрах (эллипсометры L115, L116 фирмы "Gaertner Scientific" /USA/, ETA "IBM Corporation" /USA/ и др.).

Измерение оптической разности фаз, вносимой двулучепреломляющим объектом

Для ряда научных и технических целей необходимо измерять разность фаз между линейными ортогональными компонентами поляризованного излучения, прошедшего через оптически анизотропные среды: кристаллы, напряженные оптически изотропные среды, жидкости в электрическом поле и т.д. Для такого рода измерений, обычно применяют различного рода компенсаторы, которые вносят обратную по знаку разность фаз, значение которой регистрируется в момент полной компенсации (положение "гашения").

Более простые методы измерения разности фаз основаны на непосредственном анализе эллиптически поляризованного излучения. Преимуществом этих методов является также более низкий уровень систематических погрешностей измерений.

Рассмотрим два варианта такого метода.

А. Измерение эллиптичности

Предположим, что линейно поляризованное под азимутом P излучение, проходит двулучепреломляющий объект, "быстрая" F - и "медленная" L - оси которого совпадают с осями системы координат X, Y . Разность фаз между составляющими вектора электрического поля световой волны E_x , и E_y , для случая линейной поляризации равна нулю. При прохождении объекта между компонентами вносится разность фаз δ и проекционная картина состояния поляризации меняется на эллиптическую. При этом внесенная разность фаз δ будет равна разности фаз между компонентами поляризованного излучения в выбранной системе координат. Если (см. формулу 4)

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{E_x}{E_y} = \frac{1}{\operatorname{tg} P}, \quad (21)$$

и измеренное значение эллиптичности γ , то используя (8), можно получить выражение для расчета разности фаз δ :

$$\sin \delta = \frac{\sin 2\gamma}{\sin 2\psi}. \quad (22)$$

Б. Измерение азимута

Если производится измерение азимута эллипса поляризации излучения, то, используя выражение (22), разность фаз можно найти в виде:

$$\cos \delta = -\frac{\operatorname{tg} 2\chi}{\operatorname{tg} 2\psi} = \operatorname{tg} 2\chi \operatorname{tg} 2P. \quad (23)$$

Методика Б носит название метода "заданного угла" и обладает наименьшим уровнем систематических погрешностей и наибольшей чувствительностью измерений среди известных поляризационных методов контроля разности фаз. Данный метод реализован в образцовом поляриметре комплекса метрологического обеспечения измерения оптической разности хода при двойном лучепреломлении (разработка ВНИИМ им. Менделеева Е.И.).

Проведение измерений

В ходе работы необходимо выполнить измерения оптической разности фаз, возникающей при прохождении поляризованного излучения через двулучепреломляющий объект. В качестве объекта предлагается набор слюдяных пластинок различной толщины.

Измерения предлагается выполнить двумя методами:

- методом измерения эллиптичности (метод А);
- методом "заданного угла" (метод Б).

Измерение параметра эллиптичности и азимута поляризованного излучения, необходимых для расчетов по методам А и Б, предлагается выполнять методом "вращающегося анализатора" с численным Фурье - детектированием выходного сигнала.

Измерения выполняются на установке, оптическая схема которой приведена на (рис. 4).

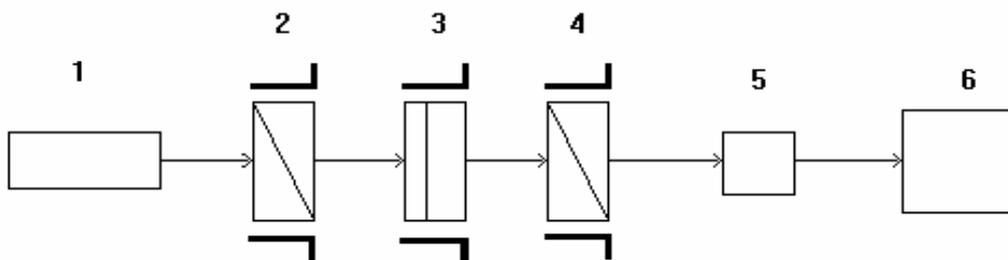


Рис. 4. Оптическая схема установки.

- 1 - источник излучения (He-Ne-лазер); 2 - поляризатор;
 3 - объект (фазовая пластинка); 4 - анализатор;
 5 - фотоприемник; 6 - вольтметр.

При проведении измерений рекомендуется пользоваться следующей методикой:

1. Включить источник излучения, вольтметр. Прогреть лазер не менее 20 минут.

2. Снять данные для определения начального отсчета по шкале анализатора, для этого:

а) определить значение темнового сигнала 1, фотоприемника (при перекрытом оптическом тракте);

б) снять выборку значений выходного сигнала фотоприемника при ориентациях анализатора $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 350^\circ$ - $I_0, I_1, I_2, \dots, I_{35}$.

3. Вращением анализатора установить "скрещенное положение", соответствующее минимальному уровню выходного сигнала.

4. Установить в держателе 3 оправу с измеряемым образцом. Вращением поворотного устройства держателя с закрепленным образцом восстановить "скрещенное положение", соответствующее минимальному уровню выходного сигнала. В этом положении F и L оси фазовой пластинки совпадают с осями системы координат, определенной в пп.2 и 3.

5. Повернуть образец от скрещенного положения на угол $20'$ (угол в принципе может быть любым, но максимальная чувствительность измерений обеспечивается при угле $22.5'$).

6. Снять данные для определения параметров поляризованного излучения, для этого:

а) определить значение темнового сигнала фотоприемника (при перекрытом оптическом тракте);

б) снять выборку значений выходного сигнала фотоприемника при ориентациях анализатора $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 350^\circ$ - $I_0^s, I_1^s, I_2^s, \dots, I_{35}^s$.

7. Сменить образец. Повторить пп. а - б.

Обработка и анализ полученных экспериментальных данных

Обработка данных выполняется в два этапа.

1. Вычисление коэффициентов Фурье по выборке значений сигнала фотоприемника. Расчет выполняется по формулам (16), (17), (18).

Учет темнового сигнала фотоприемника производится путем коррекции рассчитанного по формуле (16) значения коэффициента Фурье:

$$a_0 = a'_0 - I_0,$$

где a'_0 - рассчитанное по экспериментальным данным значение.

Аналогичные расчеты необходимо выполнить для двух выборок, полученных для каждого образца.

2. Далее по формулам (19), (20) следует рассчитать поляризационные параметры излучения χ и γ .

3. Расчет параметра δ образца выполняется по формулам (22), (23).

Результаты расчета рекомендуется занести в Таблицу 1.

(χ_0 - без образца; $P = 20^0$; χ' - с образцом.)

Контрольные вопросы

- Что такое эллиптическая поляризации?
- В чем отличие метода измерения эллиптичности от метода заданного угла?

Таблица 1

Положение	a_0'	a_0	a_2	b_2	χ'	γ	$\chi = \chi' - \chi_0$
Без образца							
Образец №1							
№2							
№3							

Литература

1. Горшков М.М. Эллипсометрия. – М.; Сов. Радио, 1974.
2. Волкова Е.А. Поляризационные измерения. –М.; Изд-во стандартов, 1974.
3. Буслаева В.Е., Налбандов Л.В. Объективный метод измерения разности фаз двупреломляющих объектов. - Труды ВНИИМ, 1970, вып. 114 (174), с.76-80.

Лабораторная работа № 8

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ И КИНЕТИКИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ НА СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРЕ «ФЛЮОРАТ-02»

Цель работы

- ознакомление с основными положениями теории атомной флуоресценции;
- овладение методом измерения спектров возбуждения и регистрации флуоресценции, а также методом измерения кинетики (временных характеристик) флуоресценции;
- ознакомление с устройством, конструкцией, оптической схемой и принципом действия спектроанализатора «ФЛЮОРАТ – 02»;
- приобретение навыков работы (градуировки и проведение измерений) на этом приборе.

Основные теоретические сведения

Флуоресценция атомов, общие положения

Многие вещества под действием падающего на них света начинают светиться. Но в отличие от обычного отражения, это свечение исходит не только с поверхности, но также из глубоко лежащих слоев освещаемого тела. Кроме этого оно обычно отличается по спектральному составу и состоянию поляризации от возбуждающего света. От каждого элемента объема светящегося тела, свечение распространяется изотропно.

Такое вторичное свечение, наблюдаемое в самых разнообразных условиях, получило название фотолюминесценция[1-3]. Фотолюминесценция может возникать как результат различного рода процессов взаимодействия световых квантов с веществом. Рассмотрим это на простом примере, взаимодействие фотонов с изолированными атомами. Каждый атом характеризуется большим набором дискретных энергетических состояний, наиболее устойчивое из которых обладает наименьшей энергией, его называют основным. Переход атомов в более высокие энергетические состояния возможен при получении ими дополнительной энергии.

Атомы могут получать эту энергию в процессе столкновений с другими частицами – электронами, атомами, ионами, а также при поглощении ими световых квантов или фотонов. После такого взаимодействия атом перейдет из нормального состояния 1 в одно из верхних возбужденных состояний, обозначим это состояние i рис. 1. На рис. 1 расстояние от основного уровня 1 до уровня i пропорционально энергии возбуждения этого уровня. Если атом в состоянии 1 взаимодействует с фотонами, частота которых удовлетворяет соотношению

$$E_{i1} = h\nu_{i1}, \quad (1)$$

то возможен переход атома из нормального состояния в состояние i .

Вероятность этого перехода обозначим B_{li} ; $B_{\lambda i}$ – один из трех введенных Эйнштейном коэффициентов A_{ik} , B_{ik} и B_{ki} , описывающих процесс поглощения и испускания света атомами, или подобными им электронными системами; B_{ki} – вероятность поглощения фотона, рассчитанная на единицу плотности $\rho(\nu)$ поглощаемого излучения. Если нормальные атомы, число которых в единице объема мы обозначим N_k , поглощают фотоны, проходящие через изучаемый объем, то число актов поглощения в единицу времени на протяжении длины dx можно вычислить, воспользовавшись соотношением:

$$\Phi = - B_{ki} N_k dx , \quad (2)$$

где Φ - плотность потока фотонов, проходящего через изучаемый объем.

