

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Казанский национальный исследовательский
технологический университет

Е. В. Яковлева

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ, ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Практикум

ISBN 978-5-7882-3568-4

© Яковлева Е. В., 2024

© Казанский национальный исследовательский
технологический университет, 2024

УДК 535.3(076)
ББК 22.34я7
Я47

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Казанского национального исследовательского технологического университета*

Рецензенты:
канд. пед. наук, доц. И. И. Еремина
канд. физ.-мат. наук, доц. Ф. М. Сабирова

Яковлева Е. В.

Я47 Геометрическая, волновая и квантовая оптика : практикум /
Е. В. Яковлева; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол.
ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2024.

ISBN 978-5-7882-3568-4

Приведены основополагающие теоретические положения, физические законы и термины, описание экспериментальных установок, необходимые для выполнения лабораторных работ по геометрической, волновой и квантовой оптике. Предложены конструктивные решения по методике проведения работ.

Предназначен для студентов первого курса технических вузов всех форм обучения, изучающих дисциплину «Физика».

Подготовлен на кафедре информационных систем и технологий Нижнекамского химико-технологического института.

УДК 535.3(076)
ББК 22.34я7

Текстовое электронное издание

Минимальные системные требования:

- Windows: процессор Intel 1,3 Гц или аналогичный;
Microsoft Windows XP Service Pack 2
- MacOS: процессор PowerPC G4 или Intel MacOS X 10.5
128 МБ оперативной памяти
- Linux: 32-разрядный процессор Intel Pentium или аналогичный
SUSE Linux Enterprise Desktop10 или Ubuntu 7.10; GNOME
или KDE Desktop Environment

Елена Владимировна Яковлева

Редактор Е. И. Шевченко

Компьютерная верстка и макет – А. К. Рахманкулова

Подписано к использованию 26.12.2024

Объем издания 1,61 Мб Заказ 90/24

Издательство Казанского национального исследовательского
технологического университета

420015, Казань, ул. К. Маркса, 68

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И МЕТОДОВ ИХ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	6
1.1. Общие методические рекомендации по выполнению лабораторных работ	8
1.2. Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ по оптике и квантовой физике	9
1.3. Графическая обработка результатов измерений	11
1.4. Международная система единиц	12
2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА	14
Лабораторная работа 311. Экспериментальное определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа	14
Лабораторная работа 312. Экспериментальное определение показателя преломления жидкостей рефрактометром Аббе	25
3. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА	36
Лабораторная работа 324. Изучение принципа работы оптического квантового генератора и определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки	36
4. КВАНТОВАЯ ОПТИКА	48
Лабораторная работа 332. Исследование основных характеристик фотоэлементов	48
Лабораторная работа 335. Изучение оптического пирометра и экспериментальное определение постоянной Стефана–Больцмана	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	73
ПРИЛОЖЕНИЯ	74

ВВЕДЕНИЕ

Задачей высшей школы является формирование научного мировоззрения студентов. Этому способствуют все без исключения дисциплины, изучаемые в вузах, но ведущая роль принадлежит естественным и общетехническим дисциплинам, к числу которых относится и физика, значение которой в становлении современного инженера чрезвычайно велика.

Одним из обязательных компонентов обучения физике в технических вузах является овладение методикой выполнения лабораторных работ по оптике. Практическое применение аналитических методов при выполнении лабораторных работ служит предпосылкой для подготовки конкурентоспособных специалистов в данной области физики.

Данный практикум написан на основании многолетнего опыта проведения лабораторных занятий коллективом преподавателей, инженеров и лаборантов кафедры физики и цикла физико-математических дисциплин Нижнекамского химико-технологического института ФГБОУ ВО «КНИТУ» и разрабатывался автором с учетом того, что основу инженерного образования должна составлять углубленная физико-математическая подготовка студентов.

В ходе выполнения данных работ студенты получают навыки работы с микроскопом, рефрактометром, оптическим квантовым генератором (лазером), электронной физической аппаратурой, что позволяет им на практике ознакомиться с измерительными средствами физической лаборатории. При этом предполагается, что обучающиеся уже умеют пользоваться простейшими физическими измерительными приборами (штангенциркулем, микрометром, амперметром, вольтметром и др.), поэтому в описании работ не приводится инструкция по их использованию. Результаты многолетнего опыта свидетельствуют, что при наличии подробного и грамотного описания лабораторной работы, а также помощи преподавателя и опытного инженера (лаборанта) студенты успешно осваивают методики проведения эксперимента и обработки полученных данных.

Данный практикум содержит пять лабораторных работ по таким разделам физики, как «Геометрическая оптика», «Волновая оптика» и «Квантовая оптика». Структура издания определяется программой курса, что дает возможность преподавателям варьировать их подбор в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Физика» и рядом других факторов. Например, некоторые из указанных работ имеют

альтернативный характер, поэтому порядок их выполнения определяется преподавателем в соответствии с формой обучения и направлением подготовки бакалавров. Это позволяет использовать их для групповой, индивидуальной и самостоятельной работы студентов.

Описание каждой лабораторной работы включает в себя:

- четко сформулированную цель выполнения работы;
- теоретическое введение, в котором указано, какой учебный материал лежит в основе данной работы (с учетом специфики данного вуза);
- перечень предлагаемого оборудования, необходимых приборов и принадлежностей;
- описание экспериментальной установки, а также приемов измерения физических величин и особенностей настройки приборов для проведения опыта;
- алгоритм действий при измерении и обработке результатов экспериментов для достижения цели выполнения работы;
- контрольные вопросы, соответствующие содержанию и структуре темы работы, которые обычно делятся на две части:

а) обязательную;

б) рекомендуемую (она отмечена звездочкой и предназначена для наиболее подготовленных студентов, стремящихся увеличить свои знания).

Названия и обозначения всех единиц, используемых автором, соответствуют стандарту ГОСТ 8.417-2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин».

В приложениях к данной работе содержатся таблицы физических величин, а также примеры расчетов для лабораторных работ.

Наличие кратких теоретических сведений обусловлено стремлением повысить профессиональную направленность лабораторных работ, хотя, конечно, они не смогут в полной мере заменить соответствующих разделов лекционного курса.

Автор выражает искреннюю благодарность доктору технических наук Д. Б. Вафину, а также всем преподавателям и сотрудникам кафедры физики и цикла физико-математических дисциплин Нижнекамского химико-технологического института ФГБОУ ВО «КНИТУ», способствовавшим подготовке и проведению лабораторных занятий по данной тематике.

1. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И МЕТОДОВ ИХ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В данной работе рассматриваются физические явления и эксперименты, изучение которых позволяет сформировать современную физическую картину мира. Широкий оптический диапазон изучаемых явлений, как уже отмечалось, играет важную роль в формировании мировоззрения будущего инженера. Проведение студентами экспериментальных исследований в физической лаборатории способствует сознательному усвоению ими соответствующего теоретического материала, развитию логического мышления, а также формированию важнейших практических умений и навыков, необходимых для дальнейшего успешного освоения методов оценки достоверности гипотез исследования.

В рамках дисциплины «Общая физика» рассматриваются такие разделы, как «Геометрическая оптика», «Волновая оптика» и «Квантовая оптика», посвященные исследованию оптических явлений и методам их теоретического анализа. Геометрическая оптика рассматривается как предельный случай волновой, когда длина световой волны стремится к нулю. Явления интерференции, дифракции, дисперсии и поляризации света объясняются в рамках волновой оптики, базирующейся на принципах, предложенных Христианом Гюйгенсом и Огюстеном Жаном Френелем, а также на электромагнитной теории поля, разработанной Джеймсом Клерком Максвеллом, с учетом концепции когерентности световых волн. Квантовые свойства света изучаются на основе идей, сформулированных Максом Планком и Альбертом Эйнштейном.

Оптический спектр электромагнитного излучения охватывает ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный диапазоны. Видимое излучение, которое воспринимается человеческим глазом как свет, состоит из электромагнитных волн. Длина волны оптического диапазона варьируется в зависимости от специфических характеристик фоточувствительности сетчатки глаза и охватывает спектр приблизительно от 380 (фиолетовый) до 750 (красный) нм.

Разделение электромагнитных волн на виды в зависимости от длины волны приведено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Распределение видов излучения в зависимости от длины волны

Вид излучения	Границы длин волн, λ , м
Гамма-лучи	10^{-11} – 10^{-13}
Рентгеновские лучи	10^{-8} – 10^{-12}
Световые волны: ультрафиолетовые	$4 \cdot 10^{-7}$ – $2 \cdot 10^{-9}$
видимые лучи	$7,6 \cdot 10^{-7}$ – $4 \cdot 10^{-7}$
инфракрасные лучи	$3 \cdot 10^{-5}$ – $7,6 \cdot 10^{-7}$
Радиоволны	$3 \cdot 10^3$ – 10^{-4}

Когда температура больше абсолютного нуля, все материальные тела излучают электромагнитные волны. Однако самым интенсивным на Земле является излучение, исходящее от Солнца, температура поверхности которого равна примерно 6000 К (спектр его излучения приведен на рис. 1.1).

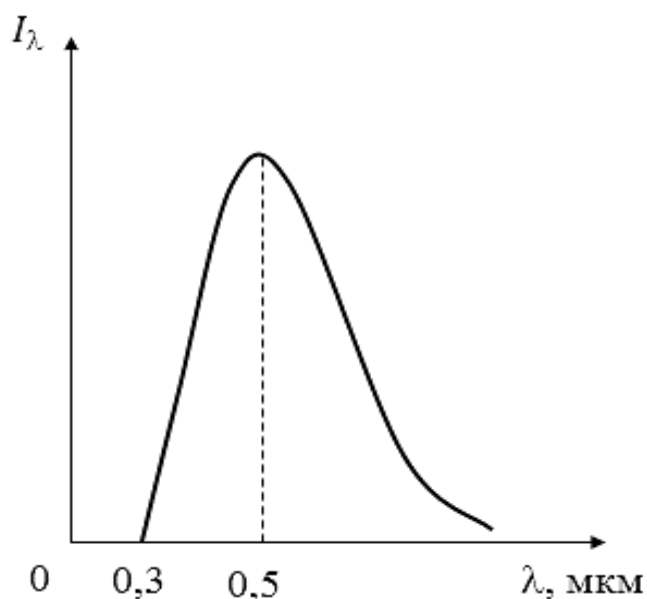


Рис. 1.1. Зависимость интенсивности излучения от длины волны

Анализ спектрального распределения солнечной радиации показывает, что пик интенсивности излучения соответствует длине волны $\lambda \approx 0,5$ мкм. Проходя через атмосферу Земли, солнечное излучение частично поглощается и рассеивается в ее слоях. Поэтому солнечный спектр излучения может изменяться в зависимости от запыленности воздуха, толщины его прохождения и прочих факторов. В результате солнечный спектр обрывается у поверхности Земли на длине волны

$\lambda = 0,3$ мкм. Поверхности Земли практически не достигают более короткие ультрафиолетовые волны, ослабление которых зависит главным образом от высоты Солнца над горизонтом (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Доля солнечного излучения, достигающего поверхности Земли

Цвет	При положении Солнца	
	в зените	на закате или на восходе
Красный ($\lambda = 0,65$ мкм)	0,96	0,21
Зеленый ($\lambda = 0,52$ мкм)	0,9	0,024
Фиолетовый ($\lambda = 0,41$ мкм)	0,76	0,000065

Содержащиеся в таблице данные свидетельствуют, что коротковолновое излучение сильнее ослабляется при прохождении через атмосферу Земли. Этим объясняется не только голубой цвет неба днем, но и покраснение Солнца при восходе и на закате.

Зрительное восприятие предметов происходит за счет отраженного света. Поэтому наилучшим для зрения является интервал длины волны, на которую приходится максимальная интенсивность излучения, т. е. $\lambda \approx 0,5$ мкм. Эти параметры соответствуют видимому диапазону электромагнитного спектра, в рамках которого в процессе эволюционного развития сформировалась способность человеческого организма к зрению.

1.1. Общие методические рекомендации по выполнению лабораторных работ

Прежде чем приступить к выполнению каждой из лабораторных работ, следует:

1. Определить цели проведения лабораторного исследования. Внимательно ознакомиться с соответствующими теоретическими сведениями и составить план выполнения работы.

2. Подготовить ответы на контрольные вопросы и проверить свою готовность к выполнению данной работы путем самоконтроля при прохождении тестирования в системе moodle.nchti.ru. Если некоторые из контрольных вопросов будут представлять определенные трудности,

следует еще раз прочитать теоретическое введение к лабораторной работе, обратиться к лекционному материалу или учебнику по физике. После этого нужно пройти повторное тестирование.

3. Проанализировать методологическое руководство к проведению лабораторного исследования. Оценить степень доступности и ясности изложенных методик осуществления различных экспериментальных процедур. В затруднительных случаях необходимо обратиться за консультацией к преподавателю либо его ассистентам (инженеру или лаборанту).

4. Записать в тетради или на отдельных листах свою фамилию, имя, номер группы, дату проведения, номер работы и ее название, цель работы, перечень приборов и принадлежностей, ответы на контрольные вопросы, после чего кратко и схематично описать ход эксперимента.

5. Под руководством инженера или лаборанта приступить к выполнению работы.

6. По завершении лабораторных исследований представить полученные данные в табличной форме, а в случае необходимости – построить графики и диаграммы для визуализации результатов. Затем провести оценку погрешностей измерений, с учетом которых и записать итоговый результат.

7. На основании результатов, полученных в ходе проведенных опытов, сформулировать и записать выводы.

8. Если результаты измерений записаны неправильно или не удовлетворяют требованиям преподавателя, их следует повторить и занести в новую таблицу того же бланка отчета по лабораторной работе. Данный отчет с результатами контрольного расчета показывается преподавателю.

9. Все лабораторные работы должны быть сданы в установленные сроки.

1.2. Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ по оптике и квантовой физике

Перед выполнением лабораторной работы необходимо внимательно ознакомиться с ее описанием и получить разрешение на проведение эксперимента у инженера или лаборанта.

Во время выполнения экспериментальных исследований требуется поддерживать высокую степень сосредоточенности и неукоснительно следовать инструкциям преподавателей, инженера и лаборанта.

Приборы, материалы и оборудование следует размещать таким образом, чтобы исключить их падение или опрокидывание.

Следует исключить возникновение критических нагрузок на измерительные устройства.

Необходимо контролировать целостность крепежных элементов как в самих приборах, так и в сопутствующих приспособлениях.

Для обеспечения безопасности и надежности электропроводки необходимо использовать электрические кабели, оснащенные высокопрочной изоляционной оболочкой, исключающей наличие видимых дефектов. Следует избегать пересечения проводников во избежание потенциальных коротких замыканий.

Все используемые проводники должны обладать качественной изоляцией, а их концевые участки необходимо тщательно зачистить, потому что окислительные процессы, происходящие на поверхности металлических элементов, могут привести к ухудшению качества электрического соединения.

Электрическую цепь нужно собирать, начиная от источника тока, который подключается в последнюю очередь.

Нельзя трогать находящиеся под напряжением элементы, лишенные изоляции, производить пересоединения в цепях до отключения источника питания, а также прикасаться к корпусам стационарного электрооборудования.

Необходимо использовать только инструменты, снабженные изолирующими ручками.

Если ток постоянный и нуль шкалы измерительного прибора находится не на середине ее, а слева, то полюс источника нужно соединить с полюсом прибора, который обычно находится на правой стороне крышки.

Реостаты, подключенные к цепи, изначально должны быть настроены на максимальное значение сопротивления, тогда как потенциометры следует установить на нулевое значение подаваемого на контур напряжения.

При сборке цепи все ключи и переключатели следует разомкнуть. Собранныю цепь разрешается включать только после ее проверки и разрешения лаборанта или инженера. Ток в цепи замыкается только на время отсчета и снятия показаний приборов.

Категорически запрещается: производить переключение схем, находящихся под напряжением; оставлять схему, находящуюся под напряжением, без наблюдения.

По окончании работы отключить источник электропитания, затем разобрать электрическую цепь.

Запрещается уходить с рабочего места без разрешения лаборанта или инженера.

При обнаружении неисправности в электрических устройствах, находящихся под напряжением, незамедлительно отключить источник питания и уведомить об этом лаборанта, инженера и преподавателя.

1.3. Графическая обработка результатов измерений

При обработке результатов измерений иногда используется графический метод. Он бывает необходим, когда требуется проследить зависимость некоторой физической величины от другой, например, функция вида $y = f(x)$. С этой целью производятся наблюдения искомой величины y для различных значений переменной величины x . Для наглядности зависимость величины y от x изображается графически.

Рекомендуется использовать прямоугольную систему координат. В произвольном масштабе откладывают значения независимых аргументов x (по оси абсцисс) и y (по оси ординат). Полученные точки на плоскости соединяют между собой плавной кривой. В случае невозможности построения такой линии можно предположить наличие ошибок или систематических отклонений в данных наблюдений. Если выбросы незначительные, то линия на графике проводится между точками, иначе следует произвести наблюдения повторно.

Пользуясь полученной кривой, в пределах произведенных наблюдений можно также находить значение величины y для таких значений x , которые непосредственно не наблюдаются. Для этого из любой точки на оси абсцисс до пересечения с кривой проводится ордината, длина которой будет представлять значение величины y для соответствующего значения величины x .

1.4. Международная система единиц

Все вычисления физических величин необходимо проводить в Международной системе единиц (СИ). Основными единицами в этой системе являются:

- 1) длина – метр (м);
- 2) масса – килограмм (кг);
- 3) время – секунда (с);
- 4) сила электрического тока – ампер (А);
- 5) термодинамическая температура – градус Кельвина (К);
- 6) количество вещества – моль (моль);
- 7) сила света – кандела (кд).

Исторически метр равнялся расстоянию, которое проходит секундный маятник, за одно полное колебание между двумя крайними положениями. С развитием науки под *метром* стали понимать длину пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299\,792\,458$ секунды.

Согласно действующему определению, величина *килограмма* устанавливается фиксацией численного значения постоянной Планка (h), равной в точности $6,62607015 \cdot 10^{-34}$, когда она выражена единицей Дж·с, которая эквивалентна $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Величина *секунды* равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия $^{133}_{55}\text{Cs}$.

Величина *ампера* устанавливается фиксацией численного значения элементарного заряда e равного $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$, когда он выражен в кулонах.

Величина *кельвина* устанавливается через численное значение постоянной Больцмана: $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. До этого (в 1967–2019 гг.) кельвин определялся как $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды. В температурной шкале Кельвина используется такой же интервал между градусами, как и в шкале Цельсия. Однако нулевая отметка по шкале Кельвина соответствует температуре абсолютного нуля, тогда как в шкале Цельсия она обозначает температуру таяния льда. Согласно современному определению, ноль шкалы Цельсия установлен таким образом, что температура тройной точки воды равна $0,01\,^{\circ}\text{C}$. В итоге шкалы Цельсия и Кельвина сдвинуты на 273,15. При

переводе температуры из шкалы Кельвина в шкалу Цельсия целесообразно выполнить следующее действие:

$$t [^{\circ}\text{C}] = T [\text{K}] - 273,15 \text{ K}.$$

Моль ранее (1971–2019 гг.) определялся как количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде $^{12}_6\text{C}$ массой 12 г. В настоящее время принято следующее определение: один моль содержит ровно $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ элементов. Это число представляет собой фиксированное значение постоянной Авогадро (N_A), выраженной в моль^{-1} , и называется числом Авогадро.

Кандела является величиной силы света, которая устанавливается фиксацией численного значения световой эффективности монохроматического излучения частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении равна $1/683 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Таким образом, система СИ содержит семь основных единиц. Однако в разных разделах физики используются лишь некоторые из этих величин.

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Лабораторная работа 311

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА

Цель работы: применение законов отражения и преломления света на границе раздела двух прозрачных сред к определению показателя преломления стекла.

Приборы и принадлежности: промышленный оптический микроскоп с осветителем, микрометр, плоская стеклянная пластинка.

Краткие теоретические сведения

Большинство простейших оптических явлений, таких как возникновение теней от непрозрачных объектов или получение изображений в оптических приборах и телескопических устройствах, можно объяснить в рамках геометрической оптики. Этот раздел оптики рассматривает прохождение световых лучей через различные среды. *Световым лучом* называют достаточно тонкий, узкий, приблизительно параллельный пучок световых волн, распространяющихся в направлении переноса световой энергии. В пределах геометрической оптики волновыми свойствами света пренебрегают, а световой луч изображают тонкой линией со стрелкой, указывающей его направление.

При попадании светового луча на границу раздела двух сред он может отражаться, преломляться от этой среды или поглощаться ею. В задачах геометрической оптики поглощение световых лучей и переход световой энергии во внутреннюю (тепловую), как правило, не рассматриваются.

При попадании светового луча на границу раздела двух прозрачных сред происходит его разделение на два луча: отраженный и преломленный. Экспериментально установлены четыре закона геометрической оптики: закон прямолинейного распространения света в однородной среде; закон независимого хода световых пучков; законы отражения и преломления света на границе двух сред.

Закон прямолинейного распространения света: в оптически однородной прозрачной среде световые волны распространяются по прямым линиям. Данный феномен был описан еще во времена античности в трудах Евклида (ок. 300 г. до н. э.). Подтверждением данного закона служит образование четких теневых контуров при освещении непрозрачных объектов точечными источниками излучения, размеры которых значительно меньше размеров объекта и расстояния до него. Доказательством также является получение изображения светящегося предмета в камере с небольшим отверстием.