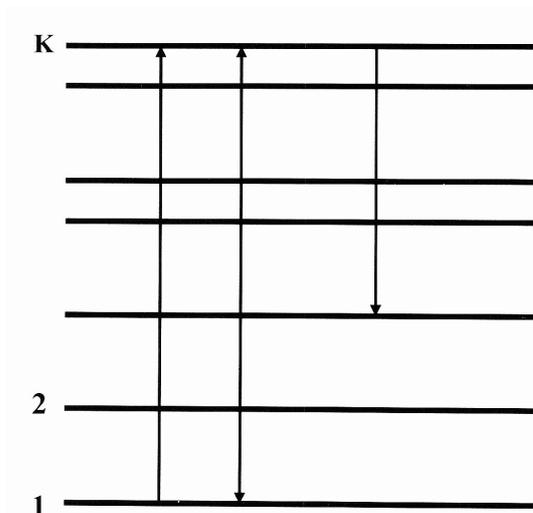


Рис.1. Схема энергетических уровней атома

В результате поглощения образуются атомы в верхнем возбужденном состоянии i . Из этого состояния атома могут испустить поглощенный фотон с частотой ν_{ik} и вернуться в более низкое энергетическое состояние k , в частности в нормальное состояние 1.

Этот процесс количественно описывается с помощью коэффициента A_{ik} – коэффициента спонтанного излучения, который показывает вероятность того, что атом спонтанно (без влияния внешних сил) перейдет с испусканием соответствующего фотона из состояния i в состояние k ($E_i > E_k$). При этом число фотонов, испускаемых единицей объема за время dt по всем направлениям равно $dN_\phi = A_{ik} N_i dt$, в частности, если $k=1$, то

$$dN_\phi = A_{i1} N_i dt . \quad (3)$$

В этом случае частоты поглощаемых и испускаемых фотонов одинаковы и соответствующее свечение объема называют резонансной флуоресценцией. Если энергия нижнего уровня отлична от нуля, то мы имеем дело со смещенной, или стоксовой флуоресценцией.

Переход атома в низкое возбужденное состояние, который сопровождается спонтанной эмиссией фотонов, не единственный процесс, приводящий в конечном итоге к возвращению атома в состояние с наименьшей энергией. Как показал Эйнштейн, одновременно с этим должен идти процесс, называемый индуцированным или вынужденным излучением. Он состоит в том, что под действием электромагнитного поля с частотой ν_{ik} возбужденный до i -го энергетического состояния атом переходит в более низкое k -е состояние, излучив при этом фотон той же частоты ν_{ik} . Разница между спонтанным и вынужденным излучением заключается в том, что направление движения индуцированного фотона, в том числе его частота и поляризация, совпадают с соответствующими характеристиками фотона индуцирующего излучения. Этот фотон не поглощается и не рассеивается, а продолжает распространяться в том же направлении. Следствием этого вместо одного фотона в данном направлении распространяются два практически одинаковых фотона.

Описание экспериментальной установки

Принцип работы прибора иллюстрируется оптической схемой рис. 2. Она может быть условно разбита на 3 канала: пропускания (блоки 1,2,3,5), опорный (блоки 6 и 7) и регистрации флуоресценции (блоки 8,9,10).

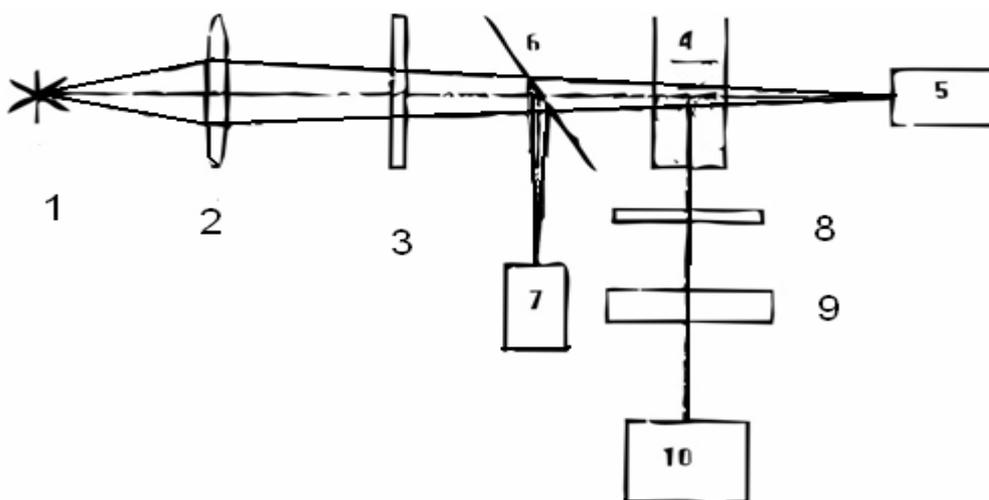


Рис. 2. Оптическая схема анализатора «ФЛЮОРАТ-02».

- 1 - источник света; 2 - фокусирующая линза;
- 3 и 8 - светофильтры каналов возбуждения и регистрации;
- 4 - исследуемый образец; 5 - фотоприемник канала пропускания ;
- 6 - светоделительная пластина; 7 - фотоприемник опорного канала;
- 9 - узел блокировки; 10 - фотоприемник канала регистрации.

В канале пропускания излучение ксеноновой лампы (1), работающей в импульсном режиме (рис. 3), проходит через собирающую линзу (2), обойму со светофильтрами (3), выделяющими спектральную область возбуждения, светоделительную пластину (6), исследуемый образец (4) и попадает на приемник

излучения (5) канала пропускания. Электрический сигнал от этого приемника зависит от оптической плотности образца и называется сигналом пропускания.

В опорном канале излучение ксеноновой лампы (1) проходит через собирающую линзу (2), обойму со светофильтрами (3), отражается от светоделительной пластины (6) и попадает на приемник излучения (7) опорного канала. Электрический сигнал от этого приемника называется сигналом сравнения и служит для учета нестабильности работы лампы от импульса к импульсу, а также для запуска импульсной электронной схемы регистрации и обработки сигналов.

Под действием излучения ксеноновой лампы в исследуемом образце происходит возбуждение флуоресценции. В канале регистрации излучение флуоресценции от исследуемого образца (4) проходит через обойму со светофильтрами (8), выделяющими спектральную область регистрации, узел механической блокировки (9) и попадает на приемник излучения (10) канала регистрации. Электрический сигнал этого приемника зависит от свойств исследуемого образца и называется *сигналом флуоресценции*.

Клавиши панели управления прибора

Задание параметров и режимов работы прибора

1. Клавиша «N» задает число импульсов источника света (ксеноновой лампы), по которым производится усреднение измеряемого аналитического сигнала. Время всего измерения $t=N/50$ сек., на индикатор выводится усредненное значение аналитического сигнала.

2. Клавиша «C» задает концентрацию градуировочного образца перед проведением операции градуировки. В дальнейшем при выполнении измерений на индикатор будет выдаваться результат в тех же единицах, которые были заданы при градуировке.

3. Клавиша «A» задает значение градуировочного коэффициента. Его значение определяется автоматически при выполнении операции градуировки, а также может вводиться с клавиатуры, если его значение для данного типа образцов достоверно известно.

4. Клавиша «И» производит измерение аналитического сигнала в канале регистрации флуоресценции и канале пропускания. После ее нажатия на индикаторе появляется значение сигнала в канале регистрации флуоресценции.

5. Клавиша «Т» выводит на индикатор отношение сигналов в опорном канале и канале пропускания (I/I_0). Значение этого параметра выводится на индикатор при нажатии клавиши «Т» после измерения аналитического сигнала (нажатия клавиши «И»).

6. Клавиша «Ф» производит измерение значения фона при выполнении операции градуировки (100% пропускание).

7. Клавиша «Г» используется при проведении операции градуировки.

8. Клавиша «F» производит переключение режимов работы спектроанализатора «Флюорат-02».

Режим работы фотоумножителя F1

Для входа в режим необходимо последовательно нажать клавиши «F» и «1». Затем можно выбрать один из трех режимов работы фотоумножителя «00» или «01» или «02». Данный режим устанавливает чувствительность работы прибора. Минимальная чувствительность задается выбором режима F1=00. Повышение значения F1 на 1 соответствует увеличению напряжения на ФЭУ на 25%, а чувствительности - примерно в 20 раз.

Режим работы измерительного тракта F2

Для входа в режим необходимо последовательно нажать клавиши «F» и «2». Затем можно выбрать режим «00» - регистрация флуоресценции или режим «01» - смещенный строб регистрации флуоресценции.

Режим регистрации флуоресценции F2=00 позволяет проводить измерение аналитического сигнала во время импульса ксеноновой лампы (рис. 3).

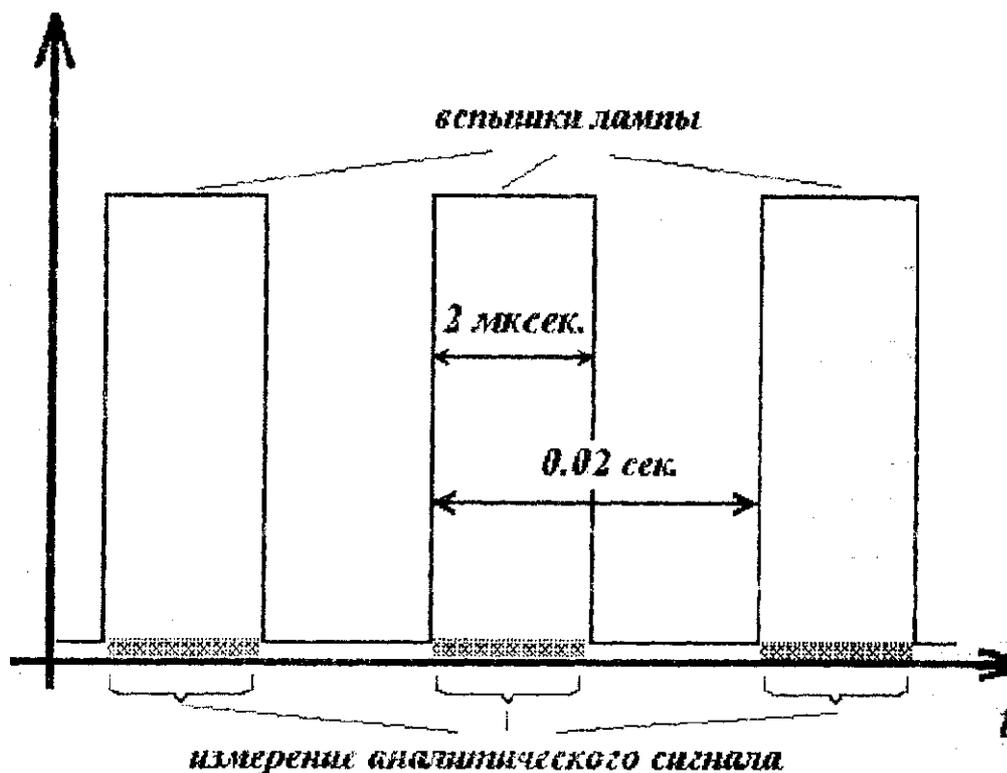


Рис. 3. Импульсный режим работы прибора

Режим F2=01 позволяет измерять кинетику флуоресценции образца. В этом режиме ФЭУ работает в режиме счета фотонов. Время задержки строба регистрации флуоресценции определяется по формуле:

$$t_{\text{задержки}} = 160 + L * 10 \text{ (мкс)} . \quad (4)$$

Параметр «L» означает длительность задержки начала интегрирования от конца импульса лампы. Параметр «L» может принимать значения в диапазоне от 01 до 99. Таким образом $t_{\text{задержки}}$ может принимать значения от 170 до 1150 мкс.

Параметр «Г» задает длительность интегрирования (регистрации) сигнала флуоресценции; он также может принимать значения от 0 до 99. Длительность интегрирования при этом рассчитывается следующим образом:

$$t_{\text{интегрирования}} = 25 + \Gamma * 10 \text{ (мкс)}. \quad (5)$$

Таким образом, $t_{\text{интегрирования}}$ может принимать значения от 35 до 1015 мкс. Смысл параметров «L» и «Г» поясняется на (рис. 4).

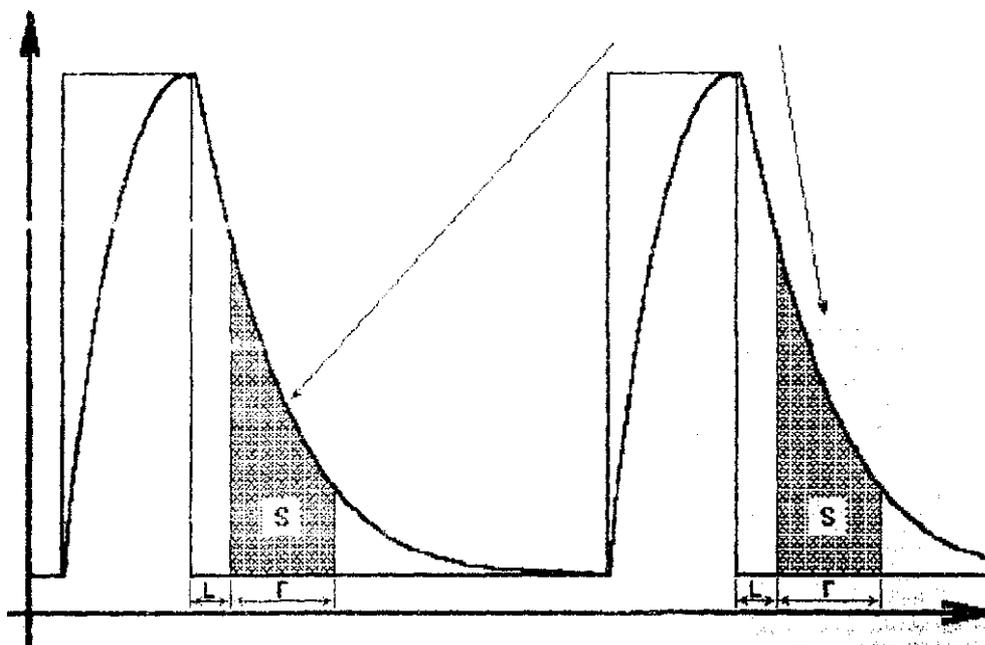


Рис. 4. Стробы регистрации кинетики флуоресценции

Режим коррекции аналитического сигнала F4

Для входа в режим необходимо последовательно нажать клавиши «F» и «4». Далее можно выбрать следующие режимы:

F4=00 - учет падающего и проходящего излучения. В данном режиме сигналы в опорном канале и в канале пропускания используются для коррекции аналитического сигнала. Сигнал в опорном канале используется для коррекции нестабильности работы лампы, что позволяет уменьшить разброс при измерении фона, а сигнал в канале пропускания – для коррекции на самопоглощение образца – увеличение линейной области градуировочного графика.

F4=01 – Отключение канала пропускания. Поправка на поглощение образца не производится. Сигнал исправляется только с учетом нестабильности работы лампы.

F4=02 - Отключение опорного канала. Производится поправка только с учетом нестабильности сигнала в канале пропускания.

F4=03 – Отключение опорного канала и канала пропускания. В этом режиме не проводится никаких поправок полученного аналитического сигнала.

Режим градуировки F5

Для входа в режим необходимо последовательно нажать клавиши «F» и «5».

F5=00 – градуировка по одной точке. Измеряется фон холостой пробы (клавиша «Ф»), затем проводится градуировка по стандартному образцу (клавиша «Г»). Предполагается, что градуировочный график линеен.

Проведение измерений

При включении прибора в сеть устанавливаются следующие значения: N=100; C=100.0; T=1.000; F1=00; F2=00; F4=00; F5=00.

Если вам необходимо изменить или просмотреть значение какого-либо параметра, то нажмите соответствующую ему клавишу или комбинацию. Затем с помощью цифровой клавиатуры наберите на цифровом индикаторе значение задаваемого параметра. *Осуществите ввод в память прибора набранного значения нажатием клавиши «#».* В качестве десятичной точки используется клавиша «*».

Если значение вводимого параметра набрано неверно, нажмите клавишу любого другого параметра, кроме выбранного, и повторите ввод, либо сдвиньте введенное значение, набрав нули, и повторите ввод.

Внимание!

Все измерения проводить только с закрытой крышкой кюветного отделения.

Часть 1. Проведение градуировки прибора и измерение флуоресценции.

Включить прибор клавишей «Сеть» и прогреть его в течение 20 минут. По указанию преподавателя установить в кюветном отделении в каналах возбуждения и регистрации флуоресценции соответствующие интерференционные светофильтры. Возможные их комбинации приведены в Таблице 1. *(не путать светофильтры « I » и « 1 »).*

Таблица 1.

Канал возбуждения флуоресценции	I	1	I	1
Канал регистрации флуоресценции	K2	3	3	K2

Длины волн пропускания: **I** –280нм; **K2** –310нм; **1** – 290нм нм; **3** - 340нм.

1. Установить режим регистрации флуоресценции, последовательно нажав клавиши «F», «2» (на индикаторе появится «P 00»), «0», «0», «#».

2. Установить режим градуировки, последовательно нажав клавиши «F», «5», (на индикаторе появится «PP00»), «0», «0», «#»..

3. Установить следующие значения параметров $N=25$; $C=100.0$. Нажать соответствующую клавишу (над ней загорится зеленый индикатор), с клавиатуры ввести необходимое значение (например «25», «*», «0»), занести его в память анализатора, нажав клавишу «#».

4. Произвести измерение фона, нажав клавишу «Ф». Убедиться в том, что на индикаторе появились цифры «0000».

5. Установить образец «3» в кюветное отделение (цифрой 3 вверх, открытым торцом в направлении канала регистрации флуоресценции).

6. Произвести градуировку прибора нажатием клавиши «Г» (в данном случае градуировка производится по образцу «3», для которого ранее в п.5 было установлено значение $C=100.0$). Свечение индикатора над клавишей «Г» свидетельствует о работе прибора в режиме градуировки. По окончании градуировки на цифровом индикаторе высветится значение градуировочного коэффициента «А». Записать его значение в Таблицу 2.

Таблица 2.

№	«А»	«0» образец		«1» образец		«2» образец	
		«И»	«Т»	«И»	«Т»	«И»	«Т»
1.							
2.							
3.							
...							
Среднее							

7. Повторить пункт 8 несколько раз (7-10) по указанию преподавателя. Вычислить среднее значение градуировочного коэффициента «А».

8. Ввести среднее значение «А» в память анализатора, последовательно нажав клавиши «А», «измеренное среднее значение А» и «#».

9. Установить образец «0» в кюветное отделение (см. п.7).

10. Произвести измерение сигнала в канале флуоресценции, нажав клавишу «И», и в канале пропускания, нажав клавишу «Т». Повторить эту операцию несколько раз (7-10) по указанию преподавателя. Вычислить средние значения сигналов флуоресценции и пропускания. Результаты измерений записать в Таблицу 2.

11. Повторить пункты 11 – 12 с образцами «1» и «2».

12. По указанию преподавателя в соответствии с Таблицей 1 установить другую комбинацию интерференционных фильтров в каналах возбуждения и регистрации флуоресценции. Повторить пункты 3 – 13.

Часть 2. Измерение кинетики флуоресценции.

1. Включить прибор клавишей «Сеть» и прогреть его в течение 20 минут. По указанию преподавателя установить в кюветном отделении в каналах возбуждения и регистрации флуоресценции соответствующие интерференционные светофильтры. Возможные их комбинации приведены в Таблице 1 (*не путать светофильтры «I» и «1»*).

2. Установить следующие значения параметров $N=25$; $C=100.0$; $A=0.100$. Нажать соответствующую клавишу (над ней загорится зеленый индикатор), с клавиатуры ввести необходимое значение (например, «100», «*», «0»), занести его в память анализатора, нажав клавишу «#».

3. Установить образец «0» в кюветное отделение (цифрой 0 вверх, открытым торцом в направлении канала регистрации флуоресценции).

4. Установить режим измерения кинетики флуоресценции, последовательно нажав клавиши «F», «2» (на индикаторе появится «P 00»), «0», «1», «#». При этом на индикаторе появится «L 01». Это означает, что в формуле (20), параметр $L=1$. Смысл параметра L - задержки строба регистрации флуоресценции поясняется на Рис.9.

5. Нажать клавишу «#». На индикаторе появится «Г 01». Это означает, что в формуле (21), параметр $\Gamma=1$. Смысл параметра Γ - длительности интегрирования (регистрации) сигнала флуоресценции поясняется на (рис. 4.