Закон прямолинейного распространения световых волн нарушается при дифракции света, а также при прохождении света через малые отверстия. Причем с уменьшением размера отверстия отклонение от прямолинейного распространения увеличивается больше.

Закон независимого хода световых пучков: световые лучи в среде распространяются независимо друг от друга, а отдельные световые лучи при пересечении не взаимодействуют. Данный закон нарушается при интерференции света.

Далее представлены понятия, которыми руководствуются при рассмотрении законов зеркального отражения и преломления света.

Плоскость, содержащая падающий луч АО и нормаль n , называется *плоскостью падения*. Угол между преломленным лучом ОС и продолжением нормали n называется *углом преломления* γ . Среда, в которой лежат падающий и отраженный лучи, условно называется первой средой, а та, в которой лежит преломленный луч, – второй средой (рис. 2.1).

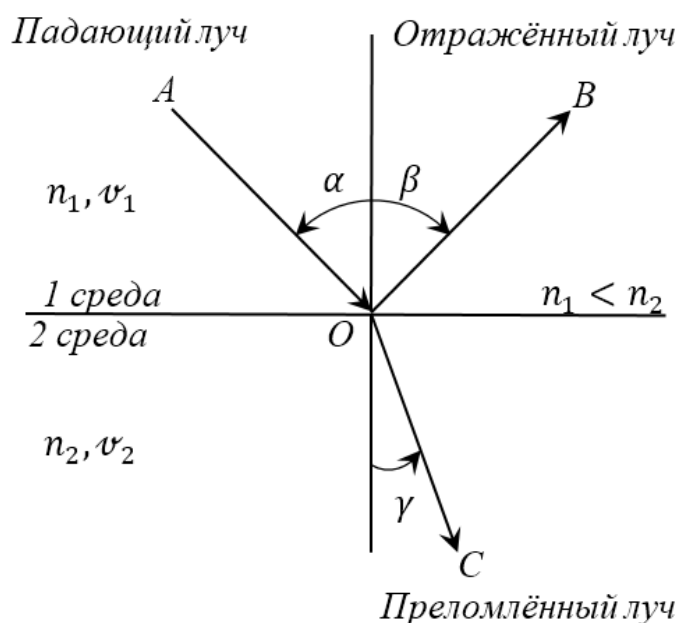


Рис. 2.1. Ход светового луча на границе раздела двух прозрачных сред при $n_1 < n_2$

При распространении света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную угол преломления увеличивается (рис. 2.2).

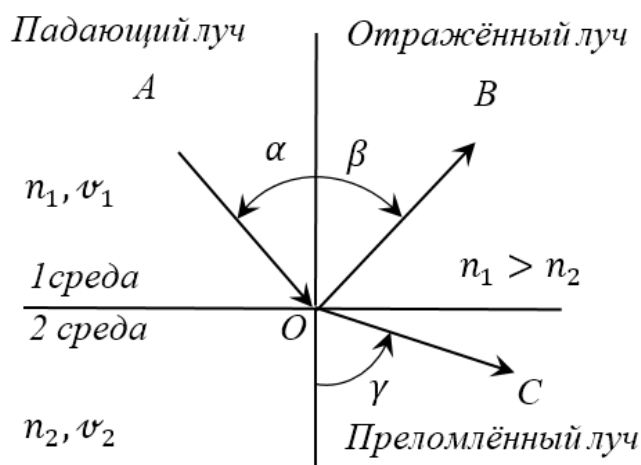


Рис. 2.2. Ход светового луча на границе раздела двух прозрачных сред при $n_1 > n_2$

Направления отраженного и преломленного лучей определяются законами отражения и преломления света:

1. *Закон зеркального отражения*: отраженный и падающий лучи лежат в плоскости падения, при этом угол отражения равен углу падения:

$$\alpha = \beta. \quad (2.1)$$

2. *Закон преломления* был установлен экспериментально голландским математиком Виллебрордом Снеллиусом в 1621 г. Согласно этому закону, преломленный луч лежит в плоскости падения, отношение синуса угла падения к синусу угла преломления не зависит от угла падения и для данной пары веществ есть величина постоянная, не зависящая от угла падения, которая называется относительным показателем преломления второй среды n_{21} относительно первой:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} = \text{const}. \quad (2.2)$$

Относительный показатель преломления веществ равняется отношению скорости распространения света в первой среде (V_1) к скорости распространения во второй среде (V_2):

$$n_{21} = \frac{V_1}{V_2}. \quad (2.3)$$

Абсолютный показатель преломления n данной среды показывает, во сколько раз скорость света C в вакууме больше скорости света V в данной прозрачной среде (веществе). Для всех веществ $V < C$, следовательно, $n > 1$.

Абсолютный показатель преломления вакуума равен единице, т. е. $n = 1$. Коэффициент абсолютного показателя преломления (индекс рефракции) для воздушной среды обычно принимается за единицу с учетом незначительных отклонений, обусловленных изменениями плотности и температуры газа. Абсолютные показатели преломления различных сред можно найти в специальных справочных таблицах.

Таким образом, закон преломления можно представить в следующем виде:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.4)$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления первой и второй среды соответственно.

Описание лабораторной установки

Промышленный микроскоп, который используется в данной лабораторной работе, представляет собой сложный оптический прибор (рис. 2.3).

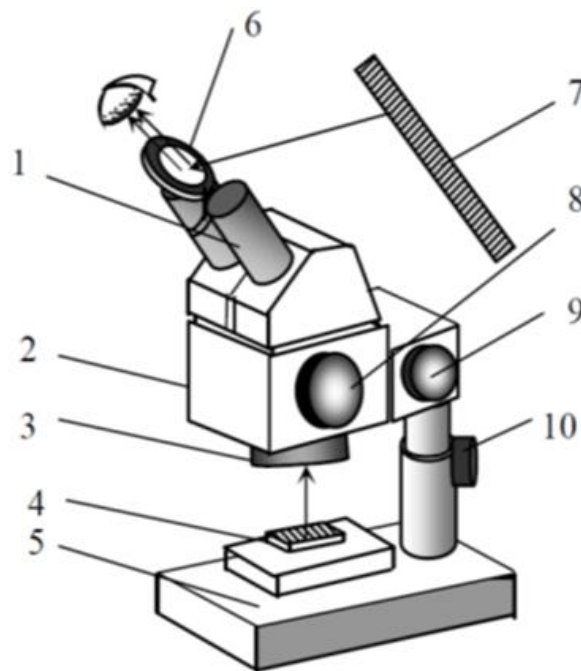


Рис. 2.3. Схема устройства микроскопа: 1 – окуляр (окулярная линза); 2 – тубус (трубка микроскопа); 3 – объектив (объективная линза); 4 – объективный микрометр (шкала с известным масштабом, нанесенная на стеклянную пластину); 5 – предметный столик микроскопа; 6 – зеркало, закрепленное под углом 45° относительно оптической оси одного из окуляров; 7 – линейка; 8 – ручка для смены объективов; 9, 10 – винты для регулировки положения тубуса

Методика измерений

Показатель преломления вещества зависит от длины волны излучения света и оптических свойств среды. Если свет переходит из оптически менее плотной среды и попадает на границу с оптически более плотной средой, где $n_2 > n_1$, например воздух ($n_1 = n_{\text{воздуха}} \approx 1$) или стекло ($n_2 = n_{\text{ст}} = 1,5$), то согласно закону преломления следует, что угол преломления ψ будет меньше угла падения φ , т. е. $\psi < \varphi$. Если наоборот, т. е. луч переходит через границу оптически более плотной среды с оптически менее плотной средой, при этом $n_1 > n_2$, то при этом угол падения φ меньше угла преломления ψ , т. е. $\psi > \varphi$. При рассмотрении предметов через плоскопараллельный слой прозрачного вещества с большим показателем преломления по сравнению с воздухом они кажутся нам расположенными ближе. Предположим, что мы сверху в микроскоп рассматриваем точку O , нанесенную на нижнюю поверхность стеклянной плоскопараллельной пластинки (рис. 2.4).

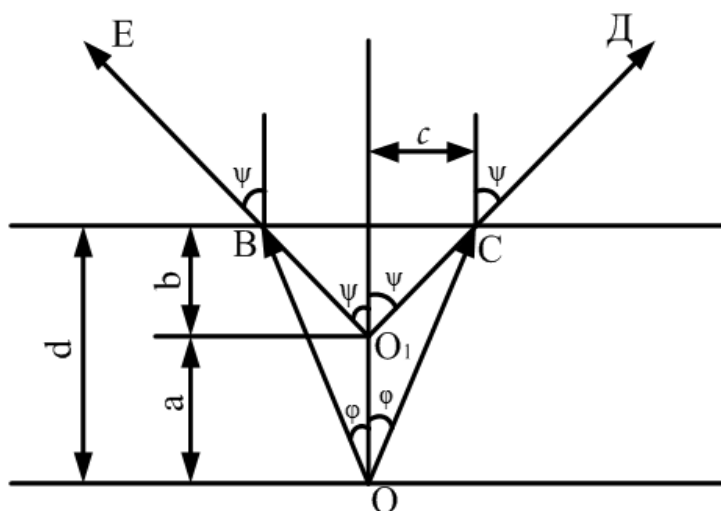


Рис. 2.4. Ход лучей через стеклянную плоскопараллельную пластинку

Из точки O под разными углами выходит множество лучей. Рассмотрим ход лишь двух лучей OB и OC , которые отклонены от нормали к пластинке на одинаковые углы φ . Эти лучи, распространяясь прямолинейно, достигают верхней границы соприкасающейся с воздухом стеклянной пластинки. Преломляясь на верхней границе пластинки, эти лучи пойдут соответственно по направлениям BE и CD под одинаковыми углами ψ . Оптическая система микроскопа собирает лучи, падающие под одинаковыми углами в одну точку фокальной плоскости микроскопа, т. е. фокусирует их. В частности, на пересечении лучей BE и CD в фокальной плоскости будет получено изображение точки O

в виде точки O_1 . При наблюдении сверху кажется, что эти лучи исходят из точки O_1 , являющейся пересечением мнимых продолжений хода лучей BE и $ДС$. Таким образом, точка O_1 является мнимым изображением точки O , она кажется нам расположенной ближе, чем сама точка O , на величину, равную $a = OO_1$.

Из рис. 2.4 следует, что по определению для котангенса угла φ и тангенса угла ψ имеем:

$$ctg \varphi = \frac{d}{c}; \quad tg \psi = \frac{c}{d-a}. \quad (2.5)$$

Перемножая левые и правые части полученных выражений, получим

$$ctg \varphi \cdot tg \psi = \frac{d}{c} \cdot \frac{c}{d-a} = \frac{d}{d-a}. \quad (2.6)$$

Выражая котангенс угла φ и тангенс угла ψ соответственно через синус и косинус соответствующих углов получим

$$\frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} \cdot \frac{\sin \psi}{\cos \psi} = \frac{d}{d-a}. \quad (2.7)$$

С учетом того что показатель преломления воздуха $n_{\text{воздуха}} \approx 1$, по закону преломления света при переходе из стекла в воздух выполняется следующее соотношение:

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = \frac{n_{\text{воздуха}}}{n_{\text{стекла}}} = \frac{1}{n_{\text{стекла}}}. \quad (2.8)$$

Следовательно,

$$\frac{\sin \psi}{\sin \varphi} = n_{\text{стекла}}. \quad (2.9)$$

Тогда получим

$$\frac{\cos \varphi}{\cos \psi} \cdot n_{\text{стекла}} = \frac{d}{d-a}. \quad (2.10)$$

Используя основное тригонометрическое тождество для косинусов углов, равенство (2.10) запишем в следующем виде:

$$\frac{\sqrt{1-\sin^2 \varphi}}{\sqrt{1-\sin^2 \psi}} \cdot n_{\text{стекла}} = \frac{d}{d-a}. \quad (2.11)$$

Принимая во внимание, что в объектив микроскопа попадают лишь лучи, расходящиеся под небольшими углами ψ , и, соответственно, при $\varphi \rightarrow 0$, выражения в левой части под корнем будут стремиться к единице. Поэтому после математических преобразований получим

$$n_{\text{стекла}} = \frac{d}{d-a} = \frac{d}{b}. \quad (2.12)$$

Таким образом, при вертикальном наблюдении сверху действительная толщина стекла d и его кажущаяся толщина b связаны с показателем преломления стекла следующим соотношением:

$$n_{\text{стекла}} = \frac{d}{b}. \quad (2.13)$$

Измерения и обработка результатов

1. В той части, где нанесены штрихи на стеклянной пластинке, измерьте при помощи микрометра действительную ее толщину d . Полученный результат занесите в табл. 2.1.

2. Положите на предметный столик в микроскопе исследуемую стеклянную пластинку таким образом, чтобы штрихи, нанесенные на ее нижней и верхней поверхности, пересекали оптическую ось микроскопа.

3. Перемещая тубус при помощи винта, сфокусируйте микроскоп на нижнюю поверхность таким образом, чтобы штрих на ней был виден четко. Сделайте отсчет перемещения тубуса микроскопа по нанесенной шкале и определите значение $b_{\text{ниж.}}$, мм. Полученное опытом и вычислением значение занесите в табл. 2.1.

4. Перемещая тубус при помощи винта, сфокусируйте микроскоп на верхнюю поверхность таким образом, чтобы штрих на верхней поверхности был виден отчетливо. Сделайте отсчет перемещения тубуса микроскопа по нанесенной шкале и определите значение $b_{\text{верх.}}$, мм. Полученное значение занесите в табл. 2.1.

5. Определите кажущуюся толщину стеклянной пластинки b как разницу отсчетов перемещения тубуса при рассмотрении штрихов на верхней и нижней поверхностях стекла:

$$b = b_{\text{верх.}} - b_{\text{ниж.}}$$

Полученный результат занесите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	d , мм	Δd , мм	$S_{\Delta d}$, мм	$\overline{\Delta d}$, мм	$b_{\text{ниж.}}$, мм	$b_{\text{верх.}}$, мм	b , мм	Δb , мм	$S_{\Delta b}$, мм	$\overline{\Delta b}$, мм
1										
2										
3										
Ср. знач.	$\bar{d} = \dots$	—	—	—	—	—	$\bar{b} = \dots$	—	—	—

6. Повторите измерения, описанные в пп. 1–5, еще не менее двух раз.

7. Полученные результаты измерений занесите в табл. 2.1.

8. По полученным результатам измерений определите средние значения толщины пластинки: действительной ($\bar{d}$) и кажущейся ($\bar{b}$). Результаты вычислений занесите в табл. 2.1.

9. По средним значениям $\bar{d}$ и $\bar{b}$ рассчитайте показатель преломления стекла, из которого изготовлена пластинка, используя следующую формулу:

$$\overline{n_{\text{ст}}} = \frac{\bar{d}}{\bar{b}}. \quad (2.14)$$

10. Определите погрешность вычисления показателя преломления стекла n по методике для косвенных измерений по формуле

$$\Delta \overline{n_{\text{ст}}} = \overline{n_{\text{ст}}} \sqrt{\left(\frac{\Delta \bar{d}}{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \bar{b}}{\bar{b}}\right)^2}, \quad (2.15)$$

где $\Delta \bar{d}$ и $\Delta \bar{b}$ – доверительные интервалы соответственно действительной и кажущейся толщины стеклянной пластинки, для нахождения которых следует использовать методику расчета стандартного доверительного интервала (см. с. 23); $\bar{d}$ – среднее значение действительной толщины стеклянной пластинки; $\bar{b}$ – среднее значение кажущейся толщины стеклянной пластинки; $\overline{n_{\text{ст}}}$ – среднее значение показателя преломления стеклянной пластинки.

11. Результат выполнения лабораторной работы по определению показателя преломления стеклянной пластинки запишите в виде выражения

$$n_{\text{ст}} = \overline{n_{\text{ст}}} \pm \Delta \overline{n_{\text{ст}}}. \quad (2.16)$$

Полученный результат сравните с табличным значением показателя преломления стекла. Сделайте вывод по лабораторной работе.

Пример выполнения расчетов к лабораторной работе 311

Экспериментальное определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа

№	d , мм	Δd , мм	$S_{\Delta d}$, мм	$\Delta \bar{d}$, мм	d' , мм	$\Delta d'$, мм	$S_{\Delta d'}$, мм	$\Delta \bar{d}'$, мм
1	18,53	0			10,9	0,9		
2	18,54	−0,01	0,004	0,008	12,5	−0,7	0,47	0,89
3	18,53	0			12	−0,2		
Ср.	18,53	–	–	–	11,8	–	–	–

Ход выполнения эксперимента

1. Микрометром измерить истинную толщину d большого круглого стекла. Измерения провести три раза.
2. Опуская тубус микроскопа, настроить его на четкое изображение нижней вертикальной черты на стекле.
3. Применить микрометрическую регулировку путем постепенного опускания винта до достижения контакта с металлической пластиной и определить показания d'_H .
4. Опуская тубус микроскопа, настроить его на четкое изображение верхней горизонтальной черты стекла.
5. Применить микрометрическую регулировку путем постепенного опускания винта до достижения контакта с металлической пластиной и определить показания d'_B .
6. Повторить три раза алгоритм действий в пп. 2–5.

Образец расчетов

1. Находим значение приближенной толщины стекла d' по формуле

$$d' = d'_B - d'_H.$$

$$d'_H = 35,5 \text{ мм},$$

$$d'_B = 46,4 \text{ мм},$$

$$d' = 46,4 \text{ мм} - 35,5 \text{ мм} = 10,9 \text{ мм}.$$

$$d'_H = 34,2 \text{ мм},$$

$$d'_B = 46,7 \text{ мм},$$

$$d' = 46,7 \text{ мм} - 34,2 \text{ мм} = 12,5 \text{ мм}.$$

$$d'_H = 34,1 \text{ мм},$$

$$d'_B = 46,1 \text{ мм},$$

$$d' = 46,1 \text{ мм} - 34,1 \text{ мм} = 12 \text{ мм}.$$

2. Вычислим средние значения истинной и кажущейся толщины стеклянной пластинки $\bar{d}$ и $\bar{d}'$:

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} = \frac{18,53 \text{ мм} + 18,54 \text{ мм} + 18,53 \text{ мм}}{3} = \frac{55,6 \text{ мм}}{3} = 18,53 \text{ мм}.$$

$$\bar{d}' = \frac{d'_1 + d'_2 + d'_3}{3} = \frac{10,9 \text{ мм} + 12,5 \text{ мм} + 12 \text{ мм}}{3} = \frac{35,4 \text{ мм}}{3} = 11,8 \text{ мм}.$$

3. Найдем абсолютные ошибки отдельных измерений Δd и $\Delta d'$:

$$\Delta d_i = \bar{d} - d_i.$$

$$\Delta d_1 = 18,53 \text{ мм} - 18,53 \text{ мм} = 0 \text{ мм},$$

$$\Delta d_2 = 18,53 \text{ мм} - 18,54 \text{ мм} = -0,01 \text{ мм},$$

$$\Delta d_3 = 18,53 \text{ мм} - 18,53 \text{ мм} = 0 \text{ мм}.$$

$$\Delta d'_i = \bar{d}' - d'_i.$$

$$\Delta d'_1 = 11,8 \text{ мм} - 10,9 \text{ мм} = 0,9 \text{ мм},$$

$$\Delta d'_2 = 11,8 \text{ мм} - 12,5 \text{ мм} = -0,7 \text{ мм},$$

$$\Delta d'_3 = 11,8 \text{ мм} - 12 \text{ мм} = -0,2 \text{ мм}.$$

4. Вычислим стандартные доверительные интервалы $S_{\Delta d}$ и $S_{\Delta d'}$:

$$S_{\Delta d} = \sqrt{\frac{\Delta d_1^2 + \Delta d_2^2 + \Delta d_3^2}{N(N-1)}}.$$

$$S_{\Delta d} = \sqrt{\frac{(0 \text{ мм})^2 + (-0,01 \text{ мм})^2 + (0 \text{ мм})^2}{6}} = \sqrt{\frac{0,0001 \text{ мм}^2}{6}} = 0,004 \text{ мм}.$$

$$S_{\Delta d'} = \sqrt{\frac{\Delta d_1'^2 + \Delta d_2'^2 + \Delta d_3'^2}{N(N-1)}}.$$

$$S_{\Delta d'} = \sqrt{\frac{(0,9 \text{ мм})^2 + (-0,7 \text{ мм})^2 + (-0,2 \text{ мм})^2}{6}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,81 \text{ мм}^2 + 0,49 \text{ мм}^2 + 0,04 \text{ мм}^2}{6}} = \sqrt{\frac{1,34 \text{ мм}^2}{6}} = 0,47 \text{ мм}.$$

5. Найдем значения доверительных интервалов $\Delta \bar{d}$ и $\Delta \bar{d}'$:

$$\Delta \bar{d} = t(\alpha, N) \cdot S_{\Delta d}.$$

$$\Delta \bar{d}' = t(\alpha, N) \cdot S_{\Delta d'}.$$

$$t(\alpha, N) = t(0,8; 3) = 1,9.$$

$$\Delta \bar{d} = 1,9 \cdot 0,004 \text{ мм} = 0,008 \text{ мм}.$$

$$\Delta \bar{d}' = 1,9 \cdot 0,47 \text{ мм} = 0,89 \text{ мм}.$$

6. По средним значениям истинной и кажущейся толщины стеклянной пластинки вычислим показатель преломления стекла $\bar{n}$:

$$\bar{n} = \frac{\bar{d}}{\bar{d}'},$$

$$\bar{n} = \frac{18,53 \text{ мм}}{11,8 \text{ мм}} = 1,57.$$

7. Найдем погрешность вычисления показателя преломления стекла $\Delta\bar{n}$:

$$\Delta\bar{n} = \bar{n} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta\bar{d}}{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\bar{d}'}{\bar{d}'}\right)^2}.$$

$$\Delta\bar{n} = 1,57 \cdot \sqrt{(0,0004)^2 + (0,0757)^2} = 0,12.$$

8. Конечный результат показателя преломления стекла записываем в виде

$$n = \bar{n} \pm \Delta\bar{n}.$$

$$n = 1,57 \pm 0,12.$$

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте и запишите основные законы геометрической оптики.