6. Нажать клавишу « # ». Все индикаторы погаснут.

7. Произвести измерение сигнала флуоресценции, нажав клавишу «И» несколько раз (7-10) по указанию преподавателя. Вычислить среднее значение сигнала флуоресценции «И». Полученные результаты записать в Таблицу 3.

Таблица 3.

№	Сигнал флуоресценции «И»								
	L=01	L=05	L=10	L=15	L=20	L=40	L=60	L=80	L=99
.									
.									
...									
Сред- нее									

8. Последовательно нажать клавиши «F», «2» (на индикаторе появится «P 00» или «P 01»), «0», «1», «#». Ввести значение $L=05$. Для этого нажать 05, «#»,«#». Все индикаторы погаснут.

9. Повторить пункт 8.

10. Повторить пункты 9 и 10 для значений $L=10$, $L=15$, $L=20$, $L=40$, $L=60$, $L=80$, $L=99$.

11. Построить график зависимости среднего значения сигнала флуоресценции «И» от времени задержки строба регистрации флуоресценции $t_{\text{задержки}}$.

12. Провести измерение кинетики флуоресценции для образцов «1», «2», «3» (по указанию преподавателя). Для этого повторить пункты 4 – 12, установив указанный образец в кюветном отделении.

13. По указанию преподавателя возможно выполнение пунктов 1 – 13 при других комбинациях интерференционных фильтров в каналах возбуждения и регистрации флуоресценции в соответствии с Таблицей 1.

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы.
2. Основные теоретические положения теории флуоресценции атомов.
3. Оптическая схема анализатора «Флюорат – 02».
4. Полученные результаты (таблицы, графики) градуировки и измерений флуоресценции (кинетики флуоресценции) образцов «0» - «3» для различных комбинаций интерференционных фильтров в каналах возбуждения и регистрации флуоресценции.

Литература

1. Зайдель А.Н. Атомно-флуоресцентный анализ. Физические основы метода. – М., Наука, 1980. – 126с.
2. Спектральный анализ чистых веществ. Под ред. Зильберштейна Х.И. – СПб., Химия, 1994. – 336 с.
3. Прайс В. Аналитическая атомно-абсорбционная спектроскопия. – М., Наука, 1986.
4. Дробышев А.И. Основы атомного спектрального анализа. – СПб., Из-во СПбГУ, 1997. – 200с.

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГОВЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП

Цель работы

- Исследование спектров излучения дуговых газоразрядных ламп с ртутно-гелиевым наполнением (лампа ДРГС-12) и дейтериевым наполнением (лампа ДДС-30);
- калибровка (проверка калибровки) шкалы длин волн используемого спектрометра по измеренным экспериментально в работе линиям излучения дугового разряда в ртутно-гелиевой смеси (лампа ДРГС-12);
- исследование интенсивности линий излучения ртутно-гелиевой смеси (лампа ДРГС-12) в зависимости от времени после включения лампы;
- определение с использованием лампы ДДС-30 длин волн излучения водорода в серии Бальмера;
- идентификация по данным спектральных исследований дугового разряда в дейтерии (лампа ДДС-30) постоянной Ридберга, а также нахождение энергии ионизации в различных квантовых состояниях.

Основные теоретические сведения

Используемые в данной лабораторной работе дуговые газоразрядные лампы ДРГС-12 и ДДС-30 идентичны по конструктивному исполнению и эксплуатационным характеристикам. Конструктивно лампа представляет собой стеклянную колбу сферо-цилиндрической формы (образец для ознакомления с внешним видом и конструкцией ламп предоставляется преподавателем) с впаянным окном для вывода излучения. Выходное окно изготавливается из увиолевого стекла, прозрачного в ультрафиолетовой области спектра. Лампы имеют прямонакальный катод спиральной формы и анод в виде двухполостного прямоугольного параллелепипеда с отверстием диаметром $\cong 1.5$ мм для вывода излучения из области дугового разряда. Лампы ДРГС-12 и ДДС-30 имеют одну и ту же схему электрического включения, использующую стандартный блок питания.

Лампа ДРГС-12 с ртутно-гелиевым наполнением имеет линейчатый спектр излучения, формируемый излучательными оптическими переходами как между уровнями гелия, так и между уровнями ртути. Характерные линии излучения этой лампы в области длин волн 380-760 нм (видимая область спектра) даны в таблице 1. Лампа ДРГС-12 используется главным образом как эталонный излучатель, предназначенный для калибровки шкал длин волн оптического спектральных приборов.

Дуговая лампа ДДС-30 с дейтериевым наполнением используется, в основном, в качестве источника излучения с непрерывным (сплошным) спектром в ультрафиолетовой области спектра (при $\lambda < 350$ нм). В видимой области ($\lambda = 380 \div 760$ нм) эта лампа имеет характерный линейчатый спектр, формируемый, в основном, излучательными оптическими переходами, соответствующими линиям серии Бальмера. Дополнительные линии в наблюдаемом спектре излуче-

ний, а также расщепление и смещение отдельных линий обусловлены использованием в качестве наполнения лампы ДДС-30 дейтерия (изотопа атома водорода). Поэтому наблюдаемая серия линий излучения дополнена линиями излучения, принадлежащими дейтерию, а также расщеплёнными линиями (изотопическое расщепление и сдвиг). Схематическое изображение уровней энергии электрона в атоме водорода показано на рис. 1.

Таблица 1. Характерные линии излучения лампы ДРГС-12.

λ , нм	Цвет	Элемент
388.9	невидимый ультрафиолет	He
404.66	фиолетовый	Hg
435.83	синий	Hg
447.15	голубой	He
471.32	голубой	He
491.61	зелёный	Hg
492.19	зелёный	He
501.57	зелёный	He
546.07	жёлто-зелёный	Hg
576.96; 578.97	жёлтый	Hg
587.56	жёлтый	He
667.8	красный	He
708.2	красный	Hg

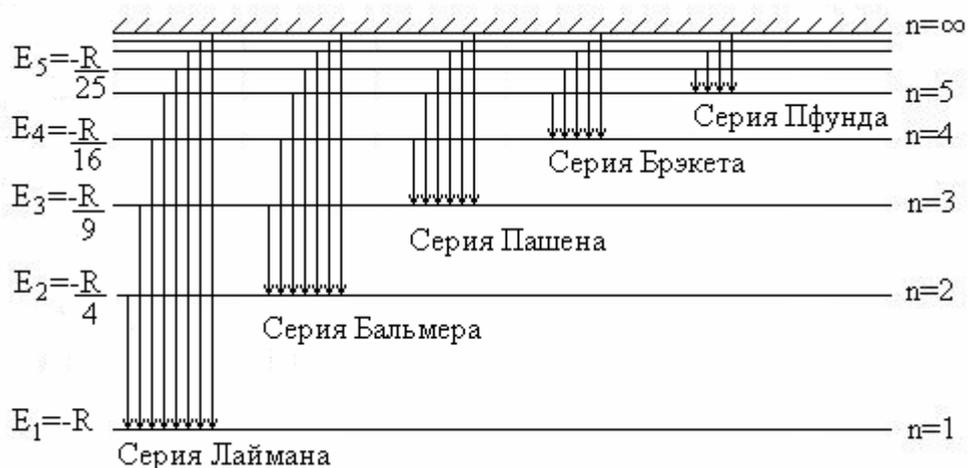


Рис. 1. Уровни энергии электрона в атоме водорода

Расположение уровней энергии электрона в атоме водорода подчиняется известному правилу Бора:

$$E_n = \frac{R}{n^2}, \quad (1)$$

где R – постоянная Ридберга; n – главное квантовое число $n = 1, 2, 3, \dots$

При $n = 1$ (основное состояние атома водорода) $E_1 = R$, т.е. постоянная Ридберга представляет собой энергию ионизации атома водорода (энергию «отрыва» электрона), находящегося в основном состоянии с $n = 1$.

Спектры излучения атома водорода (лампа ДДС-30) в основном состоянии формируются оптическими переходами электронов из возбуждённых состояний ($n = 2, 3, \dots$), которые заполняются вследствие процессов столкновения в дуговом разряде, на нижележащие уровни энергий. Поэтому в спектре излучения могут наблюдаться характерные серии линий рис.1:

- серия Лаймана образована излучательными переходами с уровней $n = 2, 3, 4, \dots$ в основное состояние с $m = 1$;
- серия Бальмера образована переходами с возбуждённых уровней $n = 3, 4, 5, \dots$ на уровень $m = 2$;
- серия Пашена образована переходами с уровней $n = 4, 5, 6, \dots$ на уровень $m = 3$.

Более длинноволновые серии линий излучения связаны с переходами электронов в атоме водорода из более высоких возбуждённых состояний на уровень с $m = 4$ (серия Брэкета) и уровень $m = 5$ (серия Пфунда).

В соответствии с приведённым выше правилом Бора, длины волн линий излучения в каждой из серий могут быть найдены как:

$$E_m - E_n = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{hc}{\lambda_{mn}}, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме.

Если энергии E_m , E_n и постоянная Ридберга выражаются в электрон-вольтах (эВ), а длины волн в микрометрах (мкм), то размерная постоянная hc имеет значение $hc = 1.2397$ (эВ·мкм).

Спектр излучения дугового газового разряда в водородной плазме исследуемой лампы ДДС-30 является сплошным при длинах волн $\lambda < 350$ нм. Это обусловлено переходами свободных электронов плазмы, где $E = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$, на возбуждённые и основной уровень атома водорода. Поэтому серия линий излучения Лаймана, в которой наиболее длинноволновая линия излучения приходится на $\lambda_{12} = 121$ нм, не может наблюдаться экспериментально на фоне более интенсивного сплошного спектра излучения.

Серия линий Бальмера и дополнительные линии, связанные с изотопическими расщеплениями и сдвигами в дейтерии, приходится на видимую и ближнюю ультрафиолетовую область спектра. В соответствии с вышеприведёнными соотношениями это позволяет определить по данным спектральных измерений энергии ионизации возбуждённых состояний атома водорода (используется $n = \infty$) и постоянную Ридберга.

Описание экспериментальной установки

Схема используемой в данной лабораторной работе экспериментальной установки представлена на рисунке 2.

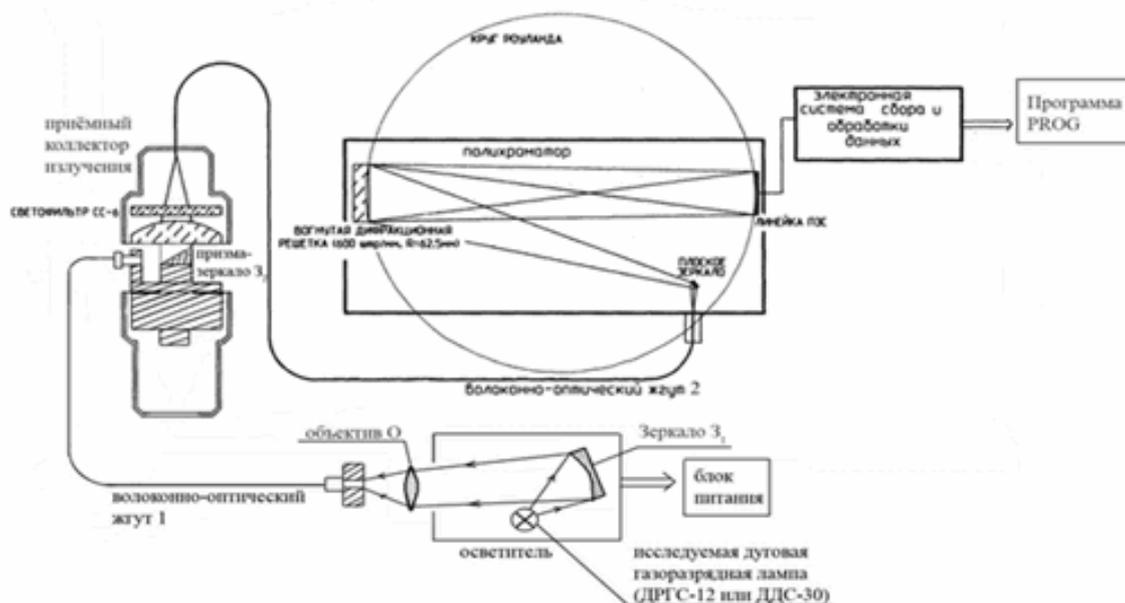


Рис.2. Схема экспериментальной установки

В её состав входят:

- *осветитель* со сменными газоразрядными дуговыми лампами ДРГС-12 или ДДС-30. Излучение исследуемой лампы (ДРГС-12 или ДДС-30), установленной в стандартную арматуру с защитным кожухом (лампы имеют достаточно интенсивную составляющую в ультрафиолетовой области длин волн с вредным воздействием на органы зрения), посредством *зеркала* Z_1 и дополнительно *кварцевого объектива* O концентрируется на приёмном торце *волоконно-оптического жгута* 1. С выходного торца этого жгута с помощью *призмы-зеркала* Z_2 излучение передаётся в

- *приёмный коллектор излучений*, в состав которого входят *объектив* и *оптический фильтр*, изготовленный из цветного стекла СС6. Поступающее в коллектор посредством *призмы-зеркала* Z_2 излучение исследуемой газоразрядной лампы концентрируется на приёмном торце *волоконно-оптического жгута* 2. Через этот жгут излучение передаётся в *спектрометр*, выполненный на базе *полихроматора*.

- *Спектрометр* обеспечивает измерение интенсивности оптического сигнала в области длин волн $380 \div 760$ нм. Полихроматор спектрометра выполнен на базе простой *нарезной вогнутой дифракционной решётки* с постоянной 600 штр/мм и радиусом 62.5 мм, так что спектр формируется на *круге Роуланда*. Регистрация спектра производится *линейкой ПЗС* (SONY1LX511), линейный размер регистрируемого спектра составляет $14\text{мкм} \times 2048\text{PIX} = 28,672$ мм. Выходной сигнал линейки ПЗС обрабатывается *электронной системой сбора и обработки данных* и с помощью программы PROG выводится в виде графиков зависимости сигнала АЦП (16 разрядов) от номера элемента (PIX) линейки, а также в виде числовых массивов данных.

Проведение измерений

Работа с программой. Для получения исходных данных используется программа PROG. После запуска программы её инициализация осуществляется клавишей «INIT». Программа передаёт в виде графика массив числовых данных из 254 точек (усреднённый сигнал с каждого 8-го элемента линейки), а также текстовые числовые данные из 131 точки.

Для получения результатов измерений после инициализации программы используются клавиши «TRANSMIT» - «READ» - «GRAPHIC». Последовательность «TRANSMIT» - «READ» выводит текстовый массив числовых данных из 131 точки, который может быть после копирования использован для дальнейшего анализа с использованием пакетов прикладных математических программ MATLAB, Mathcad и др. Последующее нажатие клавиши «GRAPHIC» выводит результаты измерений в виде 254 точек на график зависимости «сигнал АЦП – номер элемента (PIX)». При нажатии клавиши «GRAPHIC» числовой массив данных будет удалён.

Программа PROG позволяет одновременно воспроизводить два графика, первый из которых обновляется при последующем измерении (последовательное нажатие клавиш «TRANSMIT» - «READ»). Программа позволяет накапливать числовые массивы данных измерений, если не используется графический вывод (клавиша «GRAPHIC»). Программа PROG выводит результаты измерений на график со знаком «-».

Обработка результатов измерений. В данной работе целесообразно использовать пакет прикладных математических программ MATLAB.

Выполняемые задачи.

Задача №1 Исследование спектра излучения ртутно-гелиевой дуговой газоразрядной лампы ДРГС-12 и калибровка (проверка калибровки) шкалы длин волн лабораторного спектрометра.

1) После снятия защитного кожуха в осветителе экспериментальной установки установить лампу ДРГС-12.

2) Вилкой блока питания произвести включение лампы. Срабатывание блока питания происходит автоматически через 5 ÷ 7 мин после его включения в сеть 220 В, 50 Гц.

3) Произвести дополнительную юстировку осветителя так, чтобы область концентрации излучения дуговой лампы приходилась на приёмный торец волоконно-оптического жгута 1. Положение зоны концентрации излучения лампы можно наблюдать через объектив осветителя на оправе крепления волоконно-оптического жгута 1.

4) Установить защитный кожух осветителя (*соблюдать при этом предельную осторожность*).

5) Используя программу PROG, измерить интенсивность излучения лампы ДРГС-12. Для детализации элементов графика использовать кросс-рамку.

6) Использовать данные приведённой выше таблицы спектра излучения ртутно-гелиевого дугового разряда для идентификации длин волн наблюдае-

мых линий излучения. При необходимости использовать для привязки цветные стёкла и каталог цветных стёкол (находятся у ведущего преподавателя). Стекло устанавливается между призмой-зеркалом Z_2 осветителя и объективом приёмного коллектора излучений. Например, цветное стекло ЖЗС 1 отфильтровывает линию излучения $\lambda = 546.1$ нм в спектре ДРГС-12.

7) Составить исходную таблицу для калибровки шкалы длин волн спектрометра по приводимому ниже образцу.

Таблица 2 Калибровка шкалы длин волн спектрометра

№ п/п	PIX (номер пикселя)	Длина волны λ , нм

На основании данных таблицы построить калибровочную зависимость $\lambda = f(\text{номер PIX})$. Используя доступные математические пакеты для обработки экспериментальных данных, сопоставить возможные варианты аппроксимации этой зависимости. Обосновать выбор аналитического выражения для аппроксимации полученных экспериментальных результатов.

В качестве примера на рис. 3 и рис. 4 приведены обработанные в системе MATLAB спектры излучения дугового ртутно-гелиевого разряда и результаты линейной калибровки шкалы спектрометра.

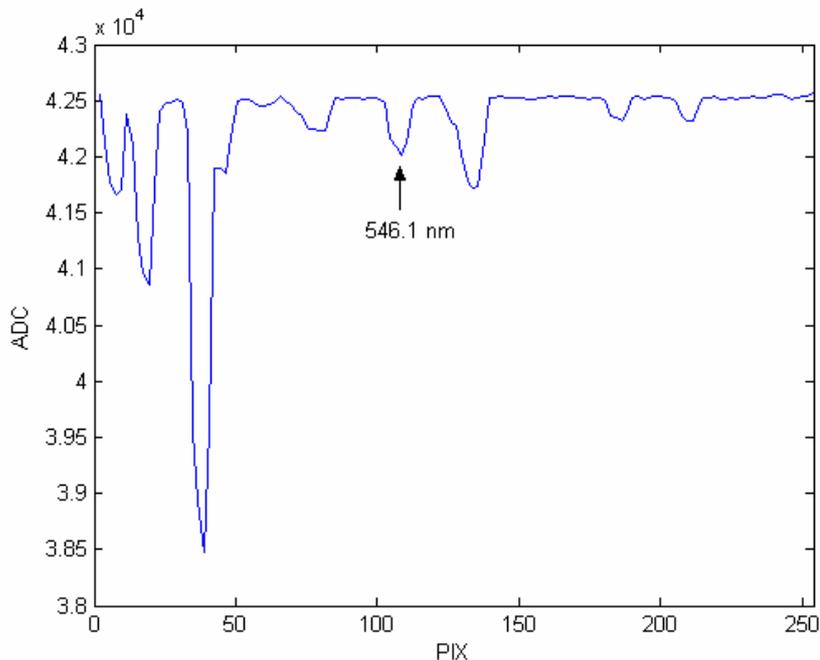


Рис.3. Спектры излучения дугового ртутно-гелиевого разряда

Задача №2 Определение зависимости интенсивности линий излучения лампы ДРГС-12 от времени (динамика излучения ртутно-гелиевого разряда).

1) Отключить питание лампы ДРГС-12. Для этого извлечь из розетки питания вилку блока.

2) Перезапустить программу PROG.

3) По истечении 3 ÷ 5 мин произвести повторное включение лампы ДРГС - 12.

4) Используя программу PROG, произвести регистрацию 5-7 спектров излучения лампы ДРГС-12 на отрезке времени 0 ÷ 30 мин с интервалом, указанным преподавателем. *Избегать вывода данных на график*, что позволит их сохранить в виде числовых текстовых массивов.

5) Произвести обработку полученных результатов (использовать систему MATLAB), привести графики зависимости интенсивности излучения наблюдаемых линий от времени, дать качественную интерпретацию экспериментально полученных результатов.