2. Связаны ли показатель преломления среды и скорость распространения света в ней? В случае наличия такой связи, каков характер этой зависимости?

3. Путем графического построения определите мнимое изображение предмета при рассмотрении его через стеклянную пластинку. Объясните, почему при наблюдении объекта через плоскую стеклянную пластину создается иллюзия, что он находится ближе, чем его реальное местоположение?

4. Выведите формулу для определения показателя преломления стекла, используя построение мнимого изображения предмета при рассмотрении его через стеклянную пластинку.

Лабораторная работа 312

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ РЕФРАКТОМЕТРОМ АББЕ

Цель работы: осмысление теоретической и практической значимости закона преломления света; знакомство с рефрактометрическим методом определения показателя преломления жидкости; экспериментальное определение зависимости показателя преломления растворов от различной концентрации сахарозы в них.

Приборы и принадлежности: лабораторный рефрактометр ИРФ-22, стеклянные емкости с растворами различной концентрации сахарозы, пипетка, салфетка.

Краткие теоретические сведения

При переходе электромагнитных волн (света) из одной среды в другую с разными оптическими свойствами происходит преломление световых лучей и выполняется закон преломления:

1) луч, падающий на преломляющую поверхность, нормаль к этой поверхности в точке падения и преломленный луч лежат в одной плоскости (рис. 2.5);

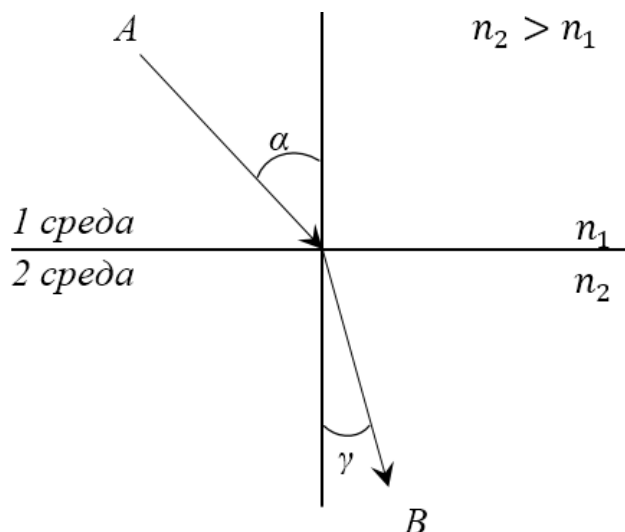


Рис. 2.5. Ход светового луча через границу раздела двух сред при $n_1 < n_2$

2) отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления γ не зависит от угла падения и для данной пары веществ есть величина постоянная, равная относительному показателю преломления n_{21} :

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}. \quad (2.17)$$

Следует учесть, что показатель преломления вещества относительно вакуума является абсолютным показателем преломления и может быть записан в виде

$$n = \frac{c}{V}, \quad (2.18)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; V – скорость света в данной среде.

Таким образом, относительный показатель преломления может быть выражен также через отношение скоростей распространения света в первой среде V_1 и во второй среде V_2 , а также через отношение абсолютных показателей преломления этих сред n_2 и n_1 . В результате получим следующее выражение:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.19)$$

При переходе луча света из оптически менее плотной среды с абсолютным показателем преломления n_1 в оптически более плотную среду с абсолютным показателем преломления n_2 имеем, что $n_1 < n_2$. Тогда относительный показатель преломления $n_{21} > 1$, при этом угол преломления меньше угла падения $\gamma < \alpha$.

При переходе луча из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду ($n_1 > n_2$) относительный показатель преломления становится меньше единицы, т. е. $n_{21} < 1$, следовательно, угол преломления γ_1 будет больше угла падения $\alpha_1 - \gamma_1 > \alpha_1$ (рис. 2.6).

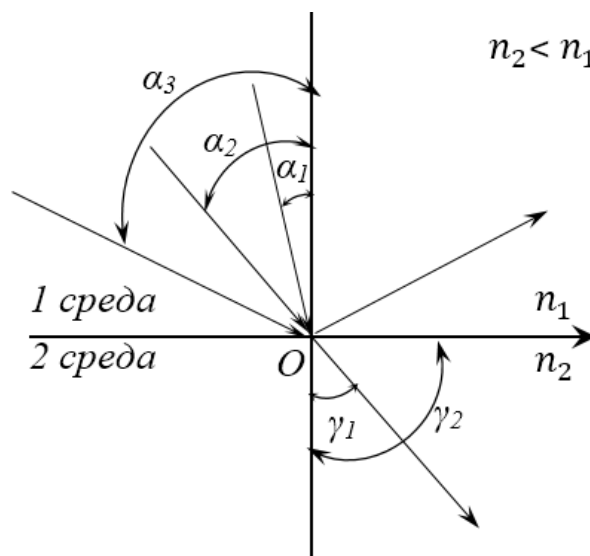


Рис. 2.6. Ход световых лучей через границу раздела двух сред при $n_1 > n_2$

Описание лабораторной установки

Первые рефрактометры были изобретены еще в середине XVIII в. Это высокоточные аналитические устройства, предназначенные для измерения показателей преломления света в различных средах с высокой точностью и небольшой затратой времени. Данные приборы позволяют проводить измерения с минимальными временными затратами даже при ограниченном количестве анализируемого образца. Принцип работы большинства рефрактометров по определению показателя преломления базируется на методе предельного угла, в основе которого лежит явление полного внутреннего отражения, возникающее при переходе света из оптически более плотной среды в менее плотную.

В настоящее время рефрактометрический метод широко применяют в различных отраслях промышленности (химической, нефтяной, фармацевтической, пищевой), а также в геологии, сельском хозяйстве и др. Например, в химических и физических лабораториях эту аппаратуру используют для контроля качества различных растворов, исследования эфирных масел, стекол, жиров, жидкого топлива и смазочных материалов, а в фармакологии – для изучения биологических жидкостей.

Рефрактометрический метод продолжает оставаться востребованным благодаря таким характеристикам, как доступность, простота применения и приемлемая степень точности. Например, рефрактометр ИРФ-22 (системы Аббе) применяется для определения показателей преломления жидкостей в лабораторных условиях. В основе принципа работы этого прибора лежит явление полного внутреннего отражения световых лучей, которое возникает на границе раздела сред с различными показателями преломления. Для освещения можно использовать как дневной свет, так и электрическое освещение белым светом.

Схема рефрактометра приведена на рис. 2.7. Рабочая часть прибора состоит из двух призм, разделенных между собой: одна из них (*DEF*) является измерительной, а другая (*ABC*) – осветительной. Призмы изготовлены из стекла сорта «флинтглас» с большим показателем преломления. Прикрывающую призму (*ABC*) можно откидывать на угол примерно 100° .

Обе призмы (измерительная и осветительная) смонтированы так, что при складывании между ними остается небольшое пространство (около 0,1 мм), которое при измерении заполняется тонким слоем исследуемой жидкости. Когда между двумя гранями призм вводят 2–3 капли этой жидкости, при опускании верхней призмы на нижнюю

призму капли жидкости расплываются в слой толщиной примерно 0,02 мм. Пучок света от осветителя при этом направляют на грань AB осветительной призмы, где лучи света преломляются и попадают на ее матовую поверхность AC , которая их рассеивает. Рассеянные лучи, проходя через слой жидкости, учитывая ее малую толщину, падают на грань DF измерительной призмы под разными углами α – от 0 до 90° .

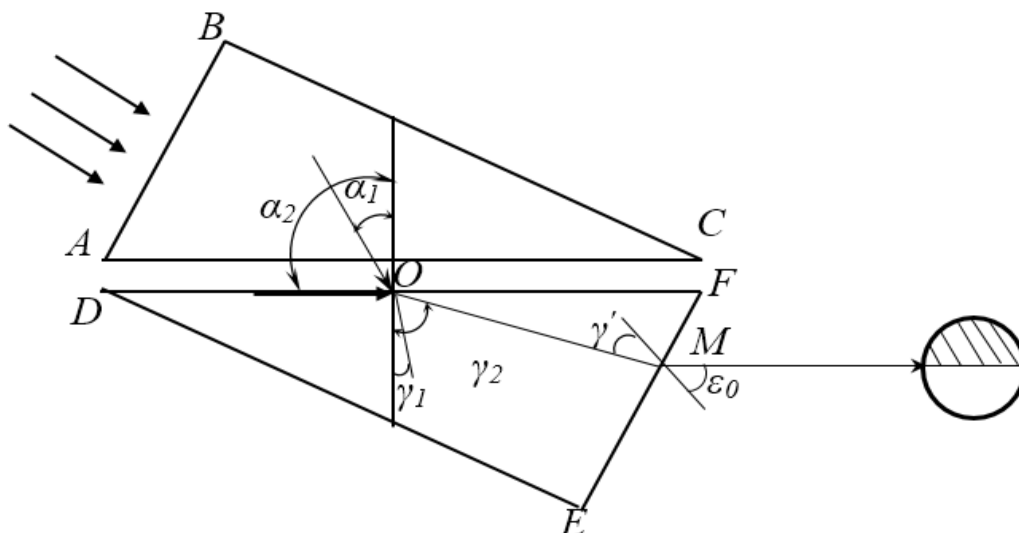


Рис. 2.7. Принципиальная схема рефрактометра

При увеличении угла падения лучей в жидкости угол преломления в измерительной призме также будет увеличиваться и достигнет максимального предельного значения, когда луч, падающий на точку O под наибольшим углом, будет скользить по грани DF и преломляться в призме DEF под предельным углом $\gamma_{\text{пред}} = \gamma_2$. Это следует из принципа обратимости хода светового луча, так как если луч на точку O падал бы, наоборот, со стороны измерительной призмы, то после преломления он скользил бы вдоль границы раздела с жидкостью. Все остальные лучи, падающие на грань DF под углами $\alpha_1 < \pi/2$, преломляются в измерительной призме под углами $\gamma_1 < \gamma_{\text{пред}}$.

Поскольку скользящий по грани DF луч, выходя через грань EF , создает границу раздела светотени в поле зрения окуляра, его угол выхода является предельным. Луча с большим углом выхода не существует. Таким образом, лучи, попадающие из исследуемой жидкости в измерительную призму, ограничены определенным углом $\gamma_{\text{пред}} = \gamma_2$. В область FOM они не попадают. При рассмотрении через окуляр можно наблюдать две области: светлую (нижняя половина) и темную (верхняя половина), соответствующую не прошедшим лучам. В действительности окуляр дает всегда перевернутое изображение.

Значение синуса предельного угла можно определить, используя закон преломления:

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_{\text{пред}}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\sin \gamma_{\text{пред}}} = \frac{1}{\sin \gamma_{\text{пред}}} = \frac{n_{\text{ст}}}{n_{\text{ж}}}; \quad (2.20)$$

$$\sin \gamma_{\text{пред}} = \frac{n_{\text{ж}}}{n_{\text{ст}}}. \quad (2.21)$$

В дальнейшем лучи, попадающие на грань EF измерительной призмы в точке M , на выходе из призмы преломляются на границе стекла и воздуха. Учитывая, что показатель преломления воздуха принят за единицу, закон преломления в точке M запишется в виде

$$\frac{\sin \gamma'}{\sin \varepsilon_0} = \frac{n_{\text{возд}}}{n_{\text{ст}}} = \frac{1}{n_{\text{ст}}}. \quad (2.22)$$

Преломляющий угол призмы OFM (рис. 2.7) связан с углами $\gamma_{\text{пред}}$ и γ' следующим соотношением:

$$\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_{\text{пред}}\right) + \left(\frac{\pi}{2} - \gamma'\right) + OFM = \pi. \quad (2.23)$$

Тогда угол OFM можно представить в виде

$$OFM = \gamma_{\text{пред}} + \gamma'. \quad (2.24)$$

Исключая промежуточные углы $\gamma_{\text{пред}}$ и γ' из записанных выше выражений, можно получить формулу для определения показателя преломления исследуемой жидкости.

Так как

$$n_{\text{ж}} = n_{\text{ст}} \cdot \sin \gamma_{\text{пред}} = n_{\text{ст}} \cdot \sin(OFM - \gamma'), \quad (2.25)$$

то, применяя формулу разности аргументов синуса, получим

$$n_{\text{ж}} = n_{\text{ст}} \cdot (\sin OFM \cdot \cos \gamma' - \cos OFM \cdot \sin \gamma'). \quad (2.26)$$

Используем основное тригонометрическое выражение для $\cos \gamma'$, тогда предыдущее выражение примет следующий вид:

$$n_{\text{ж}} = n_{\text{ст}} \cdot \left(\sin OFM \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \gamma'} - \cos OFM \cdot \sin \gamma' \right). \quad (2.27)$$

Представим

$$\sin \gamma' = \frac{\sin \varepsilon_0}{n_{\text{ст}}}. \quad (2.28)$$

Тогда получим

$$n_{\text{ж}} = n_{\text{ст}} \cdot \left[\sin OFM \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \varepsilon_0}{n_{\text{ст}}} \right)^2} - \cos OFM \cdot \frac{\sin \varepsilon_0}{n_{\text{ст}}} \right]. \quad (2.29)$$

Отсюда

$$n_{\text{ж}} = \sin OFM \cdot \sqrt{n_{\text{ст}}^2 - \frac{n_{\text{ст}}^2 \sin^2 \varepsilon_0}{n_{\text{ст}}^2}} - n_{\text{ст}} \cdot \cos OFM \cdot \frac{\sin \varepsilon_0}{n_{\text{ст}}}. \quad (2.30)$$

Таким образом, выражение для показателя преломления исследуемой жидкости будет иметь следующий вид:

$$n_{\text{ж}} = \sin OFM \cdot \sqrt{n_{\text{ст}}^2 - \sin^2 \varepsilon_0} - \cos OFM \cdot \sin \varepsilon_0. \quad (2.31)$$

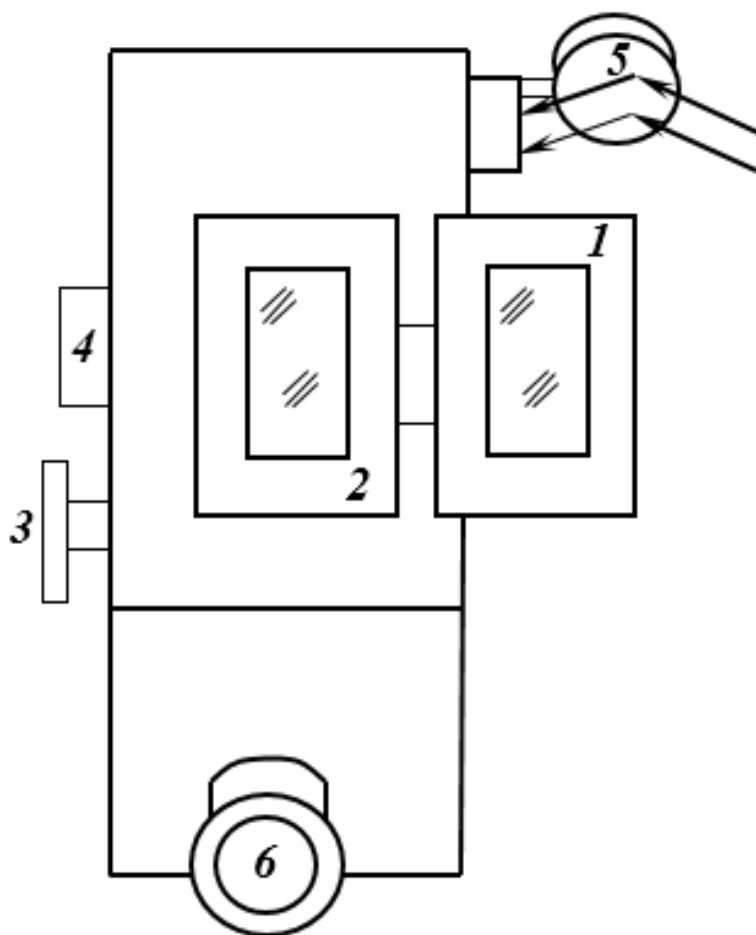
При анализе пучков излучения, проходящих через измерительную призму к окуляру зрительной трубы, наблюдается разделение визуального поля на две области: верхнюю, характеризующуюся повышенной яркостью, и нижнюю, отличающуюся пониженной интенсивностью света.

Поворачивая систему, состоящую из осветительной и измерительной призмы, необходимо совместить границу светотени с перекрестием нитей окуляра зрительной трубы. Система призм связана со шкалой, которая проградуирована в значениях показателя преломления. Шкала, расположенная в нижней части поля зрения трубы при совмещении раздела поля зрения с перекрестием, позволяет определить соответствующее значение показателя преломления жидкости $n_{\text{ж}}$. Если рефрактометр освещают белым светом, то за счет различия показателей преломления жидкости и стекла для лучей с разными длинами волн из-за явления дисперсии граница светотени будет окрашена и, как следствие этого, размыта.

Для устранения размытости границы светотени применяют компенсатор 3 (рис. 2.8), состоящий из двух систем склеенных призм прямого зрения (призм Амирчи). Каждая из них, в свою очередь, состоит из трех склеенных призм с различными показателями преломления и дисперсией.

Призмы проектируются таким образом, чтобы монохроматический луч с длиной волны $\lambda = 589$ нм (длина волны желтого натрия) не подвергался отклонению при прохождении через оптическую систему.

Лучи с волнами, имеющими другую длину, отклоняются в ту или иную сторону. При повороте призм Амирчи в противоположные стороны дисперсная способность может изменяться в широких пределах (от нуля до удвоенного значения дисперсии одной из призм). Эти призмы можно устанавливать таким образом, чтобы их дисперсия одновременно компенсировала дисперсию света в жидкости и в призмах рефрактометра. Тогда при наблюдении через окуляр 6 (см. рис. 2.8) граница преломления будет не окрашенной, а отчетливой.



*Рис. 2.8. Схема рефрактометра ИФР-22 (вид сверху):
 1 – осветительная призма; 2 – измерительная призма;
 3 – компенсатор; 4 – ручка для измерения угла поворота
 измерительной призмы; 5 – осветительное зеркальце; 6 – окуляр*

Для поворота призм относительно друг друга используют специальные рукоятки и систему шестерен, с помощью которых призмы одновременно поворачиваются в противоположных направлениях. Вращая ручку компенсатора, добиваются того, чтобы граница света и тени в поле зрения стала резкой. Компенсатор при этом для всех длин волн сводит все предельные лучи в то место поля зрения, которое совпадает с положением предельного луча для желтых лучей (линии натрия). В тех случаях, когда дисперсия исследуемого вещества слишком велика, диапазон компенсатора может оказаться недостаточным и четкую границу получить не удастся. Тогда рекомендуется устанавливать перед осветителем желтый светофильтр.

В рефрактометре ИФР-22 окуляр 6 (см. рис. 2.8) снабжен шкалой, позволяющей отсчитывать показатели преломления исследуемой жидкости в пределах 1,30–1,69. Шкала находится с левой стороны поля зрения окуляра.

Измерения и обработка результатов

1. Перед началом экспериментальной работы приготовьте дистиллированную воду и не менее трех растворов исследуемого препарата различной, в том числе и неизвестной, концентрации. Можно приготовить растворы с разной концентрацией сахарозы или поваренной соли (NaCl), которые близки к пределу растворимости соли (например, с концентрацией поваренной соли $C = 200$ г/л).

2. Настройте рефрактометр и источник дневного света или электрической лампы (осветителя) так, чтобы свет падал на входное окошечко осветительной призмы, равномерно освещая поле зрения.

3. Приподняв верхнюю призму 1 на чистую поверхность, поместите с помощью пипетки или стеклянной трубочки три-четыре капли дистиллированной воды на поверхность нижней призмы 2, не касаясь при этом призмы. Осторожно закройте верхнюю призму. Зазор между призмами должен быть равномерно заполнен тонким слоем воды.

4. Направьте поток излучения от источника света через открытую поверхность призмы 1. Используя зеркало 5, оптимизируйте интенсивность освещения таким образом, чтобы обеспечить достаточную освещенность измерительной шкалы.

5. После калибровки окуляра до значения 6, что обеспечивает оптимальную резкость и чёткость визуального восприятия, осуществляется регистрация рефрактометрических данных. При этом в поле зрения окуляра одновременно должны находиться изображения шкалы показателя преломления и поле сфокусированных лучей (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Изображение в окуляре рефрактометра

6. Установите значение показателя преломления приблизительно равным 1,33, вращая ручку управления 4 на шкале измерительного устройства.