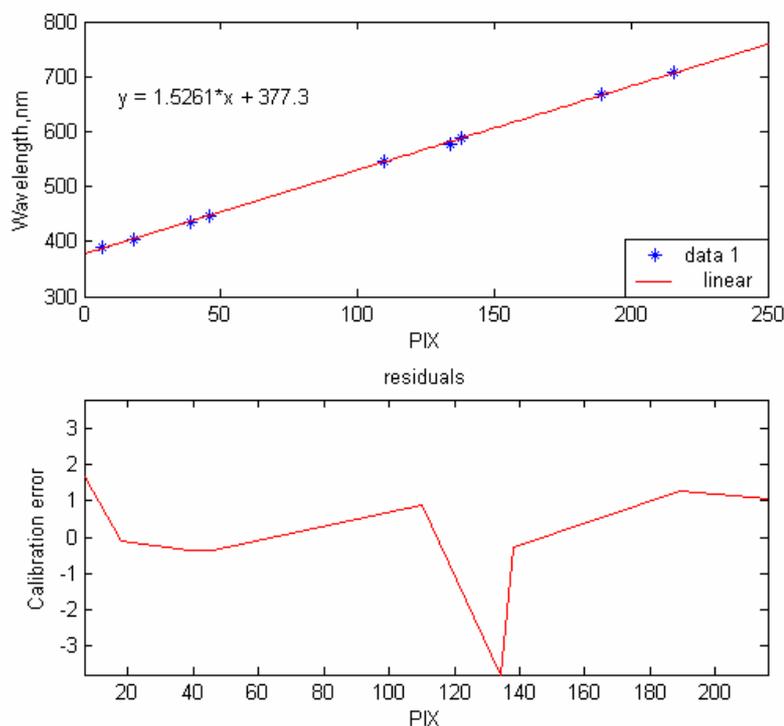


Рис.4. Калибровки шкалы длин волн спектрометра

Задача №3 Исследование спектра излучения дуговой газоразрядной лампы ДДС-30 с дейтериевым наполнением.

1) В осветителе установки заменить лампу ДРГС-12 на лампу ДДС-30 (снять защитный кожух, аккуратно извлечь из цоколя имеющуюся лампу ДРГС-12, установить в цоколь лампу ДДС-30, произвести её включение и дополнительную юстировку, установить защитный кожух).

2) Используя результаты, полученные при выполнении задач №1 и №2, установить длины волн линий излучения в спектре лампы ДДС-30. (В качестве примера на рис.5 приведён обработанный в системе MATLAB спектр излучения лампы ДДС-30).

3) На основании правила Бора установить, какие из наблюдаемых линий излучения относятся к серии Бальмера (при этом постоянную Ридберга принять $R = 13.6$ эВ).

4) По идентифицированным длинам волн излучения в серии Бальмера найти энергии ионизации уровней атома водорода ($n > 2$). Полученные результаты сравнить с данными литературы.

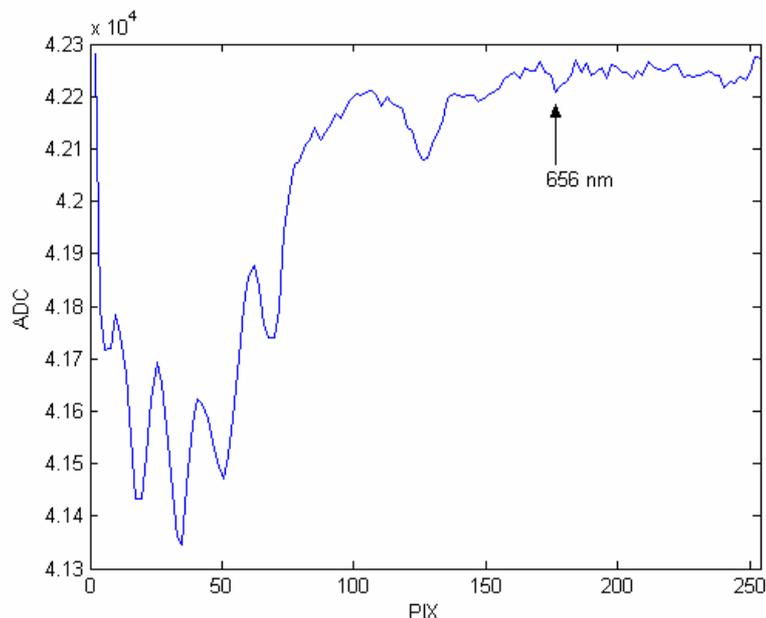


Рис.5. Спектр излучения лампы ДДС-30

Содержание отчёта.

- Описание основных теоретических положений и методики экспериментов по каждой из решаемых задач.
- Результаты экспериментальных данных в виде графиков и таблиц.
- Тексты файлов обработки данных в MATLAB.
- Качественный анализ полученных результатов.
- Выводы.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы дуговых газоразрядных ламп.
2. Что представляют собой линейчатый и сплошной спектры излучения?
3. Назовите спектральные серии.
4. Чему равна постоянная Ридберга для атома водорода?
5. Сформулируйте постулаты Бора.
6. Поясните, как происходят квантовые переходы.
7. Дайте определение энергии ионизации.

Литература

1. Источники и приёмники излучения [Электронный ресурс]. – Конспект лекций. – СПб ГУ ИТМО. – Режим доступа: <http://www.ifmo.ru>.

Лабораторная работа № 10 СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ ЦВЕТНЫХ СТЕКОЛ И ПАРАМЕТРЫ ИХ ЦВЕТНОСТИ

Цель работы

- исследование фотометрических характеристик спектрометра на основе полихроматора;
- измерение спектров пропускания цветных стекол, комбинаций цветных стекол, расчет спектров пропускания отдельных стекол и их комбинаций, а также экспериментальная проверка результатов расчетов;
- конструирование оптических фильтров на основе цветных стекол и экспериментальная проверка результатов конструирования;
- расчет параметров цветности цветных стекол, их комбинаций, а также оптических фильтров на основе цветных стекол;
- экспериментальная проверка результатов расчетов параметров цветности.

Основные теоретические сведения

1. Спектральная характеристика стекол

Спектральная характеристика стекол выражена численными значениями показателей поглощения k или оптической плотности D и спектральными кривыми пропускания τ , оптической плотности D и логарифма оптической плотности $\lg D$.

Показатель поглощения k стекла для света длиной волны определяется из выражения рис.1

$$k = -(\lg \tau) / l, \quad (1)$$

где τ - коэффициент пропускания стекла толщиной l (мм) для монохроматического света длиной волны λ .

Оптическая плотность D массы стекла для монохроматического света с длиной волны λ связана с показателем поглощения k и коэффициентом пропускания τ следующим соотношением:

$$D = -\lg \tau = k l. \quad (2)$$

При расчете оптической плотности светофильтра необходимо учитывать, кроме поглощения света, потери на отражение от двух поверхностей стекла и вводить соответствующую поправку.

Коэффициент пропускания τ' светофильтра толщиной l (мм) при перпендикулярном падении монохроматического света данной длины волны равен:

$$\tau' = (1 - \rho)^2 \tau = (1 - \rho)^2 10^{-k\lambda l}, \quad (3)$$

где ρ - коэффициент отражения.

Оптическая плотность D'_λ светофильтра для данной длины волны равна:

$$D'_\lambda = -\lg \tau'_\lambda = D_\lambda + D_\rho = kx_l + D_\rho, \quad (4)$$

где D_ρ - поправка на отражение света от двух поверхностей стекла.

Показатель преломления n , коэффициент отражения ρ , и поправка на отражение D_ρ . Коэффициент отражения, необходимый для расчета поправки на отражение D_ρ , определяется по формуле

$$\rho = (n-1)^2 / (n+1)^2, \quad (5)$$

где n - показатель преломления стекла. Поправка на отражение определяется выражением $D_\rho = -2 \cdot \lg(1 - \rho)$.

Обычно коэффициент отражения условно принимают за постоянную для стекла каждой марки величину, зависящую только от показателя преломления этого стекла в видимой области спектра n_D . Фактически показатель преломления непостоянен и зависит от длины волны проходящего света. Наиболее значительно показатель преломления отличается от n_D в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Это вносит погрешность в определение коэффициента отражения и поправки на отражение от поверхности стекла. Наибольшей эта погрешность будет в тех случаях, когда рабочая область светофильтра находится за пределами видимого спектра, а величина показателя преломления стекла мала, т. е. сравнима с величиной коэффициента отражения.

При выполнении лабораторной работы можно принять с достаточной точностью $n_D = 1.52$; $\rho = 4.3\%$; $D_\rho = 0.038$; а поправку на отражение от двух поверхностей светофильтра $(1 - \rho)^2 = 0.918$.

Коэффициент пропускания комбинации из n последовательно расположенных светофильтров может быть вычислен как произведение коэффициентов пропускания отдельных светофильтров по формуле:

$$\tau_1^n = \tau_1 \dots \tau_i \dots \tau_n, \quad (6)$$

где τ_1, τ_i, τ_n - коэффициенты пропускания каждого из светофильтров комбинации, определяемые по формуле (3).

2. Параметры цветности светофильтров

Параметры цветности прозрачного объекта (в данной лабораторной работе - светофильтра) задаются тремя числами, каждое из которых характеризует коэффициент пропускания объекта, измеренный с применением стандартного источника света (А, В, С или D65) и одного из светофильтров, воспроизводящих относительную спектральную чувствительность глаза наблюдателя. Относительное спектральное распределение энергии для источников А, С, и D65 по-

казано на рис. 2, относительная спектральная чувствительность глаза наблюдателя - на рис. 3.

Расчет нормированных координат цвета производится по формулам:

$$\begin{aligned} X &= k \sum S_{\lambda} X_{\lambda} T_{\lambda} \\ Y &= k \sum S_{\lambda} Y_{\lambda} T_{\lambda} \\ Z &= k \sum S_{\lambda} Z_{\lambda} T_{\lambda} \end{aligned} \quad (7)$$

где S - относительное распределение энергии в спектре стандартного излучателя; X_{λ} Y_{λ} Z_{λ} - относительная спектральная чувствительность глаза наблюдателя;

k - нормирующий коэффициент, который выбирается так, чтобы

$$k=100/(\sum S_{\lambda} Y_{\lambda}) \quad (8)$$

Произведения $S_{\lambda} X_{\lambda}$, $S_{\lambda} Y_{\lambda}$, $S_{\lambda} Z_{\lambda}$ определяются выбранным излучателем и наблюдателем и для данного стандартного излучателя являются константами, которые называются кривыми сложения.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для проведения лабораторной работы представляет собой спектрометр, сопряженный с персональным компьютером и комплект цветных стекол (светофильтров), предназначенных для измерений.