7. При помощи вращения регулировочного механизма компенсатора 3 необходимо достичь четкого разделения между областью восприятия с повышенной яркостью (желтая зона) и областью пониженной освещенности (серая с голубоватым оттенком).

8. При помощи ручки управления 4 отрегулируйте положения призм таким образом, чтобы граница светотени совпала с точкой пересечения визирных линий (двух черточек) в окуляре наблюдательного устройства (рис. 2.10).

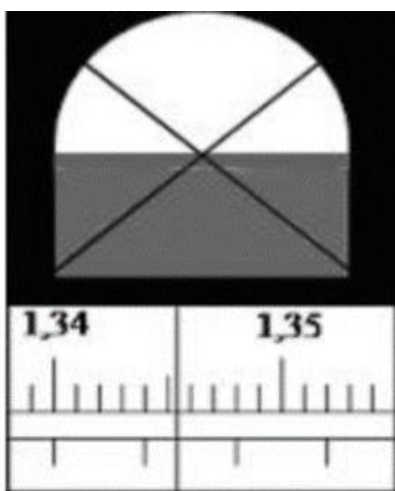


Рис. 2.10. Изображение границы светотени на перекрестии

9. По градуированной шкале (с точностью до тысячных долей) произведите отсчет показателя преломления по шкале прибора. Полученный результат занесите в табл. 2.2.

10. Тщательно очистите призмы рефрактометра салфеткой или ватой и просушите их – для этого достаточно подержать их некоторое время открытыми.

11. Аналогичным образом произведите измерения показателя преломления водных растворов и концентрации исследуемого препарата для разных массовых долей. Измерения производятся не менее чем для трех концентраций исследуемого препарата при одинаковой температуре. Полученные результаты занесите в табл. 2.2.

12. По полученным данным постройте график экспериментальной зависимости показателя преломления n от концентрации раствора (см. пример выполнения работы на с. 35).

13. Определите графически концентрацию для неизвестного раствора.

14. Проанализируйте полученный результат и сформулируйте вывод по лабораторной работе.

Таблица 2.2

**Показатели преломления водных растворов
и их массовая концентрация**

$C_i, \%$ № П/П	C_1	C_2	C_3	C_x
...				

Задания к лабораторной работе*

Ознакомьтесь со следующими материалами:

1. Алгоритм работы на рефрактометре ИРФ-454 Б2М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lms.kgeu.ru/pluginfile.php?file=%2F289199%2Fmod_resource%2Fcontent%2F1%2F5_Работа-на-рефрактометре_алгоритм.pdf, свободный.

2. Порядок работы на рефрактометре ИРФ-454 Б2М. Подготовка прибора к работе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=DAOSmXFnbHs>, свободный.

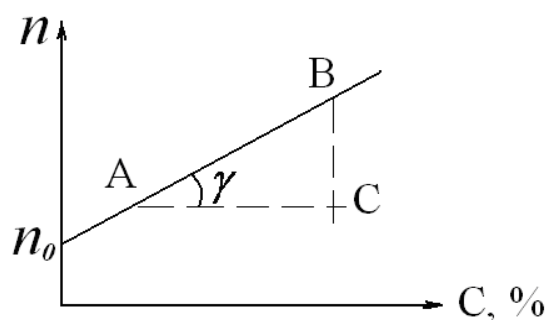
3. Медведева, А. А. Исследование осветленного яблочно-виноградного сока с помощью рефрактометра ИРФ-454Б2М / А. А. Медведева, С. Ф. Саттаров, З. Р. Идрисов // Вестник науки: сб. тр. науч.-исслед. работ по матер. IX Всерос. конкурса «Актуальные вопросы современной науки» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://perviy-vestnik.ru/wp-content/uploads/2022/08/2022-E-208-05_22.pdf, свободный.

Пример выполнения расчетов к лабораторной работе 312

**Экспериментальное определение показателя преломления
жидкостей при помощи рефрактометра Аббе**

$C, \%$	$C_1, \%$	$C_2, 3 \%$	$C_3, 10 \%$	$C_x, x\%$
	1,333	1,337	1,348	1,340

Построим график зависимости показателя преломления жидкости n от концентрации раствора C :



Далее по графику находим зависимость концентрации исследуемого раствора жидкости.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются относительный и абсолютный показатели преломления?
2. Как формулируется закон преломления?
3. В чем состоит явление полного внутреннего отражения? При каких условиях наблюдается полное внутреннее отражение?
4. Каковы устройство и принцип действия рефрактометра? Изобразите ход лучей в рефрактометре при монохроматическом освещении.
5. Зачем грань DF (рис. 2.7) делают матовой?
6. Каково предназначение компенсатора в рефрактометре?
7. Какое эталонное вещество (раствор) использовали в рефрактометре?
- 8*. Почему при помощи данной лабораторной установки нельзя определить показатель преломления жидкости больший, чем показатель преломления стекла призмы в рефрактометре?
- 9*. Как вывести формулу для определения показателя преломления исследуемой жидкости, используя принципиальную схему действия рефрактометра на рис. 2.7?

3. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Лабораторная работа 324

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Цель работы: знакомство с принципом работы оптического квантового генератора, наблюдение дифракции света при помощи дифракционной решетки и измерение длины световой волны красного цвета, излучаемой оптическим квантовым генератором (ОКГ).

Приборы и принадлежности: укрепленные на оптической скамье оптический квантовый генератор (лазер), дифракционная решетка с держателем и экран, миллиметровая линейка.

Краткие теоретические сведения

Первый оптический квантовый генератор (или лазер) был построен в 1960 г. Название «лазер» произошло от аббревиатуры английского названия этого устройства – LASER (light amplification by stimulated emission of radiation), означающее усиление света посредством вынужденного излучения. С помощью данного устройства была реализована генерация монохроматических электромагнитных волн оптического спектра (в диапазоне 400–760 нм), обусловленная процессом стимулированной эмиссии фотонов.

Для понимания основных принципов функционирования лазерной системы требуется обратиться к таким физическим явлениям, как квантовое поглощение и спонтанное/индуцированное излучение фотонов атомными структурами.

Согласно квантовой физике, энергия атома квантована, т. е. атом может находиться только на определенных энергетических уровнях. В квантовой системе с двумя выделенными уровнями при взаимодействии с излучением могут происходить различные процессы:

1. При поглощении фотона квантовая система осуществляет переход с нижнего энергетического уровня E_1 на верхний, более высокий энергетический уровень E_2 ($E_2 > E_1$). Данный переход может происходить только при поглощении фотона с энергией (рис. 3.1):

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

Средняя продолжительность существования возбужденного состояния атома обычно находится в пределах порядка 10^{-8} с, после чего он возвращается в основное состояние. При этом обратный переход атома с энергетического уровня E_2 на уровень E_1 сопровождается испусканием фотона и может происходить спонтанно (т. е. независимо от внешнего проходящего излучения) и индуцировано.

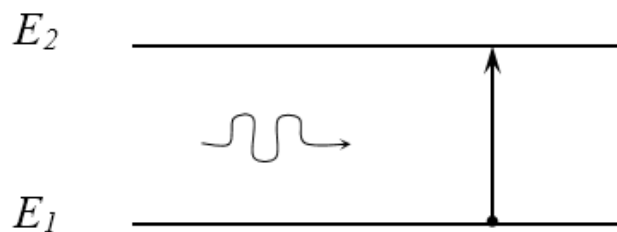


Рис. 3.1. Переход атома с энергетического уровня E_1 на E_2

2. Спонтанное излучение наблюдается при самопроизвольном переходе с верхнего уровня на нижний. Спонтанные излучения разных атомов не согласованы друг с другом, не когерентны по фазам и происходят в различных направлениях. В результате этого процесса каждый фотон приобретает произвольную ориентацию волнового вектора.

Частоты поглощаемых или самопроизвольно испускаемых квантов определяются разностью энергий двух уровней. Примером спонтанного излучения является испускание света Солнцем, лампами накаливания, люминесцентными лампами и т. п.

3. Вынужденное (индуцированное) излучение осуществляется при взаимодействии возбужденного атома с проходящим излучением, в ходе которого совершается индуцированный переход с верхнего уровня на нижний.

В процессе вынужденного излучения, обусловленного взаимодействием атома с фотоном, генерируются два идентичных когерентных фотонных близнеца, которые распространяются в одном направлении и характеризуются совпадающими волновыми параметрами, такими как частота, фаза и поляризация (рис. 3.2).

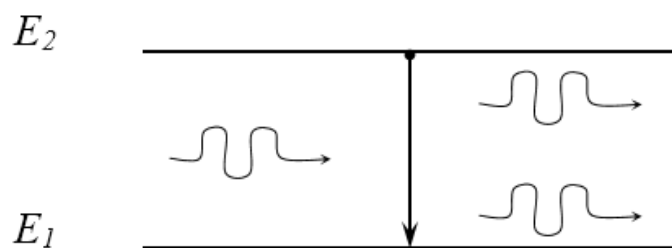


Рис. 3.2. Индуцированный переход атома с энергетического уровня E_2 на E_1

У многих частиц некоторые возбужденные состояния характеризуются большим временем жизни (10^{-5} – 10^{-3} с), т. е. вероятность спонтанных излучательных переходов с этих уровней, а также возбуждение этих уровней за счет поглощения фотона очень малы по сравнению с обычными уровнями. Подобные переходы называют *запрещенными*, а сами состояния – *метастабильными*. В средах, характеризующихся наличием частиц с метастабильными энергетическими уровнями, эффект стимулированной эмиссии проявляется особенно ярко, что делает их перспективным материалом для использования в лазерных системах. Процесс вынужденного излучения фотонов обеспечивает усиление проходящего через такую среду электромагнитного излучения. Любой фотон света, испускаемый в результате спонтанного перехода, может быть размножен индуцированным испусканием фотонов той же частоты другими возбужденными атомами, образуя лавину фотонов, приводящую к когерентному излучению (рис. 3.3).

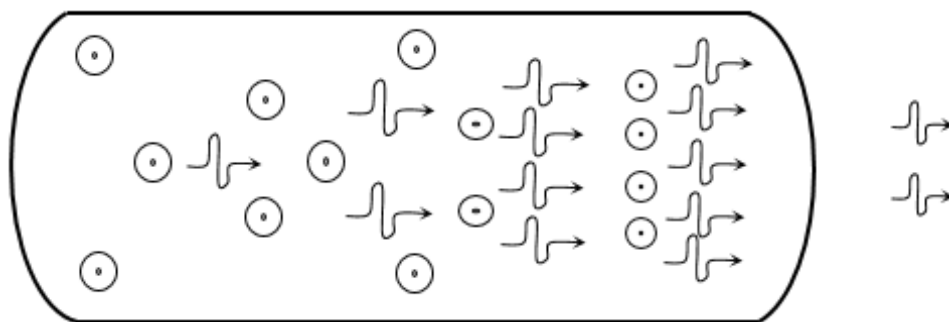


Рис. 3.3. Механизм образования лавины фотонов

Для осуществления такого механизма усиления света необходимо, чтобы число индуцированных переходов, приводящих к испусканию фотонов, было больше числа переходов, связанных с поглощением фотонов той же частоты. Из-за наличия частиц с метастабильными уровнями активная среда может быть легко переведена в состояние

инверсной заселенности. Это возможно, если число возбужденных атомов на верхнем метастабильном энергетическом уровне будет больше числа атомов на нижнем энергетическом уровне. Иными словами, активная среда в инверсном состоянии обладает избыточной энергией, которая может быть превращена в вынужденное (лазерное) излучение.

Перевод активной среды в состояние с инверсной населенностью называется *накачкой*, при этом происходит принудительный переброс атомов в верхнее энергетическое состояние за счет внешних источников энергии. Процесс перевода системы в инверсное состояние возможно реализовать различными методами, однако ни один из них нельзя применить в рамках двухуровневой системы.

Накачка производится через третий (вышерасположенный) энергетический уровень и переводит двухуровневую среду в состояние, когда количество атомов на верхнем уровне превышает количество атомов на нижнем. Если через среду с инверсной населенностью уровней проходит внешний пучок света, то его интенсивность возрастает за счет процесса индуцированного излучения. Чтобы возникла самопроизвольная генерация света, нужно активную среду поместить между двумя параллельными зеркалами с высоким коэффициентом отражения. Тогда излучение, усиливающееся при каждом проходе через активную среду, будет многократно после отражения от зеркал проходить через нее, вызывая лавину индуцированных фотонов. Так возникает лазерная генерация.

Рассмотрим принцип работы газового лазера с непрерывным режимом работы, в котором рабочим веществом является газовая смесь из 15 % He (гелия) и 85 % Ne (неона), находящаяся в длинной узкой стеклянной трубке, к торцевым окнам которой прикреплены два электрода – анод и катод. За торцевыми окнами расположены два полупрозрачных параллельных зеркала: с одной стороны глухое сферическое зеркало с пропусканием менее 0,1 %, а с другой – сферическое полупрозрачное зеркало (выходной элемент) с пропусканием 1–2 % (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Устройство гелий-неонового лазера

В гелий-неоновом лазере атомы возбуждаются приложенным к электродам трубки высоким напряжением, которое вызывает электрический разряд в газе. При этом часть атомов гелия возбуждается и переходит на энергетический уровень $2S$ с энергией $20,61$ эВ (рис. 3.5). У атомов неона имеется уровень $5S$ с почти такой же энергией ($20,66$ эВ).

Обратный переход $2S-1S$ для гелия запрещен, поэтому при столкновениях атом гелия передает избыток своей энергии атомам неона. При этом атом неона возбуждается и переходит на энергетический уровень $5S$, а атом гелия возвращается в основное состояние $1S$ (см. штриховые линии для гелия на рис. 3.5). В результате уровень $5S$ атома неона оказывается более заселенным, чем уровень $3P$, и возникает состояние инверсной заселенности, необходимое для генерации лазерного излучения.

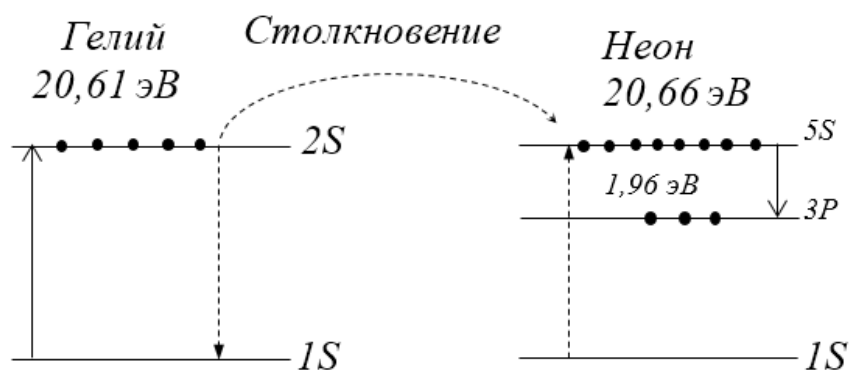


Рис. 3.5. Схема уровней в гелий-неоновом лазере

Состояние $5S$ является неустойчивым, поэтому некоторые из возбужденных атомов Ne довольно скоро совершают переход $5S-3P$, испуская при этом фотон. Один из таких атомов изображен на рис. 3.5 (справа). Если излученный им фотон сталкивается с другим возбужденным атомом Ne, то он вынуждает этот атом излучить еще один фотон той же частоты и фазы. Оба фотона в дальнейшем сталкиваются с другими возбужденными атомами Ne, вызывая таким образом индуцированное излучение. Процесс продолжается, и число индуцированных фотонов быстро нарастает (см. рис. 3.3). Небольшая доля фотонов, летящих то в одну, то в другую сторону между торцами трубки, выходит через полупрозрачное зеркало и образует узкий когерентный пучок лазерного излучения.

В данной лабораторной работе лазерное излучение используется для изучения дифракции при прохождении световой волны через систему близко расположенных узких щелей – так называемую дифракционную решетку (рис. 3.6), представляющую собой совокупность непрозрачных штрихов и прозрачных участков.

Дифракцией света называется явление огибания световыми волнами препятствий, размеры которых сравнимы с длиной световой волны.

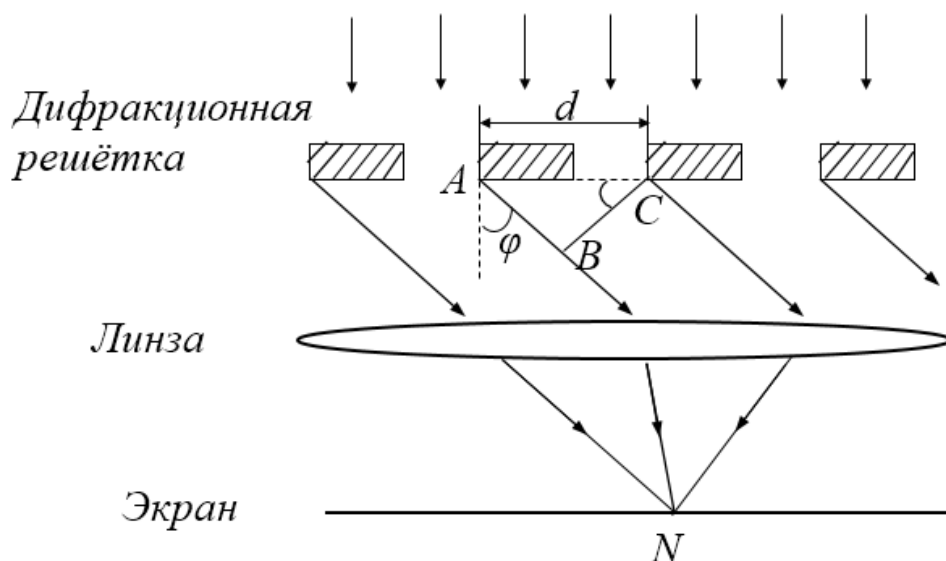


Рис. 3.6. Прохождение лучей через дифракционную решетку

Пусть на дифракционную решетку падает плоскопараллельный пучок монохроматической световой волны. По принципу Гюйгенса каждая точка щели, до которой дошло колебание, сама становится источником вторичных сферических световых волн. Поэтому от каждой щели световые лучи будут распространяться по всем направлениям.

Для простоты изучения данного явления рассмотрим только один пучок параллельных лучей, распространяющихся от каждой щели под одним и тем же углом φ . Если на пути распространения лучей поместить собирающую линзу, а в ее фокальной плоскости – экран, то пучок параллельных лучей соберется на экране в некоторой точке N . Освещенность этой точки зависит от результата интерференции лучей при наложении их друг на друга. Результат интерференции определяется разностью хода AB между световыми лучами (см. рис. 3.6), которая равна $d \cdot \sin \varphi$. Если выполняется условие

$$d \cdot \sin \varphi = \pm k \cdot \lambda, \quad (3.1)$$

то световые лучи взаимно усиливаются, и в точке N на экране наблюдается светлое пятно – дифракционный максимум. Здесь d – период дифракционной решетки (расстояние между соседними штрихами), который можно определить по количеству штрихов на 1 мм; φ – угол отклонения луча от нормали; λ – длина световой волны; k – порядок наблюдаемого спектра.

Таким образом, на экране возникает дифракционная картина – система чередующихся максимумов и минимумов. Максимум интенсивности, имеющий нулевой порядок $k = 0$, называется центральным. Он лежит на нормали к решетке ($\sin \varphi = 0$), и ему соответствует самое яркое центральное пятно. По обе стороны от него симметрично располагаются вторичные дифракционные максимумы первого порядка ($k = \pm 1$), далее наблюдаются вторичные дифракционные максимумы второго порядка ($k = \pm 2$) и т. д.

Описание лабораторной установки

Обратите внимание: во избежание попадания лазерного луча в глаза во время выполнения лабораторной работы не следует пользоваться блестящими предметами!

Схема лабораторной установки для наблюдения дифракции лазерного излучения приведена на рис. 3.7.

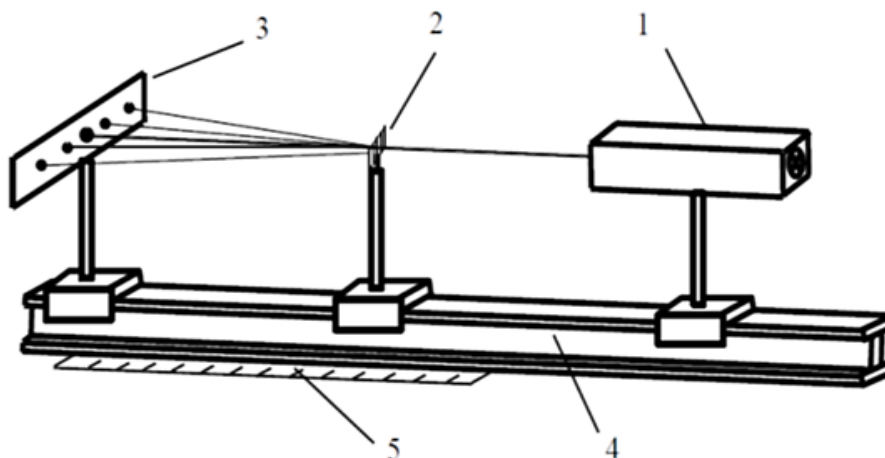


Рис. 3.7. Схема лабораторной установки: 1 – оптический квантовый генератор (лазер); 2 – дифракционная решетка с держателем; 3 – экран; 4 – оптическая скамья; 5 – миллиметровая линейка

Метод определения длины световой волны основан на использовании условия возникновения максимумов света из соотношения

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin \varphi}{k}, \quad (3.2)$$

где d – постоянная (период) дифракционной решетки; k – порядок максимума ($k = 0, 1, 2, 3 \dots$); φ – угол дифракции между центральным максимумом и максимумом более высокого k -го порядка.

Принимая во внимание, что угол φ по условиям данной работы мал (не превышает 5°), вместо $\sin \varphi$ в формуле можно использовать $\operatorname{tg} \varphi$, так как при малых углах выполняется равенство: $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi$.

На рис. 3.8 представлена схема распространения световых пучков при проведении эксперимента. Свет распространяется от оптического квантового генератора ОКГ (лазера), подключенного к блоку питания, и попадает на дифракционную решетку (ДР). Световые пучки, выходящие из решетки, попадают на экран, который расположен на расстоянии L от нее. Наблюдатель видит на экране центральный дифракционный максимум и симметрично расположенные пары максимумов других порядков.

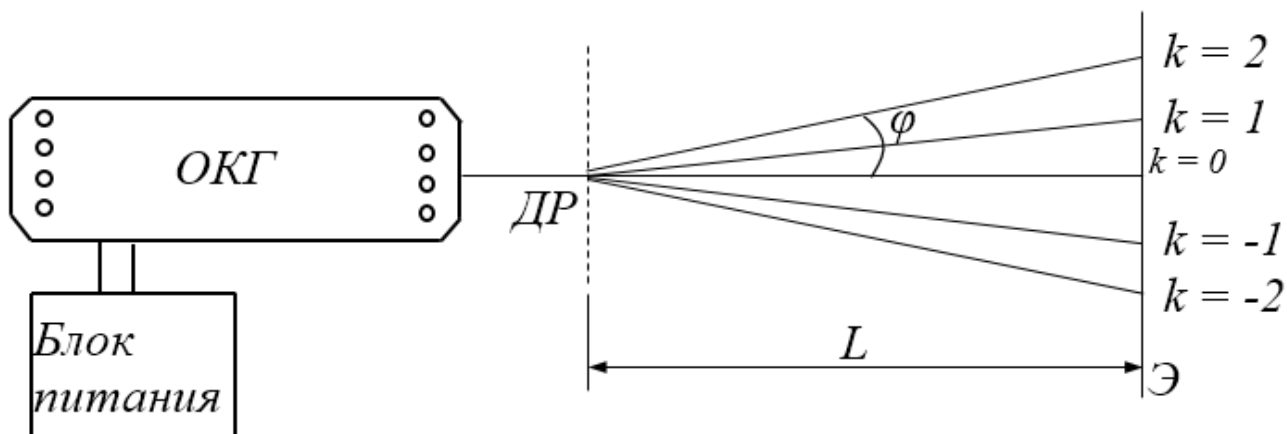


Рис. 3.8. Распространение световых пучков от дифракционной решетки

На экране расстояние от центрального максимума до максимума другого k -го порядка, длину волны которого измеряют, обозначают через x . При этом выполняется равенство

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{L}. \quad (3.3)$$

Тогда можно получить расчетную формулу для определения длины световой волны, для которой не требуется измерения угла φ :

$$\lambda = \frac{d \cdot x}{k \cdot L}. \quad (3.4)$$

Измерения и обработка результатов

1. Включите тумблеры «Сеть» и «Анод» на блоке питания ОКГ. Поворачивая ручку регулирования напряжения анода по часовой стрелке и одновременно нажимая кнопку «Поджиг», зажгите газовый разряд в трубке ОКГ. После этого установите значение тока разряда $I_a = 30 \text{ mA}$.

2. Установите дифракционную решетку на расстоянии 10–15 см от лазера, а экран на расстоянии 30–45 см от дифракционной решетки.

3. Проведите регистрацию дифракционных спектров и выполните коррекцию положения дифракционной решетки при возникновении соответствующей необходимости.

4. При помощи миллиметровой линейки измерьте расстояние L между дифракционной решеткой и экраном, а также расстояние x от центрального максимума до дифракционных максимумов 1-го, 2-го и 3-го порядка ($k = 1, 2, 3$ соответственно). Измерения повторите три раза. Среднеарифметические значения измеренных величин L и x для каждого дифракционного максимума 1-го, 2-го и 3-го порядка занесите в табл. 3.1.

5. Определите по данным дифракционной решетки число штрихов N на 1 мм. Рассчитайте постоянную (d) дифракционной решетки по формуле

$$d = \frac{1 \text{ мм}}{N} = \frac{10^{-3} \text{ м}}{N}. \quad (3.5)$$

Например, $N = 170$, тогда

$$d = \frac{1 \text{ мм}}{170} = \frac{10^{-3} \text{ м}}{170} \approx 0,00588 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

6. Для каждого значения k ($k = 1, 2, 3$ соответственно) определите синусы угла отклонения волны от нормали, используя для расчетов формулу (3.3). Полученные значения занесите в соответствующую графу в табл. 3.1.

7. Вычислите длину волны лазерного излучения для каждого значения k ($k = 1, 2, 3$ соответственно) по формуле (3.4), ответ запишите в нм, учитывая, что $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ и занесите в табл. 3.1.

8. По результатам вычислений (см. п. 7) определите среднее арифметическое значение длины световой волны по формуле

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3}. \quad (3.6)$$

Полученное значение занесите в табл. 3.1.

9. Вычислите абсолютные ошибки отдельных измерений:

$$\Delta\lambda_1 = \bar{\lambda} - \lambda_1, \quad (3.7)$$

$$\Delta\lambda_2 = \bar{\lambda} - \lambda_2, \quad (3.8)$$

$$\Delta\lambda_3 = \bar{\lambda} - \lambda_3. \quad (3.9)$$

Результат вычислений занесите в табл. 3.1.

10. Вычислите доверительный интервал $\overline{\Delta\lambda}$ для длины волны лазерного излучения по формуле

$$\overline{\Delta\lambda} = t(\alpha, N) \cdot \sqrt{\frac{\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_2^2 + \Delta\lambda_3^2}{N \cdot (N-1)}}, \quad (3.10)$$

где α – надежность (задается преподавателем); N – число опытов, равное 3; $t(\alpha, N)$ – коэффициент Стьюдента (определяется по прил. 1).

Полученный результат занесите в табл. 3.1.

11. По результатам вычислений запишите значение для длины волны красного цвета в следующем виде:

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \overline{\Delta\lambda}. \quad (3.11)$$

12. Сравните полученный экспериментально результат длины волны красного цвета с табличным значением.

Таблица 3.1

Результаты измерений и вычислений

k	L, м	x, м	sin φ	λ, нм	$\bar{\lambda}$, нм	$\Delta\lambda_i$, нм	$\overline{\Delta\lambda}$, нм
1							
2							
3							

Пример выполнения расчетов к лабораторной работе 324

Экспериментальное определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

k	l, м	x, м	sin φ	λ, нм	$\bar{\lambda}$, нм	$\Delta\lambda_i$, нм	$\overline{\Delta\lambda}$, нм
1	0,45	0,046	0,102	599,76		13,07	
2	0,45	0,095	0,21	617,4	612,83	–4,57	12,59
3	0,45	0,143	0,317	621,32		–8,49	

1. Найдем период дифракционной решетки d :

$$d = \frac{1 \text{ мм}}{170} = \frac{10^{-3} \text{ м}}{170} = 0,00588 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5,88 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 5880 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 5880 \text{ нм}.$$

2. Вычислим синусы углов:

$$\sin \varphi = \frac{X}{L}.$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{X_1}{L} = \frac{0,046 \text{ м}}{0,45 \text{ м}} = 0,102.$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_2}{L} = \frac{0,095 \text{ м}}{0,45 \text{ м}} = 0,21.$$

$$\sin \varphi_3 = \frac{X_3}{L} = \frac{0,143 \text{ м}}{0,45 \text{ м}} = 0,317.$$

3. Найдем значение длины волны красного света:

$$\lambda = \frac{d \cdot X}{kL} = \frac{d \cdot \sin \varphi}{k}.$$

$$\lambda_1 = \frac{5880 \text{ нм} \cdot 0,102}{1} = 599,76 \text{ нм}.$$

$$\lambda_2 = \frac{5880 \text{ нм} \cdot 0,21}{2} = 617,4 \text{ нм}.$$

$$\lambda_3 = \frac{5880 \text{ нм} \cdot 0,317}{3} = 621,32 \text{ нм}.$$

4. Вычислим среднеарифметическое значение $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3}.$$

$$\bar{\lambda} = \frac{599,76 \text{ нм} + 617,4 \text{ нм} + 621,32 \text{ нм}}{3} = 612,83 \text{ нм}.$$

5. Вычислим абсолютные ошибки отдельных измерений $\Delta\lambda_i$:

$$\Delta\lambda_i = \bar{\lambda} - \lambda_i.$$

$$\Delta\lambda_1 = 612,83 \text{ нм} - 599,76 \text{ нм} = 13,07 \text{ нм}.$$

$$\Delta\lambda_2 = 612,83 \text{ нм} - 617,4 \text{ нм} = -4,57 \text{ нм}.$$

$$\Delta\lambda_3 = 612,83 \text{ нм} - 621,32 \text{ нм} = -8,49 \text{ нм}.$$

6. Определим стандартный доверительный интервал $S_{\Delta\lambda}$:

$$S_{\Delta\lambda} = \sqrt{\frac{\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_2^2 + \Delta\lambda_3^2}{N(N-1)}}.$$

$$S_{\Delta\lambda} = \sqrt{\frac{(13,07 \text{ нм})^2 + (-4,57 \text{ нм})^2 + (-8,49 \text{ нм})^2}{6}} =$$

$$= \sqrt{\frac{170,82 \text{ нм}^2 + 20,88 \text{ нм}^2 + 72,08 \text{ нм}^2}{6}} = 6,63 \text{ нм}.$$

7. Вычислим доверительный интервал $\Delta\bar{\lambda}$:

$$\Delta\bar{\lambda} = t(\alpha, N) \cdot S_{\Delta\lambda}.$$

$$t(\alpha, N) = t(0,8; 3) = 1,9.$$

$$\Delta\bar{\lambda} = 1,9 \cdot 6,63 \text{ нм} = 12,59 \text{ нм}.$$

8. Конечный результат записываем в виде:

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\bar{\lambda}.$$

$$\lambda = 612,83 \pm 12,59 \text{ нм}.$$

Контрольные вопросы

1. В чем различие спонтанного и индуцированного излучения? Объясните устройство и принцип работы неон-гелиевого лазера.

2. Опишите явление дифракции световой волны на дифракционной решетке. Что такое период дифракционной решетки? Запишите условие максимума дифракционной решетки.

3. Поясните методику экспериментального определения длины световой волны с помощью дифракционной решетки. Объясните, почему в данной лабораторной работе используется формула (3.4) для определения длины световой волны красного цвета.

4. Опишите, какая картина будет наблюдаться на экране, если дифракционную решетку осветить пучком белого света.

5*. Объясните, изменится ли характер дифракционного изображения, регистрируемого на экране, если использовать дифракционную решетку с большим числом штрихов на 1 мм.

6*. Опишите, как будет меняться дифракционная картина при перемещении дифракционной решетки ближе к экрану.

7*. Поясните, в каких интенсивно развивающихся в настоящее время отраслях находят применения лазеры.

4. КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Лабораторная работа 332

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: изучение основных законов фотоэлектрического эффекта, вольтамперных характеристик вакуумных и газонаполненных фотоэлементов, фотосопротивлений, фотоэлектрических свойств фотоэлементов.

Приборы и принадлежности: лабораторный стенд ЭС-6.

Краткие теоретические сведения

Кванты света при взаимодействии их с некоторыми веществами могут вырвать из атомов этих веществ электроны, которые таким образом окажутся свободными. Их называют *фотоэлектронами*, а само явление – *фотоэлектрическим эффектом*. Фотоэффект устанавливает непосредственную связь между электрическими явлениями и оптическим излучением. Впервые исследования фотоэффекта были проведены русским ученым Александром Столетовым.

В зависимости от судьбы вырванных электронов устанавливают три вида фотоэффекта:

1. При воздействии электромагнитного излучения, когда фотоэлектроны остаются внутри материала и происходит их переход из связанного состояния в свободное, наблюдается явление, известное как *внутренний фотоэффект*. При этом повышается проводимость полупроводника или диэлектрика. Разновидностью внутреннего фотоэффекта является *вентильный фотоэффект*, приводящий к возникновению фото-ЭДС при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла без внешнего электрического поля.

2. Если же под воздействием электромагнитного излучения электроны вылетают из твердого тела (металла, полупроводника, диэлектрика) в вакуум или газ, то имеет место *внешний фотоэффект*. Процесс разряда при облучении искрового промежутка ультрафиолетовым излучением впервые наблюдал Генрих Герц еще в 1887 г.

3. В том случае, когда фотоэлектроны покидают пределы тела, переходя через поверхность раздела в другое твердое тело (полупроводник) или жидкость (электролит), происходит *фотоэффект в запирающем слое*.

В данной работе используют следующие фотоэлементы: селеновый с запирающим слоем, газонаполненный и вакуумный (рис. 4.1).

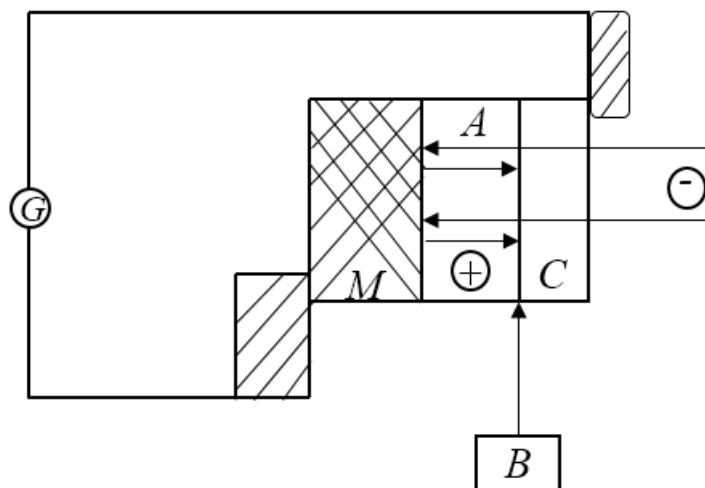


Рис. 4.1. Схема устройства селенового фотоэлемента

Селеновый фотоэлемент состоит из железной пластинки M , покрытой слоем селена A , на который нанесен сверху полупрозрачный слой золота или другого металла C . На границе между селеном и золотым слоем образуется запирающий слой B . При соединении слоя золота посредством гальванометра G с железной пластиной и последующем облучении селена светом происходит фотоэлектронная эмиссия, в ходе которой фотоны выбивают электроны из селена. Эти электроны затем переносятся к слою золота через барьерный (запирающий) слой. Данный электрический ток классифицируется как *фототок*. Электроны могут переходить из одной пластины в другую только в одном направлении (от селена к золоту), обратный же переход для них закрыт, отсюда и название – запирающий слой. В таком фотоэлементе лучистая энергия падающего света будет преобразовываться непосредственно в энергию электрического тока.

Фотоэффект – явление квантовое и не может быть объяснено с точки зрения обычной волновой теории света. Так, один из законов фотоэффекта утверждает, что энергия выбиваемых электронов зависит только от длины волны падающего света, т. е. от его цвета, и не зависит от освещенности на поверхности металла. Но освещенность как раз и связана с плотностью энергии в падающей световой волне, поэтому

если волна непрерывна, то непонятно, почему волны с различной плотностью энергии могут сообщать электронам одинаковые скорости.

С позиции квантового подхода рассмотрение данного вопроса приобретает совершенно иной характер. В соответствии с теорией, предложенной А. Эйнштейном (1905 г.), каждый фотон способен взаимодействовать исключительно с одним электроном. Экспериментальные исследования позволили сформулировать три фундаментальных закона внешнего фотоэлектрического эффекта.

Первый закон фотоэффекта гласит: при фиксированной частоте падающего излучения и малой интенсивности его световых лучей число вырванных с поверхности вещества электронов пропорционально световому потоку (*закон Столетова*).

В соответствии с фотонными представлениями свет не только излучается, но и поглощается отдельными порциями – квантами. Энергия кванта определяется по соотношению Планка

$$\varepsilon = h\nu, \quad (4.1)$$

где h – постоянная Планка ($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); ν – частота световой волны.

Если какой-либо из квантов вырывает из металла один электрон, то, сколько бы ни было квантов в падающей волне (т. е. какова бы ни была ее интенсивность), всем вышедшим электронам будет сообщена одинаковая энергия, даваемая соотношением (4.1). Эта энергия расходуется на работу по вырыванию электрона из металла (работу выхода) и на сообщение ему некоторой кинетической энергии после выхода. Если обозначить работу выхода через A , массу электрона через m , а его скорость через V , то закон сохранения энергии дает нам равенство

$$\varepsilon = h\nu = A + \frac{mV^2}{2}. \quad (4.2)$$

Это формула Эйнштейна, подтвержденная на опыте.

Из уравнения (4.2) следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов с увеличением частоты падающего излучения линейно возрастает, при этом она не зависит от интенсивности падающего излучения (*второй закон фотоэффекта*).

В тоже время из равенства (4.2) видно, что если энергия кванта $h\nu$ будет меньше, чем работа выхода A , то фотоэффект не возможен, так как при этом кинетическая энергия $\frac{mV^2}{2}$ получается отрицательной, а скорость – мнимой величиной (*третий закон фотоэффекта*).

Заметим, что фотоэффект начинается при такой частоте ν_0 , при которой энергия кванта в точности равна работе выхода:

$$h\nu_0 = A_{\text{вых}}. \quad (4.3)$$

Подставим в эту формулу вместо частоты ν_0 ее выражение через скорость света c и длину волны λ_0 . Тогда получим

$$\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}. \quad (4.4)$$

Следовательно, подставляя выражение (4.4) в формулу (4.3), имеем

$$h \frac{c}{\lambda_0} = A_{\text{вых}}, \quad (4.5)$$

где λ_0 – это та длина волны, при которой фотоэффект становится возможным, она называется красной границей фотоэффекта, так как электроны вырываются лишь при выполнении следующего условия:

$$\nu \geq \nu_0 \quad \text{или} \quad \lambda \leq \lambda_0. \quad (4.6)$$

На явлении фотоэффекта основано действие фотоэлементов, способных преобразовать энергию излучения в электрическую.

Рассмотрим принципиальное устройство простейшего фотоэлемента с внешним фотоэффектом – вакуумный фотоэлемент и электрическую схему его включения (рис. 4.2).

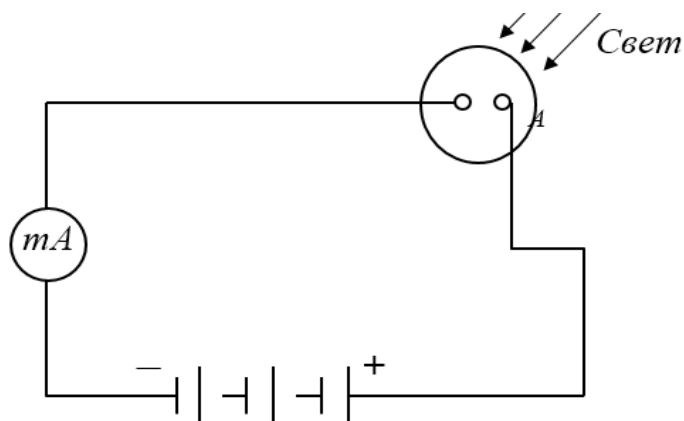


Рис. 4.2. Электрическая схема включения вакуумного фотоэлемента

Вакуумный фотоэлемент – это стеклянный баллон с откаченным воздухом, на внутренней поверхности которого нанесен слой щелочного металла. Этот слой служит катодом, в котором происходит фотоэффект. Остальная часть поверхности является окошком для падающего света, кроме того, через нее в баллон вводится второй электрод – анод фотоэлемента.

Между анодом и катодом подается положительная разность потенциалов. Фотоэлектрон от катода устремляется к аноду и замыкает

внешнюю цепь, появляется фототок. Сила фототока зависит не только от длины волны падающего света, называемой спектральной характеристикой фотоэлемента и представляющей собой зависимость

$$I = f(\lambda),$$

но и от приложенного напряжения.

Зависимость силы фототока от приложенного напряжения к фотоэлементу при постоянной длине волны и световом потоке на фотоэлементе называется *вольтамперной характеристикой* этого фотоэлемента. Она во многом сходна с вольтамперной характеристикой обычного диода. Так же, как и у диода, и по тем же самым причинам на ней имеются восходящий участок и участок насыщения.

Описание лабораторной установки

В данной лабораторной работе используется стенд ЭС-6, который представляет собой металлическую переднюю панель, закрепленную к корпусу. На передней панели нанесены основные узлы принципиальной схемы. Блок питания стенда выполнен на отдельном шасси и крепится за передней панелью к нижней части каркаса. Электрическая связь передней панели с блоком питания осуществляется с помощью разъема.

При снятии статических вольтамперных характеристик вакуумного фотоэлемента СЦВ-3 тумблер В₇ устанавливается в положении «Вакуумный». Тумблером СЦВ-3 устанавливается световой поток F₁, остальные тумблеры внизу должны быть выключены (F = 0). Регулируя напряжение питания U_A резистором, устанавливаются требуемые напряжения от 0 до 250 В на аноде фотоэлемента, при этом снимаются значения тока через фотоэлемент I_A по амперметру (mA). Тумблером СЦВ-3 устанавливается световой поток F₂ и снимается новая вольтамперная характеристика для потока F₂.

Для снятия статистических вольтамперных характеристик газонаполненного элемента тумблер В₇ устанавливается в положение F₁. Измерение вольтамперных характеристик осуществляется по аналогичной методике, которая использовалась при исследовании вакуумного фотоэлемента.

Для снятия вольтамперных характеристик газонаполненного фотосопротивления ФСК-Г1 необходимо тумблеры СЦВ-3 и ЦГ-3 установить в среднее положение (F = 0), а тумблер ФСК-Г1 – в положение F₁.

Регулировкой напряжения резистором устанавливаются различные значения от 0 до 250 В, которые отмечаются прибором U₁ (V). Значение тока через фотосопротивление измеряется по прибору I₂ (mA). После

этого требуется инициировать поток F_2 и произвести регистрацию новой вольтамперной характеристики. Затем переключатель ФСК-Г1 переводится в центральное положение.

При проведении экспериментальных исследований необходимо учитывать, что на фоточувствительный элемент воздействует не только излучение исследуемого источника света, но и внешние источники оптического излучения. В связи с этим для повышения точности измерений целесообразно минимизировать влияние посторонних факторов, таких как естественный дневной свет, проникающий через оконные проемы (особенно в условиях солнечной погоды), а также искусственное освещение внутри помещения.

Измерения и обработка результатов

1. Ознакомьтесь со стендом ЭС-6 и схемой включения фотозлементов согласно описанию лабораторной установки.

2. На лабораторном стенде ЭС-6 по ступеням постепенно увеличивайте напряжение на фотоз элементе через каждые 10 В на интервале от 0 до 100 В, а затем – через каждые 50 В на интервале от 100 до 200 В, каждый раз записывая соответствующие значения силы тока по показаниям микроамперметра. Далее аналогичные измерения проведите в обратном порядке, т. е. уменьшая рабочее напряжение на фотоз элементе до нуля с тем же интервалом.

Полученные данные занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты измерений и вычислений

F	U	0	10	20	30	40	50	100	150	200
F_1	$I_A \uparrow$, при повышении напряжения									
F_1	$I_A \downarrow$, при понижении напряжения									
	I_{Acp}									
F_2	$I_A \uparrow$									
F_2	$I_A \downarrow$									
	I_{Acp}									

3. По данным табл. 4.1 постройте графики зависимости

$$I_A = f(U)$$

для обоих значений светового потока на фотоз элементе. При построении графиков для каждого значения светового потока на фотоз элементе

необходимо учитывать средние значения силы тока при данном значении напряжения.

4. Повторите опыт с газонаполненным фотоэлементом типа ЦГ-3 при двух значениях светового потока F_1 и F_2 . Результаты показаний приборов занесите в таблицы, аналогичные табл. 4.1.

6. В соответствии с полученными экспериментальными данными, внесенными в табл. 4.2 и 4.3, начертите графики зависимости силы тока от напряжения:

$$I = f(U).$$

7. Постройте вольтамперные характеристики фотосопротивления ФСК-Г1 при $F_1 = 0$, $F_2 = 0$; $F_1 = (1 \text{ лм})$; $F = F_2 = (2 \text{ лм})$. Определите чувствительность по потоку, мкА/лм:

$$K = \frac{dI}{dF} \quad (4.7)$$

при $U = 30 \text{ В}$, а также чувствительность по напряжению, мкА/В:

$$g = \frac{dI}{dU} \quad (4.8)$$

при $F = \text{const.}$

Пример выполнения расчетов к лабораторной работе 332

Определение основных характеристик фотоэлементов

1. Рассмотрим экспериментальные данные для вакуумного фотоэлемента.

Экспериментальные данные для вакуумного фотоэлемента

F	U	0	10	20	30	40	50	100	150	200
F_1	$J_A \uparrow$	0	1	2	3	4	7	14,5	20	22
F_1	$J_A \downarrow$	0	2	5	8	10	12	18	21	22
	$J_{A \text{ ср. } F_1}$	0	1,5	3,5	5,5	7	9,5	16,25	20,5	22
F_2	$J_A \uparrow$	0	3,5	6	9	12	15	28	38	43
F_2	$J_A \downarrow$	0	4	8	12	15	19	33	40	43
	$J_{A \text{ ср. } F_2}$	0	3,75	7	10,5	13,5	17	30,5	39	43

2. Определим чувствительность: по потоку K ; по напряжению g .

$$K = \frac{dJ}{dF}$$

при $U = 30 \text{ В}$.

$$dJ = J_{A_{\text{ср. } F_2}} - J_{A_{\text{ср. } F_1}},$$

$$dJ = 10,5 \text{ мкА} - 5,5 \text{ мкА} = 5 \text{ мкА}.$$

$$dF = 2 \text{ лм} - 1 \text{ лм} = 1 \text{ лм}.$$

Тогда

$$K = \frac{5 \text{ мкА}}{1 \text{ лм}} = 5 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}.$$

$$g = \frac{dJ}{dU}.$$

При $F_1 = \text{const}$

$$dJ = J_{A_{\text{ср. } F_1} \text{ при } U = 30 \text{ В}} - J_{A_{\text{ср. } F_1} \text{ при } U = 20 \text{ В}},$$

$$dJ(F_1) = 5,5 \text{ мкА} - 3,5 \text{ мкА} = 2 \text{ мкА}.$$

При $F_2 = \text{const}$

$$dJ = J_{A_{\text{ср. } F_2} \text{ при } U = 30 \text{ В}} - J_{A_{\text{ср. } F_2} \text{ при } U = 20 \text{ В}},$$

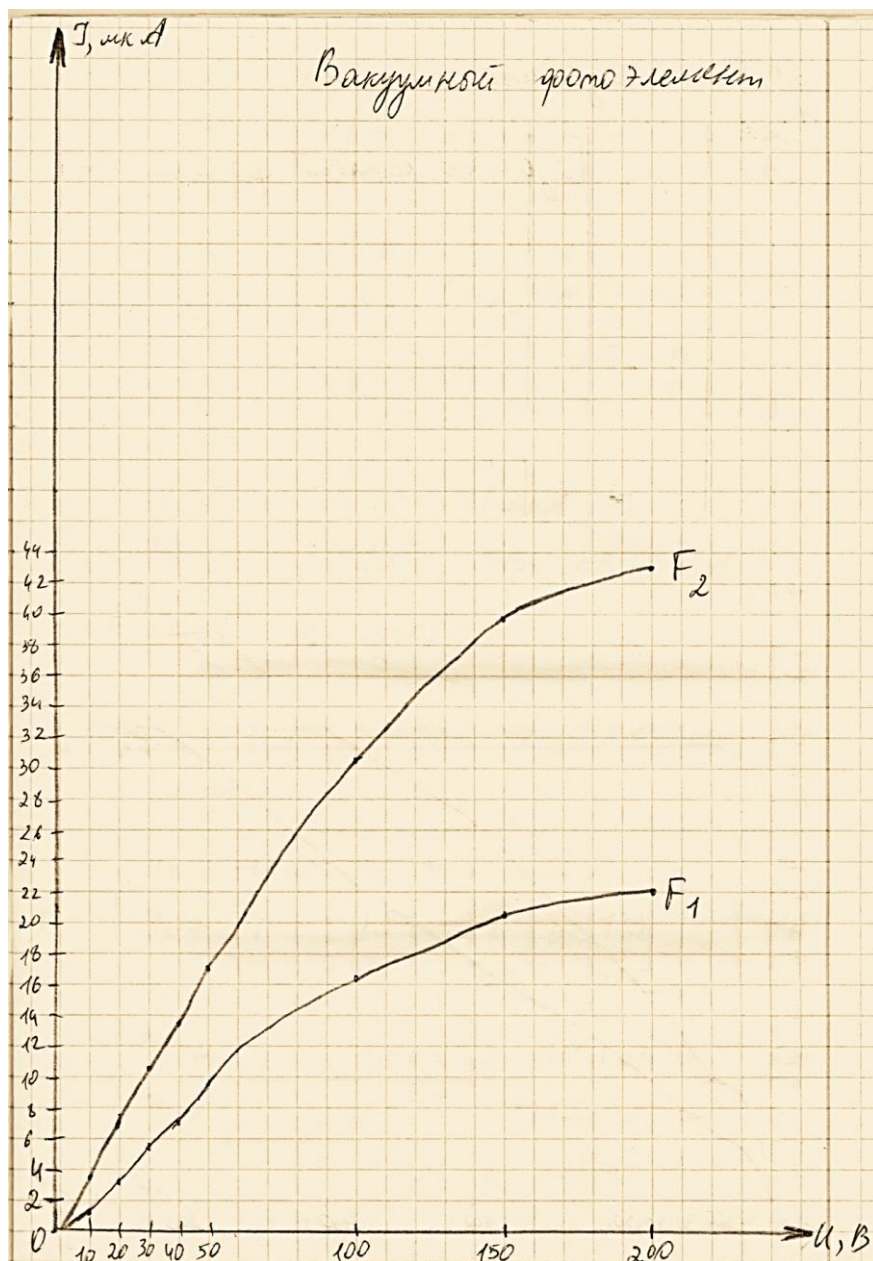
$$dJ(F_2) = 10,5 \text{ мкА} - 7 \text{ мкА} = 3,5 \text{ мкА},$$

$$dU = 30 \text{ В} - 20 \text{ В} = 10 \text{ В}.$$

$$g_1 = \frac{2 \text{ мкА}}{10 \text{ В}} = 0,2 \frac{\text{мкА}}{\text{В}},$$

$$g_2 = \frac{3,5 \text{ мкА}}{10 \text{ В}} = 0,35 \frac{\text{мкА}}{\text{В}}.$$

3. По экспериментальным значениям построим график для вакуумного фотоэлемента.



4. Далее рассмотрим экспериментальные данные для газонаполненного фотоэлемента (табл. П6.2).

Экспериментальные данные для газонаполненного фотоэлемента

F	U	0	10	20	30	40	50	100	150	200
F_1	$J_A \uparrow$	0	4	5	7	9	10	18	25	30
F_1	$J_A \downarrow$	0	3	4	5	7	8	13	19	30
	$J_A \text{ ср.}$	0	3,5	4,5	6	8	9	15,5	22	30
F_2	$J_A \uparrow$	0	8	9	12	14	16	26	33	39
F_2	$J_A \downarrow$	0	6	7	10	12	14	23	30	39
	$J_A \text{ ср.}$	0	7	8	11	13	15	24,5	31,5	39

5. Определим чувствительность: по потоку K ; по напряжению g .

$$K = \frac{dJ}{dF}$$

при $U = 30 \text{ В}$.

$$dJ = J_{A \text{ ср. } F_2} - J_{A \text{ ср. } F_1},$$

$$dJ = 11 \text{ мкА} - 6 \text{ мкА} = 5 \text{ мкА},$$

$$dF = 2 \text{ лм} - 1 \text{ лм} = 1 \text{ лм}.$$

Тогда

$$K = \frac{5 \text{ мкА}}{1 \text{ лм}} = 5 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}.$$

При $F_1 = \text{const}$

$$g = \frac{dJ}{dU}.$$

$$dJ = J_{A \text{ ср. } F_1 \text{ при } U = 30 \text{ В}} - J_{A \text{ ср. } F_1 \text{ при } U = 20 \text{ В}},$$

$$dJ(F_1) = 6 \text{ мкА} - 4,5 \text{ мкА} = 1,5 \text{ мкА}.$$

При $F_2 = \text{const}$

$$g = \frac{dJ}{dU}.$$

$$dJ = J_{A \text{ ср. } F_2 \text{ при } U = 30 \text{ В}} - J_{A \text{ ср. } F_2 \text{ при } U = 20 \text{ В}},$$

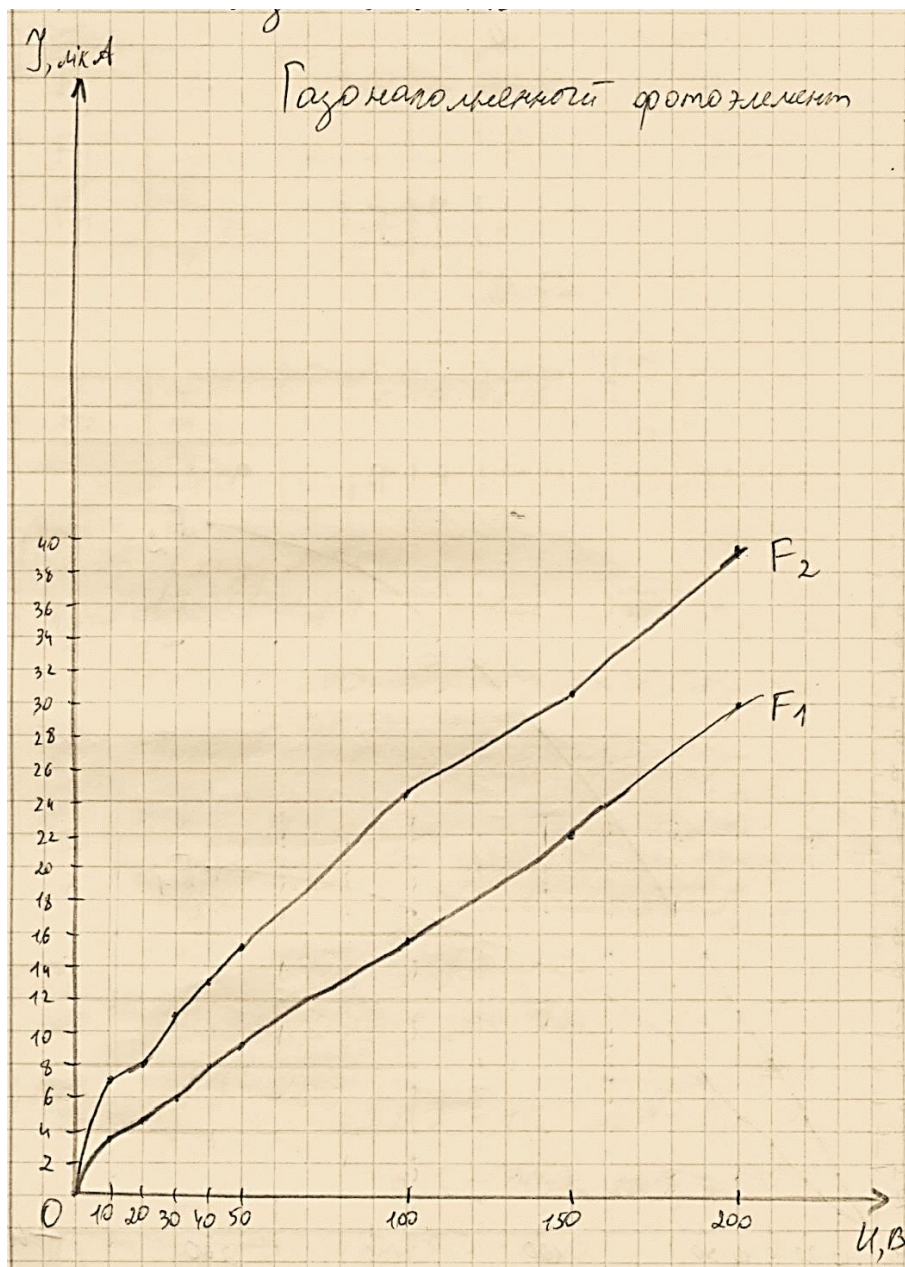
$$dJ(F_2) = 11 \text{ мкА} - 8 \text{ мкА} = 3 \text{ мкА}.$$

$$dU = 30 \text{ В} - 20 \text{ В} = 10 \text{ В}.$$

$$g_1 = \frac{1,5 \text{ мкА}}{10 \text{ В}} = 0,15 \frac{\text{мкА}}{\text{В}},$$

$$g_2 = \frac{3 \text{ мкА}}{10 \text{ В}} = 0,3 \frac{\text{мкА}}{\text{В}}.$$

6. По экспериментальным значениям построим график для газонаполненного фотоэлемента.



Контрольные вопросы

1. Что такое фотоэффект? Сформулируйте основные его законы.
2. Какие виды фотоэффекта вы знаете? В чем заключается их отличие?
3. Что характеризует понятие «работа выхода»? Как определяется понятие «красная граница фотоэффекта»?
4. В чем состоит уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта?
5. Объясните, как изменяется сила тока в цепи фотоэлемента при увеличении светового потока.
6. Расскажите о методиках определения чувствительности: а) по потоку; б) по напряжению.

Лабораторная работа 335

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА

Цель работы: комплексное изучение основных понятий и законов теплового излучения; знакомство с устройством и принципом работы оптического пирометра; освоение методики косвенного определения температуры накаливаемого тела и постоянной Стефана–Больцмана с использованием оптического пирометра.

Приборы и принадлежности: оптический пирометр с исчезающей нитью, электрическая лампа, вольтметр, амперметр, автотрансформатор.

Краткие теоретические сведения

Испускание телом электромагнитных волн за счет его внутренней энергии называется *тепловым излучением*.

Атомы и молекулы могут находиться в разных энергетических состояниях. При поглощении энергии извне они переходят на более высокий энергетический уровень. Такое состояние называется *возбужденным*, но оно является неустойчивым. Атомы и молекулы находятся в устойчивом состоянии при минимизации их внутренней энергии, что соответствует так называемому *нормальному* состоянию.

В возбужденном состоянии атомы и молекулы долго находиться не могут, поэтому они самопроизвольно переходят в нормальное состояние, излучая при этом порцию энергии, равную

$$\varepsilon = h\nu, \quad (4.9)$$

где ν – частота излучения; $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Тепловое излучение является равновесным излучением, т. е. тело излучает такую же энергию, какую поглощает извне. Все остальные виды свечения, возбуждаемые за счет любого вида энергии, кроме внутренней, являются неравновесными и объединяются под общим названием *люминесценция*.

Твердые тела излучают непрерывный спектр электромагнитных волн. Это объясняется тем, что энергетические уровни атомов твердого тела образуют разрешенные энергетические зоны, состоящие из тесно расположенных энергетических уровней порядка $N \sim 10^{20}$.

Ширина энергетической зоны составляет несколько электрон-вольт ($1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж). Расстояние между соседними уровнями в зоне лежит в пределах, близких к 10^{-20} эВ. Возбуждаясь под действием теплового движения и переходя затем в состояние с меньшей энергией, атомы будут излучать практически непрерывный спектр.

Тепловое излучение наблюдается у всех тел, находящихся при температуре выше абсолютного нуля. Однако при невысоких температурах излучаются лишь длинноволновые инфракрасные лучи.

Для количественной оценки процессов теплового излучения введем ряд физических величин.

Одной из основных характеристик теплового излучения является *спектральная поверхностная плотность* излучения (спектральная излучательная способность) q_λ , Вт/м³:

$$q_\lambda = \frac{dQ_\lambda}{S \cdot dt \cdot d\lambda}. \quad (4.10)$$

В числителе формулы (4.10) выражение dQ_λ обозначает энергию электромагнитных волн, излучаемых с поверхности площадью S в интервале длины волн от λ до $\lambda + d\lambda$, в течение промежутка времени dt .

Интегральная поверхностная плотность излучения (энергетическая светимость) – это количество лучистой энергии всех длин волн, испускаемой единицей поверхности тела в единицу времени во всех направлениях в пределах полусферы, Вт/м³:

$$q = \frac{\Delta Q}{S \cdot \Delta t}, \quad (4.11)$$

где ΔQ – энергия волн всех частот, излучаемая с поверхности площадью S за время Δt .

Между интегральной и спектральной плотностью излучения существует следующая взаимосвязь:

$$q = \int_0^\infty q_\lambda d\lambda. \quad (4.12)$$

Под *спектральной поглощательной способностью* тела понимается доля поглощенной спектральной плотности излучения поверхностью данного тела $q_{\lambda \text{ пог}}$, к падающему на него излучению $q_{\lambda \text{ пад}}$:

$$a_\lambda = \frac{q_{\lambda \text{ погл}}}{q_{\lambda \text{ пад}}}. \quad (4.13)$$

Если тело полностью поглощает падающее на него излучение, то оно называется *абсолютно черным телом* (АЧТ). Для АЧТ спектральная поглощательная способность равна единице, т. е. $a_\lambda = 1$ для всех длин волн.

Тело называют *серым*, если его поглощательная способность меньше единицы, но одинакова для всех длин волн ($a_\lambda = \text{const} < 1$).

Закон Кирхгофа: для всех тел, имеющих одинаковую температуру и длину волны, отношение величины спектральной излучательной способности к поглощательной способности одинаково и является функцией длины волны и температуры:

$$\frac{q_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = f(\lambda, T). \quad (4.14)$$

Так как для АЧТ поглощательная способность равна единице ($a_\lambda = 1$), из закона Кирхгофа вытекает

$$f(\lambda, T) = q_{\lambda b}. \quad (4.15)$$

В формуле (4.15) используется индекс b , означающий, что это выражение относится к АЧТ, следовательно, обозначение $q_{\lambda b}$ соответствует спектральной излучательной способности АЧТ. В природе не существует абсолютно черного тела, но некоторые вещества по своим свойствам можно считать близкими к нему, например сажу.