В состав спектрометра входят оптическая система, включающая в себя осветитель и полихроматор, связанные волоконным световодом, электронную систему регистрации, сбора и обработки данных, а также программное обеспечение.

Спектрометр обеспечивает измерение спектров коэффициента пропускания цветных стекол в диапазоне длин волн 380 - 760 нм с погрешностью не хуже 2%. Оптическая система спектрометра схематично изображена на (рис.4). В осветителе использована лампа накаливания с криптоновым наполнением 4.8 В, 0.75 А, что позволяет повысить рабочую температуру нити накала и таким образом увеличить ее светоотдачу. Измеряемый образец цветного стекла устанавливается в «параллельном» световом пучке, формируемом линзами 1 и 2. Оптический фильтр из цветного стекла СС-6 служит для выравнивания распределения сигнала в пределах регистрируемого спектра.

Полихроматор выполнен на основе простой вогнутой дифракционной решетки с постоянной 600 штр/мм и радиусом 62.5 мм, так что спектр формируется на круге Роуланда диаметром 125 мм. Регистрация спектра производится линейкой ПЗС (SONY1LX511), линейный размер регистрируемого спектра составляет 14mmx2048PIX=28.672mm. Выходной сигнал с фотоприемников ПЗС линейки обрабатывается электронной системой сбора и обработки данных. нала в пределах регистрируемого спектра. Программное обеспечение позволяет по-

лучать и выводить данные измерений коэффициента пропускания в виде графиков и таблиц, а также осуществлять хранение результатов измерений.

Работа с установкой и программой

Подробная инструкция для работы с установкой и компьютерной программой, обеспечивающей функционирование установки, находится на рабочем месте. Запускаемый модуль называется ПРОЕКТ.EXE. Кроме того, в компьютере имеется большая справочная библиотека и ряд вспомогательных программ для MATLAB.

Выполняемые задачи.

Задача №1. Проверка калибровки спектрометра.

1. Измерить на спектре пропускания стекла ПС 8 или ЗС 7 (по указанию преподавателя).

2. Найти по каталогу цветного стекла длины волн, соответствующие минимумам и максимумам пропускания.

3. Используя MATLAB, построить график зависимости длин волн максимумов и минимумов пропускания, измеренных на спектрометре, от тех же величин, найденных из каталога.

4. Используя TOOLS BASIC FITTING MATLAB, определить погрешность калибровки спектрометра по длинам волн.

Задача №2. Проверка линейности шкалы пропускания спектрометра.

1. Измерить на спектрометре спектры пропускания 3-4 НС.

2. Используя MATLAB, данные каталога цветного стекла и формулы (1)-(3), построить расчётные и экспериментальные спектральные характеристики для выбранных светофильтров.

3. Используя MATLAB, по расчётным и экспериментальным спектральным характеристикам найти для 3-х длин волн и построить графические зависимости коэффициента пропускания, измеренные и найденные по каталогу.

4. Используя TOOLS BASIC FITTING MATLAB, определить погрешность шкалы пропускания спектрометра.

Задача №3. Проверка воспроизводимости показаний спектрометра по шкале пропускания.

1. Измерить на спектрометре 3-4 раза спектры пропускания одного и того же СС, производя каждый раз установку уровней 0 и 100 %.

2. Используя MATLAB, данные каталога цветного стекла и формулы (1)-(3), построить расчётные и экспериментальные спектральные характеристики для выбранного светофильтра.

3. Рассчитать погрешность каждого измерения по отношению к среднему среди измеренных значению и результатам расчёта.

Задача №4. Измерение расчёт спектральной характеристики одиночного светофильтра.

1. Измерить на спектрометре поочерёдно спектры пропускания 2-х светофильтров.

2. Используя MATLAB, данные каталога цветного стекла и формулы (1) - (3), построить расчётные и экспериментальные спектральные характеристики для выбранного светофильтра.

3. Используя MATLAB, рассчитать по длинам волн величины расхождения расчётных и экспериментальных данных, построить графики полученных расхождений.

Задача №5. Измерение и расчёт спектральной характеристики комбинации из 2-х светофильтров.

1. Измерить на спектрометре поочерёдно спектры пропускания 2-х светофильтров и их комбинацию.

2. Используя MATLAB, данные каталога цветного стекла и формулы (1)-(3), (6), построить расчётные и экспериментальные спектральные характеристики для выбранных светофильтров.

3. Используя MATLAB, рассчитать по длинам волн величины расхождения расчётных и экспериментальных данных, построить графики полученных расхождений.

4. Определить положение максимума по длине волны, полуширину полосы пропускания и максимум коэффициента пропускания.

Задача №6. Определение параметров цветности светофильтров.

1. Измерить на спектрометре поочерёдно спектры пропускания 2-3-х светофильтров.

2. Используя MATLAB, данные каталога цветного стекла и формулы (1)-(3), (7), данные по кривым сложения для стандартного источника света, построить расчётные и экспериментальные спектральные характеристики для выбранных светофильтров и определить параметры X, Y, Z.

3. Сравнить полученные результаты с данными, выводимыми в PROJECT2 и приведёнными в каталоге оптического стекла.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные отличия в спектральных распределениях энергии стандартных излучателей типа A, B, C, D65.

2. Опишите оптическую систему полихроматора с вогнутой дифракционной решеткой.

3. Радиус кривизны решетки составляет $R = 62,5$ мм; какой диаметр имеет круг Роуланда?

4. Рассчитайте размер хорды круга Роуланда для вогнутой дифракционной решетки радиусом $R = 40$ мм с постоянной 600 шт/мм при $\lambda = 400 \div 750$ нм.

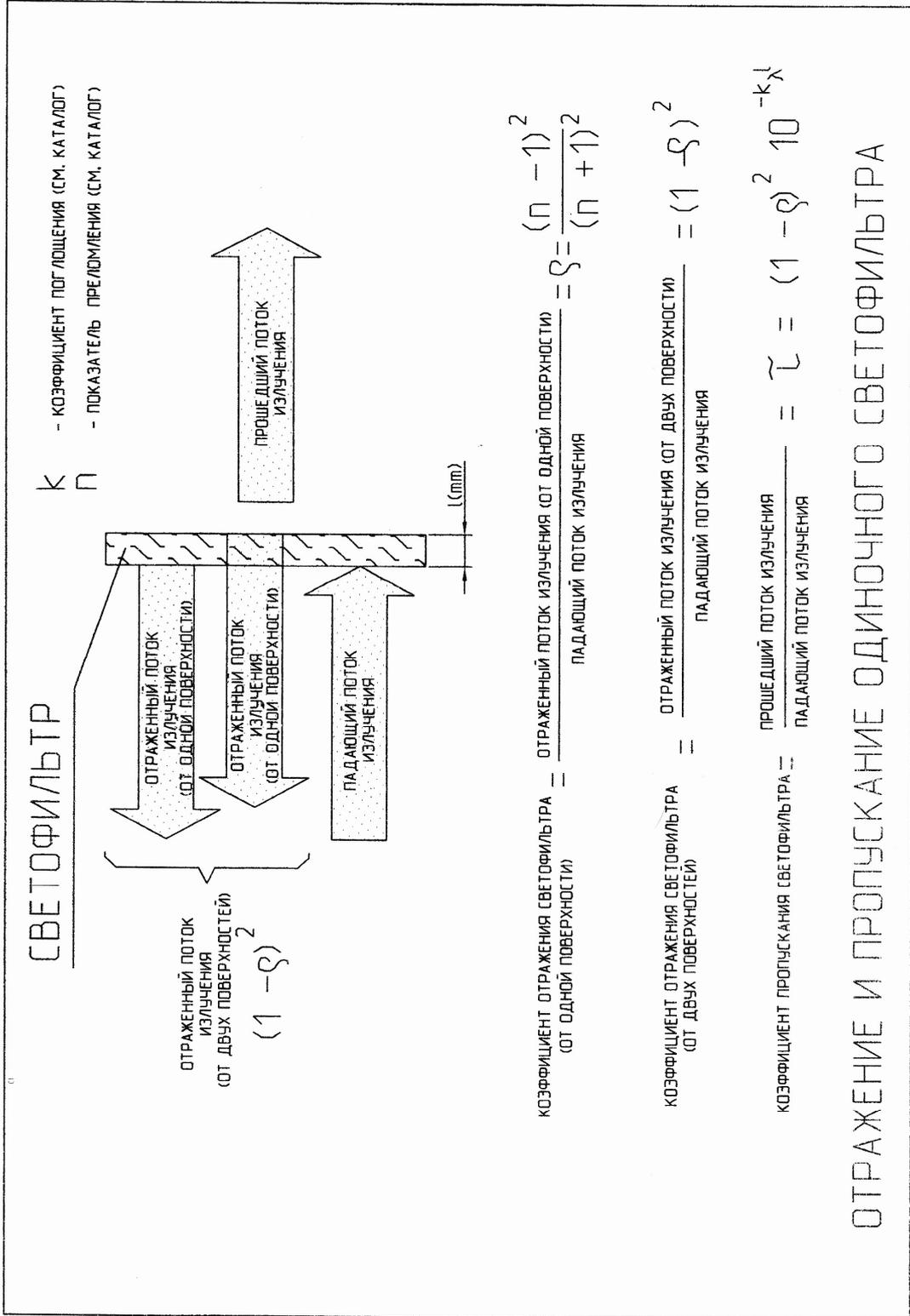


Рис. 1. Спектральные характеристики стекол

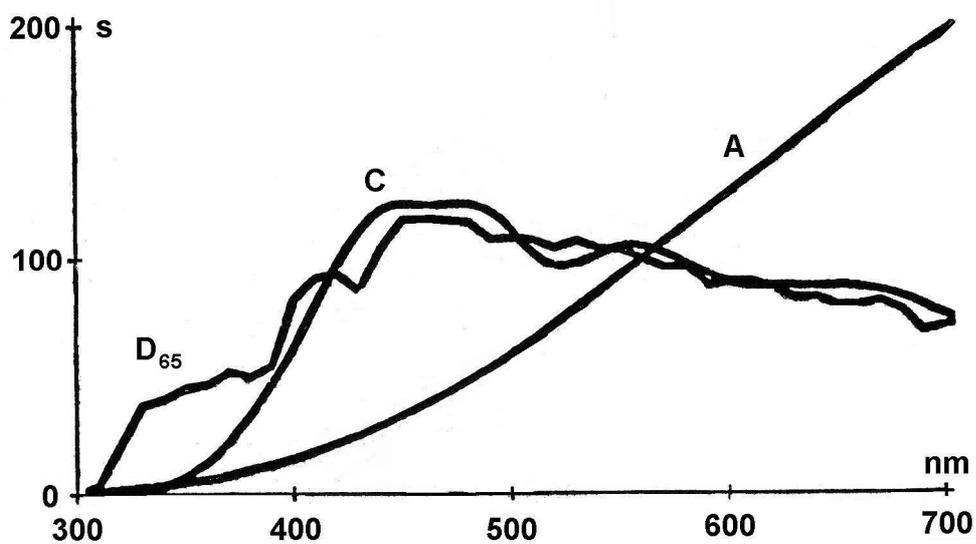


Рис. 2. Относительное спектральное распределение энергии для стандартных источников света.