В качестве модели АЧТ по В. А. Михельсону обычно рассматривают маленькое отверстие в стенке замкнутой полости, сделанной из любого материала. Луч, падающий извне на это отверстие, попадает внутрь полости, а затем многократное отражается от его стенок, теряя при этом энергию за счет поглощения. Поэтому, если луч и сможет выйти обратно наружу, то его интенсивность будет равна практически нулю. Таким образом, отверстие в полости полностью поглощает все падающие на него лучи. Следовательно, замкнутая полость с небольшим отверстием, внутренняя поверхность которой зачернена, может являться идеальной моделью АЧТ.

Рассмотрим законы излучения АЧТ, установленные в физике.

Закон Стефана–Больцмана: энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$R_b = \sigma T^4, \quad (4.16)$$

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

Закон смещения Вина: длина волны λ_0 , на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости (или максимум излучательной способности) АЧТ, обратно пропорциональна абсолютной температуре тела:

$$\lambda_0 = \frac{\vartheta}{T}, \quad (4.17)$$

где $\vartheta = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

Соотношение (4.17) называют законом смещения Вина, потому что оно показывает смещение положения максимума функции $q_{\lambda,T}$ по мере возрастания температуры в область коротких длин волн. Примерные кривые распределения излучательной способности по длинам волн в спектре АЧТ при разных температурах тела представлены схематично на рис. 4.3, из которого видно, что при некоторой длине волны λ_{m1} спектральная излучательная способность АЧТ имеет максимум, который с увеличением температуры смещается в сторону коротких волн.

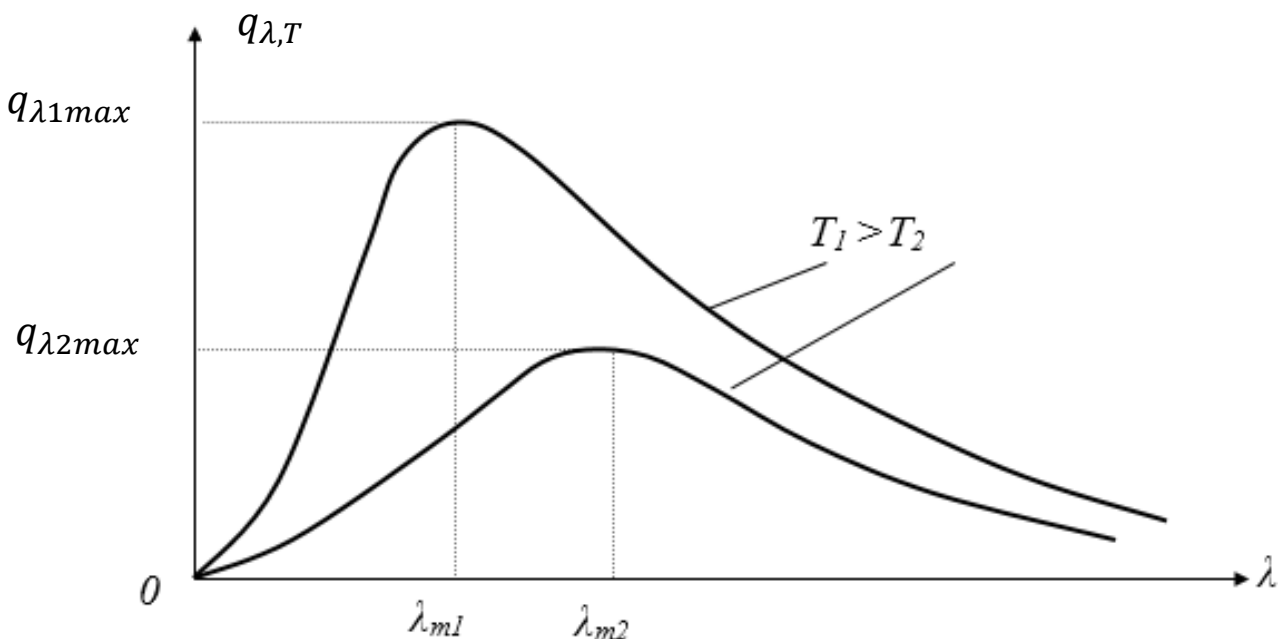


Рис. 4.3. Кривые распределения излучательной способности по длинам волн в спектре АЧТ при разных температурах

Рассмотренные нами ранее закономерности излучения АЧТ качественно справедливы также для тел, которые не являются абсолютно черными.

Например, энергетическая светимость серого тела может быть определена следующим выражением:

$$R_T = \alpha \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (4.18)$$

где α – коэффициент черноты тела, который может быть меньше единицы (это зависит от состояния поверхности тела, его формы и химического состава); σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$).

В данной лабораторной работе используется упрощенный метод определения постоянной Стефана–Больцмана, основанный на оптическом методе измерения высоких температур (в области 1500 К и выше) без контакта с исследуемым телом (оптическая пирометрия).

Описание лабораторной установки

Пирометрами называются приборы, измеряющие температуру нагретого тела по интенсивности его теплового излучения в оптическом диапазоне спектра.

Рассмотрим два тела с разными начальными температурами T_1 и T_2 и одинаковыми величинами поглощательной способности. Если первое тело с меньшей температурой (например, нить накала лампы пирометра) рассмотреть на фоне излучения второго тела, то оно будет казаться темным. С приближением значения температуры T_1 к температуре T_2 контрастность изображения уменьшается, и при равенстве температур изображения этих тел сливаются (нить пирометра как бы исчезает на фоне излучающего тела).

Устройство пирометра показано на рис. 4.4.

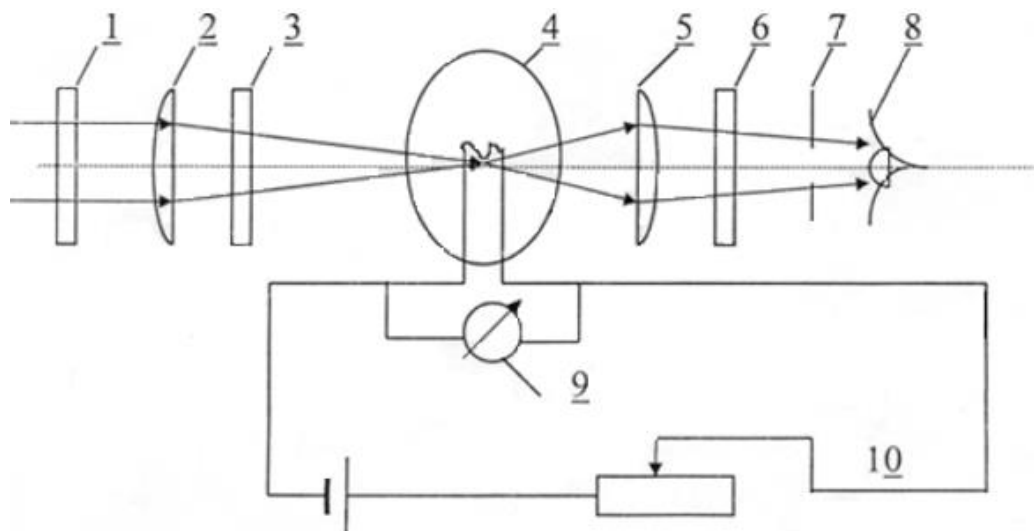


Рис. 4.4. Схема устройства пирометра с исчезающей нитью накала:
1 – накаливаемое тело; 2 – объектив; 3 – ослабляющий светофильтр;
4 – фотометрическая лампа; 5 – окуляр; 6 – красный светофильтр;
7 – диафрагма; 8 – глаз наблюдателя; 9 – прибор, измеряющий температуру; 10 – реостат

В простейшем визуальном яркостном пирометре с исчезающей нитью объектив фокусирует изображение исследуемого тела на плоскость, в которой расположена нить специальной фотометрической

лампы. Через окуляр и красный фильтр, позволяющий выделить узкую спектральную область длины волны $\lambda \approx 0,65$ мкм, нить рассматривают на фоне изображения тела. Изменяя ток накала нити, добиваются, чтобы яркости ее и исследуемого тела были одинаковыми. Шкалу прибора, регистрирующего ток накала, градуируют обычно по модели АЧТ ($^{\circ}\text{C}$). В момент выравнивания яркости нити и тела прибор показывает так называемую яркостную температуру (T_B) – это температура АЧТ, яркость которого в данном спектральном диапазоне равняется яркости исследуемого тела. Если бы наблюдаемое тело было абсолютно черным, то измеренная пирометром температура T_B являлась бы его истинной температурой. Связь между яркостной и истинной температурами тела устанавливается с помощью следующего соотношения:

$$T = \frac{C_1 T_B}{\lambda T_B \ln a_\lambda + C_1}, \quad (4.19)$$

где $C_1 = \frac{hc}{R} = 1,432$ см·град.

Спектральная поглощательная способность (a_λ) для вольфрама в области температур от 900 до 2000 $^{\circ}\text{C}$ равна 0,45 для средней длины волны спектрального участка, пропускаемого светофильтром пирометра $\lambda = 0,650$ мкм.

Для расширения пределов измерения температур пирометр имеет ослабляющий нейтральный светофильтр З, который ослабляет в одинаковой степени все длины волн. Использование этого светофильтра позволяет при изменении температур от 1400 до 2000 $^{\circ}\text{C}$ ослабить излучение исследуемого тела и пользоваться более низкими температурами нити лампы пирометра.

Электрическая схема установки приведена на рис. 4.5.

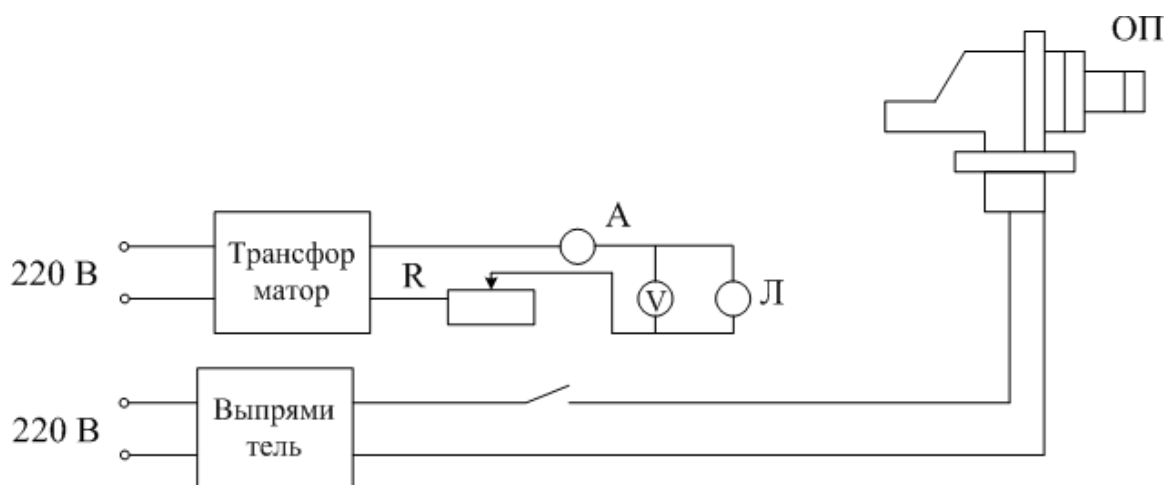


Рис. 4.5. Электрическая схема экспериментальной установки

Объектом исследования в данной работе является вольфрамовая нить лампы накаливания Л, температура которой может регулироваться реостатом R. При помощи амперметра и вольтметра измеряются сила тока и напряжение на зажимах лампы. Температура нити лампы измеряется оптическим пирометром ОП.

Измерения и обработка результатов

1. Изучите устройство пирометра (рис. 4.6).

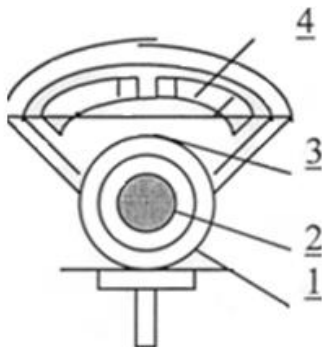


Рис. 4.6. Внешний вид пирометра: 1 – кольцо реостата; 2 – труба окуляра; 3 – кнопка введения красного светофильтра; 4 – шкала пирометра

2. Кольцо 1 реостата поверните против часовой стрелки до упора. Кольцо необходимо поворачивать без усилия, иначе можно вывести пирометр из строя.

3. Включите прибор в сеть. При помощи автотрансформатора установите заданное преподавателем первое значение напряжения на исследуемой лампе. Занесите в табл. 4.2 значения напряжения, полученного по показаниям вольтметра, и силу тока в лампе, измеренную амперметром. Перемещая тубус объектива, добейтесь четкого изображения исследуемой нити накаливания лампы.

4. Поворотом кольца реостата по часовой стрелке доведите накал нити фотометрической лампы пирометра приблизительно до 1200 °С по шкале 4.

5. Введите красный светофильтр окуляра для получения монохроматического света. Трубу 2 окуляра плавно переместите вдоль оси до тех пор, пока изображение дугообразной нити фотометрической лампы не будет видно совершенно четко.

6. Направьте объектив пирометра на исследуемую лампу, температура нити которой подлежит измерению и, взявшись рукой за накаланный конец тубуса объектива, путем его перемещения добейтесь

четкого изображения нити исследуемой лампы одновременно с нитью фотометрической лампы (см. рис. 4.6). При этом дугообразную вершину нити фотометрической лампы необходимо совместить с горизонтальной нитью исследуемой лампы.

7. Регулируя интенсивность свечения нити фотометрической лампы посредством вращения кольца реостата 1, необходимо достичь идентичного уровня светимости между нитью лампы пирометра и испытуемой лампой. При этом вершина дуговой нити фотометрической лампы визуально сливается с центральной областью нити испытуемого источника света.

8. Произведите отсчет яркостной температуры T_B (К). В зависимости от того, введен ли красный светофильтр с помощью кнопки 3 или нет, отсчет ведут по верхней или нижней шкале 4. Значение температуры (К) занесите в табл. 4.2.

9. Операции, описанные в пп. 5–8, повторите при трех различных значениях напряжения на фотометрической лампе пирометра, выбранных так, чтобы температура нити лампы лежала в пределах 1000–2000 °С. Установку напряжения произведите с помощью трансформатора путем вращения рукоятки на верхней панели его корпуса.

10. Рассчитайте истинные температуры T нити лампы для каждой силы тока по формуле (4.19), полученные значения занесите в табл. 4.2.

11. Мощность, излучаемая с единицы площади поверхности нити исследуемой лампы при измеренных температурах, равна количеству энергии, теряемой нитью лампы за секунду, поэтому в соответствии с законом Стефана–Больцмана получаем

$$\frac{I \cdot U}{S} = \sigma(T^4 - T_0^4), \quad (4.20)$$

где T_0 – температура окружающей среды (определяется по термометру в аудитории); S – площадь поверхности нити лампы ($S = 0,9 \text{ см}^2$).

Таким образом, постоянную Стефана–Больцмана можно вычислить по формуле

$$\sigma = \frac{IU}{ST_0^4 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^4 - 1 \right]}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4. \quad (4.21)$$

12. Определите среднеарифметическое значение постоянной Стефана–Больцмана по формуле

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_i^n \sigma_i}{n}, \quad (4.22)$$

где n – количество опытов.

13. Вычислите абсолютные ошибки для каждого опыта:

$$\Delta\sigma_i = \bar{\sigma} - \sigma_i. \quad (4.23)$$

14. Рассчитайте доверительный интервал $\Delta \bar{\sigma}$ по формуле.

$$\overline{\Delta\sigma} = t(\alpha, n) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\sigma_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (4.24)$$

где $t(\alpha, n)$ – коэффициент Стьюдента, который находится по прил. 1; n – количество опытов.

15. Полученные по формулам (4.22)–(4.24) результаты вычислений занесите в табл. 4.2.

16. Найденное по результатам опытов среднее значение постоянной Стефана–Больцмана ($\bar{\sigma}$) сравните с его теоретическим значением $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$. Определите возможные причины погрешностей в данной лабораторной работе.

Таблица 4.2

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	I, А	U, В	T ₀ , К	T _в , К	T, К	σ , Вт/м ² К ⁴	$\Delta\sigma$, Вт/м ² К ⁴	$\Delta\bar{\sigma}$, Вт/м ² К ⁴
1								
2								
3								
Ср.								

Пример выполнения расчетов к лабораторной работе 335

**Изучение оптического пирометра и экспериментальное
определение постоянной Стефана–Больцмана**

Экспериментальное определение постоянной Стефана–Больцмана

№	J, А	U, В	T ₀ , К	T _в , К	$\sigma, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$	$\Delta\sigma, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$
1	0,24	90	296	1620	$4,62 \cdot 10^{-8}$	$-0,34 \cdot 10^{-8}$
2	0,26	100	296	1720	$4,37 \cdot 10^{-8}$	$-0,09 \cdot 10^{-8}$
3	0,28	110	296	1850	$3,87 \cdot 10^{-8}$	$0,41 \cdot 10^{-8}$
Ср.	0,26	100	296	1730	$4,28 \cdot 10^{-8}$	

1. Рассмотрим температуру t в помещении, которая на данный момент составляет $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Представим эту температуру по абсолютной шкале:

$$T = t\text{ }^{\circ}\text{C} + 273 = 23\text{ }^{\circ}\text{C} + 273 = 296\text{ K}.$$

Площадь поверхности нити исследуемой лампы S при измеренных температурах равна $0,000068\text{ м}^2$.

2. Подставляя полученные экспериментальные данные в формулу (4.21), произведем расчет постоянной Стефана–Больцмана для каждого опыта:

$$\sigma_1 = \frac{0,24\text{ A}\cdot 90\text{ B}}{0,000068\text{ м}^2\cdot 296^4\text{ K}\cdot \left[\left(\frac{1620\text{ K}}{296\text{ K}}\right)^4 - 1\right]} = 4,62 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4},$$

$$\sigma_2 = \frac{0,26\text{ A}\cdot 100\text{ B}}{0,000068\text{ м}^2\cdot 296^4\text{ K}\cdot \left[\left(\frac{1720\text{ K}}{296\text{ K}}\right)^4 - 1\right]} = 4,37 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4},$$

$$\sigma_3 = \frac{0,28\text{ A}\cdot 110\text{ B}}{0,000068\text{ м}^2\cdot 296^4\text{ K}\cdot \left[\left(\frac{1850\text{ K}}{296\text{ K}}\right)^4 - 1\right]} = 3,87 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4}.$$

2. Найдем среднеарифметическое значение $\bar{\sigma}$:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3},$$

$$\bar{\sigma} = \frac{4,62 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4} + 4,37 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4} + 3,87 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4}}{3} = 4,28 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4}.$$

3. Вычислим абсолютные ошибки отдельных измерений $\Delta\sigma_i$:

$$\Delta\sigma_i = \bar{\sigma} - \sigma_i,$$

$$\Delta\sigma_1 = 4,28 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4} - 4,62 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4} = -0,34 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4},$$

$$\Delta\sigma_2 = 4,28 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4} - 4,37 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4} = -0,09 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4},$$

$$\Delta\sigma_3 = 4,28 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4} - 3,87 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4} = 0,41 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{K}^4}.$$

4. Определим доверительный интервал $\Delta\bar{\sigma}$:

$$\Delta\bar{\sigma} = t(\alpha; N) \cdot \sqrt{\frac{\Delta\sigma_1^2 + \Delta\sigma_2^2 + \Delta\sigma_3^2}{N(N-1)}}.$$

По таблице найдем коэффициент Стьюдента при $\alpha = 0,8$ и $N = 3$, получим

$$t(\alpha; N) = t(0,8; 3) = 1,9.$$

$$\Delta \bar{\sigma} = 1,9 \cdot \sqrt{\frac{[(-0,34 \cdot 10^{-8}) + (-0,09 \cdot 10^{-8}) + 0,41 \cdot 10^{-8}]^2}{6}} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} = 0,42 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}.$$

5. Конечный результат запишем в виде

$$\sigma = \bar{\sigma} \pm \Delta \bar{\sigma},$$

$$\sigma = 4,28 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4} \pm 0,42 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}.$$

Контрольные вопросы

1. Что такое тепловое излучение? В чем его отличие от других видов излучения?
2. Дайте определение физических величин, характеризующих излучательную и испускательную способности тела. Запишите соответствующие формулы.
3. Поясните понятие абсолютно черного тела.
4. Сформулируйте законы Кирхгофа, Стефана–Больцмана и Вина. Приведите соответствующие математические выражения.
5. Объясните устройство и принцип действия пирометра.
6. Поясните, как в данной лабораторной работе определяется истинная температура тела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в результате проделанной работы создан практикум, в котором раскрываются методические особенности организации и проведения лабораторных занятий по геометрической, волновой и квантовой оптике для студентов первого курса технических вузов. Практикум разработан на кафедре информационных систем и технологий Нижнекамского химико-технологического института в соответствии с рабочей программой дисциплины «Физика» и отвечает всем требованиям к результатам ее освоения по всем направлениям подготовки и формам обучения в вузе.

Назначение практикума многообразно. Он призван, прежде всего, познакомить читателя – студента вуза, преподавателя высшей школы, работника системы высшего профессионального образования (заведующего лабораториями, инженера, лаборанта) с существующими условиями, установками для успешного выполнения лабораторных работ в соответствии с оснащением физических лабораторий, методикой измерений и интерпретацией результатов. Ко всем лабораторным работам приведены примеры обработки экспериментальных данных.

В конце каждой работы для студентов имеются контрольные вопросы, предназначенные для самоконтроля знаний и успешной подготовке к защите лабораторных работ. В приложении 1, к прилагаемому практикуму приведена справочная таблица коэффициентов Стиюдента. В приложении 2 представлены основные законы и формулы, позволяющие студентам систематизировать знания по геометрической, волновой и квантовой оптике. В приложении 3 предложены физические задачи на развитие логического мышления при углубленном изучении материала.

Освоение физических знаний студентами в вузе способствует формированию убеждений о роли физической науки в условиях стратегии развития, основанной на современных научных знаниях. В условиях реформирования отечественной системы высшего технического образования требуется постоянное обновление его содержания. Важной составляющей содержания образования являются учебные материалы, создающие условия для формирования у студентов научного мировоззрения, овладения устойчивыми навыками по дисциплине, формирования нестандартного мышления будущего инженера и его методологической культуры.

В данном практикуме мы предприняли попытку систематизации лабораторных работ по их функциональному признаку – реализации определенной задачи и значению в развитии физической науки:

- по освоению методов физической науки и методов обработки полученных результатов при прямых и косвенных измерениях (лабораторные работы 311; 312; 324; 332; 335);

- наблюдению отдельных физических явлений (лабораторные работы 311; 312; 324);

- установлению физических закономерностей открытых физических явлений (лабораторные работы 312; 332);

- подтверждению справедливости фундаментальных физических законов (лабораторные работы 332, 335);

- определению физических величин и постоянных (лабораторные работы 324; 335).

Проведение лабораторных работ в соответствии с приведенной классификацией дает возможность показать студентам задачи, на решение которых направлено выполнение данной работы в науке. Даже выполняя лабораторные работы по инструкциям, студенты приобретают исследовательские умения и навыки, аналогичные тем, которые должны быть у настоящего исследователя.

Новизну и перспективность авторского подхода определяет интеграция теоретических и практических знаний студентов о световых явлениях, оптических приборах, расширение взглядов на природу света на основе явлений фотоэффекта, его законов и теорий.

Форма проведения лабораторных занятий может быть разной, в зависимости от того, как преподаватель сам воспринимает современное состояние физической науки, ее методологию. Считаем, что все формы работы преподавателя со студентами, способствующие раскрытию их мировоззренческого потенциала, находятся в прямой зависимости от эрудиции, логики, убежденности и собственного мировоззрения преподавателя. Одна из возможных – это совместная групповая частично-поисковая деятельность студентов при выполнении лабораторных работ.

В соответствии с поставленной задачей формирования научного мировоззрения студентов нами были разработаны следующие критерии оценивания лабораторных работ:

- 1 критерий. Владение физическими знаниями необходимыми для выполнения данной лабораторной работы. Глубина проработки теоретического материала, использование основной и дополнительной литературы, справочного материала.

2 критерий. Умение применять научные знания для объяснения физических явлений и методики выполнения работы.

3 критерий. Выполнение работы в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности действий при проведении опытов и измерений, при самостоятельном и рациональном монтаже необходимого оборудования.

4 критерий. Проведение всех опытов в условиях и режимах, обеспечивающих получение правильных результатов и выводов с наибольшей точностью, при соблюдении требований правил безопасности при выполнении лабораторных работ.

5 критерий. Умение строить графики по результатам проведенных исследований и объяснять принципиальные схемы, используемые при выполнении лабораторной работы.

6 критерий. Умение выполнять анализ погрешностей прямых и косвенных измерений, правильно оценивать точность полученных результатов измерений, обосновывать сделанные выводы.

7 критерий. Умение отвечать на вопросы преподавателя по теме лабораторной работы: полнота, аргументированность, убежденность.

Выделенные критерии были успешно реализованы при оценивании лабораторных работ по физике студентов Нижнекамского химико-технологического института.

Мы далеки от мысли, что представленные выше критерии могут быть единственными в оценке умения студентов реализовать научные мировоззренческие взгляды при выполнении лабораторных работ по физике. Кроме того, в связи с появлением нового лабораторного оборудования, позволяющего глубже изучать физические явления, точнее определять физические величины, возможно использование новых методик выполнения лабораторных работ по геометрической, волновой и квантовой оптике. Вероятно, они будут включать существующие сейчас теории и методы обработки полученных результатов как некоторый предельный случай.

В ходе дальнейшей работы целесообразно разработать контрольно-дидактические материалы в виде тестов по разделам геометрической, волновой и квантовой оптике, создать программный продукт для автоматизации подсчетов результатов тестирования. Также ждут своего решения в педагогической науке практические рекомендации по диагностике научных мировоззренческих взглядов студентов при проведении лабораторных занятий по физике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биктагиров, В. В. Задания по физике для самостоятельной работы студентов: учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 2 / В. В. Биктагиров, Е. В. Яковлева. – Нижнекамск, 2017.
2. Биктагиров, В. В. Механика и молекулярная физика / В. В. Биктагиров, Е. В. Яковлева. – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2020. – 106 с.
3. Вафин, Д. Б. Лабораторный практикум по квантовой физике / Д. Б. Вафин. – Казань: Изд-во КГТУ, 2007. – 100 с.
4. Вафин, Д. Б. Физика: учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 2 / Д. Б. Вафин. – 2-е изд., доп. – Казань: Изд-во МОиН РТ, 2011. – 460 с.
5. Волков, А. Ф. Лабораторный практикум по физике: учеб. пособие / А. Ф. Волков, Т. П. Лумпиева. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2011.
6. Киреев, С. В. Лазеры и их применение в ядерной технологии / С. В. Киреев, С. Л. Шнырев. – Москва: Изд-во МФТИ, 2008. – 108 с.
7. Лабораторный практикум по волновой оптике: метод. указания / сост.: А. М. Абдуллин, В. В. Биктагиров, Н. Махиянов, М. И. Куртляев. – Казань: Изд-во КГТУ, 2005.
8. История развития лазера и особенности его применения / И. В. Минаев, А. Н. Сергеев, А. Н. Кубанова [и др.] // Чебышев. сб. – Т. 20, вып. 4. – 2019. – С. 423–438.
9. Определение показателя преломления жидкостей с помощью рефрактометра [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/991200/laboratornaya-rabota-N-41-opredelenie-pokazatelya>, свободный.
10. Трофимова, Т. И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – Москва: Высш. шк., 2003. – 542 с.
11. Физика. Лабораторный практикум: учеб. пособие: в 3 ч. Ч. 3. Волновая оптика. Элементы квантовой физики / В. К. Долгий, В. Н. Болонд, В. П. Дымонт [и др.]. – Минск: Изд-во БГАТУ, 2020. – 172 с.
12. Яковлева, Е. В. Физика. Основные законы и формулы: справочник для студ. вузов / Е. В. Яковлева. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. – 84 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Коэффициенты Стьюдента

Число измерений	Надежность, α						
	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	62,7
3	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,9
4	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8
5	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6
6	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0
7	0,91	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7
8	0,9	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5
9	0,89	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4
10	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3
11	0,88	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,2
12	0,88	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1
13	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,1
14	0,87	1,1	1,4	1,8	2,2	2,7	3,0
15	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0
16	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	3,0
17	0,87	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9
18	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9
19	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,6	2,9
20	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9
∞	0,84	1,0	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6

Основные законы и формулы геометрической, волновой и квантовой оптики

Геометрическая оптика. Фотометрические величины

1. Закон отражения:

$$\angle \alpha = \angle \beta,$$

где α – угол падения; β – угол отражения.

2. Закон преломления света:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

где α – угол падения; γ – угол преломления; v_1 – скорость света в первой среде; v_2 – скорость света во второй среде; $n = \frac{c}{v}$ – абсолютный показатель преломления среды; n_2 – абсолютный показатель преломления второй среды; n_1 – абсолютный показатель преломления первой среды; $n_{2,1}$ – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

3. Предельный угол полного внутреннего отражения при распространении света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную:

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}.$$

4. Оптическая сила тонкой линзы

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{a} + \frac{1}{b},$$

где F – фокусное расстояние линзы; $n = \frac{n_2}{n_1}$ – относительный показатель преломления второй среды относительно первой (n_2 и n_1 – абсолютный показатель преломления линзы и окружающей среды); R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхностей ($R < 0$ для выпуклой поверхности; $R > 0$ для вогнутой поверхности); a – расстояние от оптического центра линзы до предмета; b – расстояние от оптического центра линзы до изображения.

5. Формула сферического зеркала:

$$\frac{1}{F} = \frac{2}{R} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b},$$

где F – фокусное расстояние зеркала; a – расстояние от зеркала до предмета; b – расстояние от зеркала до изображения; R – радиус кривизны зеркала.

6. Энергетическая сила света (сила излучения):

$$J_e = \frac{\Phi_e}{\omega},$$

где Φ_e – поток излучения источника; ω – телесный угол, в пределах которого это излучение распространяется.

7. Энергетическая светимость:

$$R_e = \frac{\Phi_e}{S},$$

где Φ_e – световой поток, испускаемый поверхностью; S – площадь этой поверхности.

8. Энергетическая яркость (лучистость)

$$B_e = \frac{J}{S \cos \varphi},$$

где J – сила света; S – площадь поверхности; φ – угол между нормалью к элементу поверхности в направлении наблюдения.

9. Освещенность поверхности:

$$E = \frac{\Phi}{S},$$

где Φ – световой поток, падающий на поверхность; S – площадь этой поверхности.

Интерференция света

1. Разность фаз двух когерентных волн:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (l_2 - l_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \Delta l,$$

где λ_0 – длина волны в вакууме; $l = S \cdot n$ – оптическая длина пути (S – геометрическая длина пути световой волны в среде; n – показатель преломления среды); $\Delta l = l_2 - l_1$ – оптическая разность хода двух световых волн.

2. Условие интерференционных максимумов:

$$\Delta l = \pm k \lambda_0, \quad (k = 0, 1, 2, \dots).$$

3. Условие интерференционных минимумов:

$$\Delta l = \pm \frac{(2k + 1)\lambda_0}{2}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots).$$

4. Условия максимумов и минимумов при интерференции света, отраженного от верхней и нижней поверхностей тонкой плоскопараллельной пленки, находящейся в воздухе ($n_0 = 1$):

$$2b\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} \pm \frac{\lambda_0}{2} = k\lambda_0, \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

$$2b\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi} \pm \frac{\lambda_0}{2} = \frac{(2k + 1)\lambda_0}{2}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

где b – толщина пленки; n – показатель преломления пленки; φ – угол падения; $\pm \frac{\lambda_0}{2}$ – величина, вызванная потерей полуволны при отражении света от границы раздела.

5. Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете (или темных колец в проходящем свете):

$$r_k = \sqrt{\left(k - \frac{1}{2}\right) \lambda_0 R}, \quad (k = 1, 2, 3, \dots),$$

где k – номер кольца; R – радиус кривизны линзы.

6. Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете (или светлых колец в проходящем свете):

$$r'_k = \sqrt{k\lambda_0 R}, \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

Дифракция света

1. Радиус внешней границы k -й зоны Френеля для сферической волны:

$$r_k = \sqrt{\frac{kab\lambda}{a + b}},$$

где k – номер зоны Френеля; λ – длина волны; a и b – расстояния диафрагмы с круглым отверстием соответственно от точечного источника и от экрана, на котором данная дифракционная картина наблюдается.

2. Условие дифракционного максимума от одной щели, на которую свет падает нормально:

$$a \cdot \sin \varphi = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (k = 1, 2, 3, \dots),$$

где a – ширина щели; φ – угол дифракции; k – порядок спектра; λ – длина волны.

3. Условие дифракционного минимума от одной щели, на которую свет падает нормально:

$$a \cdot \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2} = \pm k\lambda, \quad (k = 1, 2, 3, \dots).$$

4. Период дифракционной решетки:

$$d = \frac{1}{N},$$

где N – число штрихов (щелей), приходящихся на единицу длины решетки.

5. Разрешающая способность дифракционной решетки:

$$R = kN,$$

где k – порядок спектра; N – общее число штрихов решетки.

6. Разрешающая способность объектива:

$$R = \frac{D}{1,22 \cdot \lambda'}$$

где D – диаметр объектива; λ – длина волны.

Поляризация света

1. Степень поляризации света:

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

где $J_{\max}$ и $J_{\min}$ – соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором.

2. Закон Малюса:

$$J = J_0 \cos^2 \varphi,$$

где J – интенсивность прошедшего света через поляризатор; J_0 – интенсивность света, падающего на анализатор; φ – угол между плоскостью поляризатора и анализатора.

3. Закон Брюстера:

$$\operatorname{tg} i_B = n_{2,1},$$

где i_B – угол падения, при котором отраженный от диэлектрика луч является плоскополяризованным; $n_{2,1}$ – относительный показатель преломления.

Квантовая природа излучения

1. Закон Стефана–Больцмана:

$$Re = \delta T^4,$$

где Re – излучательная способность (энергетическая светимость) черного тела; $\delta = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ – постоянная Стефана–Больцмана; T – термодинамическая температура.

2. Связь энергетической светимости Re и спектральной плотности энергетической светимости $r_{\nu,T}(r_{\lambda,T})$ черного тела:

$$Re = \int_0^\infty r_{\nu,T} d\nu = \int_0^\infty r_{\lambda,T} d\lambda.$$

3. Закон смещения Вина:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T},$$

где λ_{max} – длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости черного тела; $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

4. Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела от температуры:

$$(r_{\lambda,T})_{max} = C \cdot T^5,$$

где $C = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$.

5. Энергия кванта:

$$\varepsilon_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка; ν – частота света; λ – длина волны света; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света в вакууме.

6. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$\varepsilon = h\nu = A_{\text{вых}} + E_K,$$

где $\varepsilon = h\nu$ – энергия фотона, падающего на поверхность металла; $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона из металла; E_K – кинетическая энергия фотоэлектрона.

7. «Красная граница» фотоэффекта:

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{h};$$

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A_{\text{ВЫХ}}},$$

где λ_0 – максимальная длина волны излучения; ν_0 – минимальная частота, при которой возможен фотоэффект.

8. Масса фотона:

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

9. Импульс фотона:

$$p = \frac{h\nu}{c}.$$

10. Давление, производимое светом при нормальном падении на поверхность:

$$p = \frac{Nh\nu}{c} (1 + \rho) = \omega(1 + \rho),$$

где $Nh\nu$ – энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени; ρ – коэффициент отражения; ω – объемная плотность энергии излучения.

Примеры физических задач на развитие логического мышления с ответами и решениями

1. Почему кошачий глаз светится в темноте?

Ответ. Глаз кошки светится в полумраке, а не в полной темноте. У семейства кошачьих за сетчаткой глаза находится слой клеток, отражающих свет. Это необходимо для улучшения чувствительности зрения во время ночной охоты – таким образом изображение проходит дважды через сетчатку глаза. Кроме того, зрачок у кошки в полутьме раскрывается полностью до круглого отверстия диаметром около 13 мм.

2. Человек вертикально стоит перед зеркалом и при этом не видит свои ноги. Сможет ли он их увидеть, если отойдет дальше от зеркала или приблизится к нему?

Ответ. Нет, не сможет – доказательством является простое построение изображения.

3. Почему тень человека, идущего на закате солнца по дороге, кажется ему сильно искаженной: очень маленькая голова и длинные ноги?

Ответ. В действительности пропорциональность объекта (тени) обусловлена тем фактом, что солнечное излучение распространяется практически параллельно. Тем не менее зрительная система человека оценивает размер объектов на основе величины угловых расстояний между их крайними точками. При такой оценке учитывается и расстояние до самого объекта, т. е. перспектива. Вблизи от глаз это расстояние оценивается по «объемности» изображения, образуемого за счет так называемого бинокулярного эффекта зрения. Для плоской тени механизм такой оценки не срабатывает, и при наблюдении одинаковых сегментов теневой проекции, локализованных в областях головы и нижних конечностей, отмечается значительное различие в расстоянии до точки наблюдения. Отсутствие корректировки расстояния приводит к тому, что участок в области головы, воспринимаемый под меньшим углом зрения, визуально представляется уменьшенным по сравнению с аналогичным сегментом у нижних конечностей, который наблюдается под большим углом.

4. Объясните устройство и принцип действия светочувствительных солнцезащитных очков – их дымчатость увеличивается пропорционально яркости освещения.

Ответ. В стекло вкраплены кристаллы бромистого серебра. Ультрафиолетовый свет восстанавливает ионы Ag^+ до атома серебра, что создает эффект затемнения стекла. При малой освещенности электроны от атома серебра возвращаются к атомам брома, и прозрачность восстанавливается.

5. С какой целью спецодежду сталеваров покрывают тонким слоем металла?

Ответ. Это делается для отражения тепловых (инфракрасных) лучей.

6. Почему в окне поезда метро, едущего по туннелю, хорошо видно четкое отражение нашего лица, но оно выглядит темнее, чем если в том же вагоне посмотреть в обычное зеркало?

Ответ. В данном случае световой поток, исходящий от лица и направленный к оконному стеклу вагона метрополитена, частично отражается от поверхности стекла, тогда как основная доля лучей проникает сквозь толщу материала и подвергается рассеянию при взаимодействии с поверхностью туннельной стены.

7. Почему за занавеской из тюля днем снаружи не видно то, что находится в комнате, а вечером изнутри комнаты не видно то, что происходит на улице?

Ответ. Исследование оптических свойств тюлевых занавесок демонстрирует интересный феномен, связанный с восприятием визуальной информации в условиях различной освещенности.

Днем, когда внешнее освещение значительно превышает уровень освещения внутри помещения, световые лучи, проходя через полупрозрачный материал тюля, рассеиваются, создавая эффект затемнения внутреннего пространства. В результате наблюдатель, находящийся снаружи, видит лишь размытые контуры объектов внутри комнаты, так как интенсивность отраженного света от этих объектов оказывается ниже по сравнению с интенсивностью света, падающего на тюль извне.

Вечером ситуация меняется на противоположную. Внутреннее освещение становится более ярким относительно внешнего, и свет, исходящий из комнаты, также рассеивается тюлем, создавая барьер для

наблюдения внешних объектов. Наблюдатель, находящийся внутри помещения, воспринимает преимущественно отраженный свет от самого тюля, который маскирует слабые источники света снаружи, делая их практически невидимыми.

Таким образом, описанный эффект обусловлен взаимодействием света с различными уровнями освещенности и свойствами материала тюля, который выступает в роли фильтра, изменяя восприятие визуального поля в зависимости от условий освещения.

8. Почему с небольшого моста лучше, чем с берега, видно, как перемещается рыба в воде?

Ответ. Для оценки визуального восприятия были применены принципы преломления и отражения света на границе между двумя средами с разными показателями преломления (вода и воздух). В случае наблюдения с моста световые лучи, отраженные от поверхности рыбы, падают на границу раздела практически перпендикулярно, что минимизирует угол преломления и позволяет значительной части света проходить через водную среду к глазу наблюдателя.

С другой стороны, для наблюдателя, находящегося на берегу, угол падения световых лучей значительно больше, что увеличивает коэффициент отражения на границе между водой и воздухом. Вследствие этого большая часть света отражается обратно в воду, затрудняя наблюдение за подводными объектами.

9. Почему все фонари, цепочкой уходящие вдоль улицы, кажутся горящими одинаково ярко, хотя количество света, направленного от них и достигающего глаз наблюдателя, уменьшается пропорционально квадрату расстояния до фонаря?

Ответ. Именно в такой же пропорции уменьшается и площадь, которую занимает изображение фонаря на сетчатке глаза.

10. Почему на яркую электрическую лампочку накаливания больно смотреть, в отличие от люминесцентной лампы дневного света, обеспечивающей такую же освещенность?

Ответ. Люминесцентная лампа дневного света испускает свет равномерно с большой поверхности, а лампа накаливания – от тонкой нити накаливания. В такой же пропорции соотносятся между собой и площади изображений этих ламп на сетчатке глаза. В случае лампы накаливания колбочки человеческого глаза оказываются «перегру-

женными» падающей на них световой энергией, о чем и сигнализирует возникающее болевое ощущение.

11. Может ли тень от висящей горизонтально веревки быть длиннее самой веревки?

Ответ. Это возможно, если наблюдатель находится на наклонной по отношению к падающим лучам поверхности (стене дома, забору и т. п.).

12. Каким образом, зная свой рост, можно приблизительно определить высоту дома или дерева с помощью карманного зеркала?

Ответ. В данной ситуации следует отойти на несколько шагов от объекта и положить зеркальце на землю. Потом отойти еще немного – так, чтобы в зеркальце увидеть его вершину – верхушку дерева или крышу дома. Отношение этих расстояний равно отношению высот объекта и наблюдателя (считая от глаз до земли).

13. Человеку, страдающему дальнозоркостью, необходимы два различных типа оптической коррекции: корригирующие линзы для дальнего видения; специализированные линзы для работы на близких расстояниях. Обе пары очков характеризуются различными показателями положительных диоптрий. Близорукие люди способны читать текст без использования корректирующих линз, просто располагая его близко к своим глазам. Объясните это явление.

Ответ. У людей с сильной дальнозоркостью изображение даже удаленных предметов оказывается за сетчаткой. Относительно слабые очки с положительными диоптриями возвращают это изображение на сетчатку. По мере приближения к объекту плоскость его изображения отодвигается еще дальше и нужны более сильные очки, чтобы вернуть его на сетчатку. Для близоруких людей изображение далеких предметов оказывается перед сетчаткой, поэтому им необходимы очки с отрицательными диоптриями. Изображение предметов близких, так же как и в предыдущем случае, отодвинется от фокуса и может попасть на сетчатку без помощи очков.