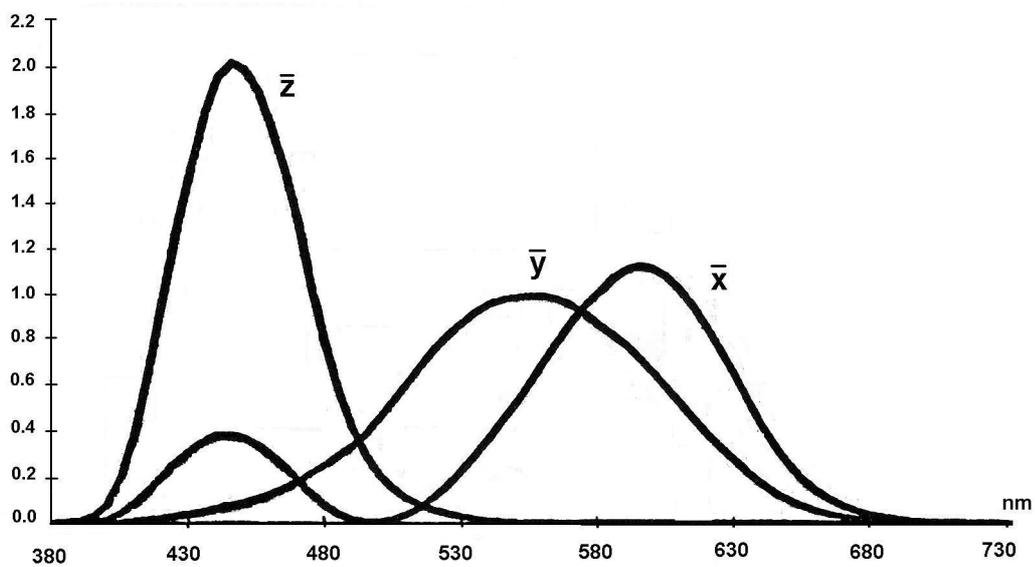


Рис. 3. Относительная спектральная чувствительность глаза.

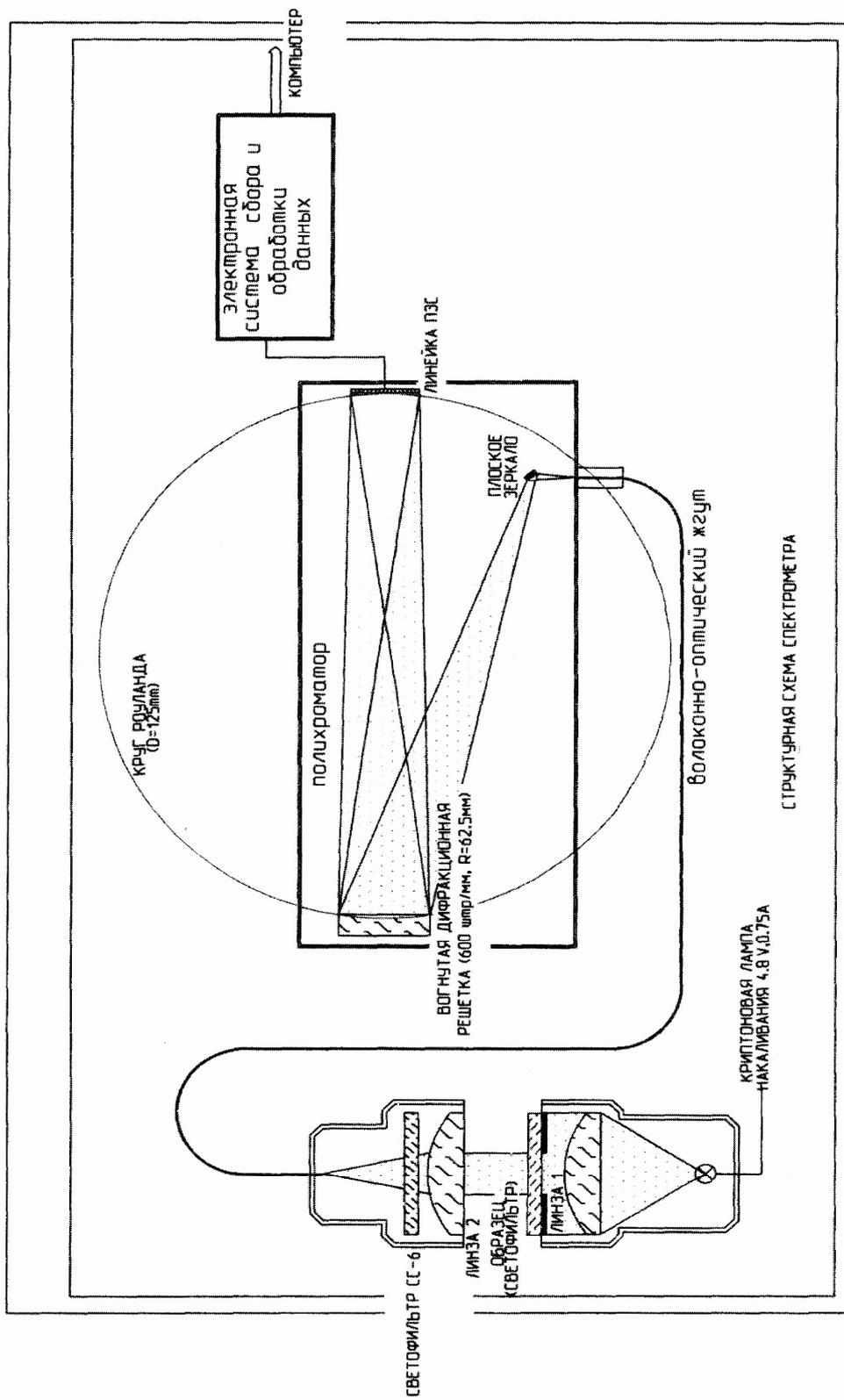


Рис. 4. Структурная схема спектрометра.

Литература

1. Гуревич М. М., Цвет и его измерение, М. - Л. 1950.
2. Кривошеев М. И., Кустарев А. К., Световые измерения в телевидении, М.,1973.
3. Ньюберг Н.Д., Измерение цвета и цветовые стандарты, М. 1933.
4. Каталог цветного стекла. – Л.: Машиностроение», 1967.
5. Джадд Д., Вышецки Г., Цвет в науке и технике. – М.: Мир, 1978, 592с.
6. Справочная книга по светотехнике. Под ред. Ю.Б.Айзенберга, 3 - изд. – М.: «Знак», 2006, 972с.
7. Гуторов М. М., Основы светотехники и источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

Содержание

• Введение.....	3
• Лабораторная работа №1.	
Измерение профиля показателя преломления волоконных световодов.....	5
• Лабораторная работа № 2.	
Дисперсия показателя преломления кристаллов.....	11
• Лабораторная работа № 3.	
Измерение оптических параметров тонких плёнок методом интерферометрии переменного угла падения.....	21
• Лабораторная работа № 4.	
Исследование интерференционного метода измерения линейных перемещений.....	26
• Лабораторная работа № 5.	
Измерение спектров излучения He - Ne и полупроводникового лазеров с помощью сканирующего интерферометра Фабри - Перо.....	31
• Лабораторная работа № 6.	
RGB – параметры галогенной лампы накаливания.....	36
• Лабораторная работа № 7.	
Измерение поляризационных параметров излучения и оптической разности фаз.....	44
• Лабораторная работа № 8.	
Измерение спектров и кинетики флуоресценции на спектроанализаторе «ФЛЮОРАТ-02».....	52
• Лабораторная работа № 9.	
Исследование спектров излучения дуговых газоразрядных ламп.....	62
• Лабораторная работа № 10.	
Спектры пропускания цветных стекол и параметры их цветности.....	70



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра Твердотельной оптоэлектроники (ТТОЭ) организована в 1988 году, в период активного развития оптоэлектроники как компонентной базы высокоскоростных систем передачи и обработки информации, и ее выделения в самостоятельную область науки техники и производства.

Специалисты кафедры обладают большим опытом научной, преподавательской и производственной деятельности, кафедра располагает оснащенными учебными и научными лабораториями.

Выпускники кафедры ТТОЭ получают специальную подготовку по прикладной и физической оптике, физике полупроводников, полупроводниковой оптической технике, оптико-физическим измерениям, лазерной технике, волоконной и интегральной оптике, компьютерной технике и технологиям, оптоэлектронным средствам массовой информации, экологии, иностранному языку, основам менеджмента и другим дисциплинам.

Сергей Андреевич Алексеев
Александр Леонидович Дмитриев
Юрий Тихонович Нагибин
Евгений Михайлович Никущенко
Антон Сергеевич Супрун
Владимир Анатольевич Трофимов
Ашурбек Туркбоев
Виктор Трофимович Прокопенко
Андрей Дмитриевич Яськов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО
Зав. РИО
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Подписано к печати
Заказ №
Тираж 100
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова