

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Оптика. Атомная физика

*Методические указания
к лабораторным работам
для студентов
физико-математического факультета*

ВОРОНЕЖ
Воронежский госпедуниверситет
2011

УДК 535(07)
ББК В22
О-28

Издано по решению
учебно-методического совета ВГПУ.
Протокол № 7 от 12.05.2011 г.

Авторы:

Р.А. Кончаков, Ю.А. Померанцев, Е.В. Крохина, С.В. Шевцов

Рецензент

доктор физико-математических наук,
профессор *С.Н. Дрождин*

Научный редактор

доктор физико-математических наук,
профессор *В.А. Хоник*

Общая физика. Оптика. Атомная физика : методические
О-28 указания к лабораторным работам для студентов физико-
математического факультета / Р.А. Кончаков [и др.]. – Воронеж :
Воронежский госпедуниверситет, 2011. – 100 с.

В методических указаниях приводится описание установок и приборов, порядок выполнения, теоретическое обоснования, контрольные вопросы к лабораторным работам. Показано также, какими компетенциями должен обладать студент в результате выполнения лабораторных работ.

Издание предназначено для студентов II–III курсов физико-математического факультета.

УДК 535(07)
ББК В22

© Кончаков Р.А., 2011

© Померанцев Ю.А., 2011

© Крохина Е.В., 2011

© Шевцов С.В., 2011

© Воронежский госпедуниверситет,
редакционно-издательская обработка, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных целей проведения лабораторного практикума по физике является формирование у Вас, глубокоуважаемый студент, ряда специальных профессиональных компетенций, а именно:

- ***демонстрировать, применять, критически оценивать и пополнять физические знания для решения профессиональных задач;***
- ***понимать значение экспериментального метода физической науки и владеть навыками постановки учебного эксперимента;***
- ***понимать и излагать получаемую информацию и представлять результаты физических исследований.***

Для формирования заявленных компетенций в ходе каждой работы Вам придется решать ряд задач, которые позволяют научиться:

- понимать актуальность изучаемого в данной работе физического явления
- объяснять физическую суть изучаемого в данной работе явления;
- характеризовать, давать описание объекта исследования (образец, устройство, поток частиц, излучение) и выделять его особенности;
- объяснять физические основы используемой в работе методики измерений, обосновывать последовательность действий при выполнении каждой конкретной работы;
- работать с приборами, выбирать нужный диапазон измерений (определять цену деления шкалы);
- проводить измерения, соблюдая заданные условия, грамотно и аккуратно записывать результаты в заранее составленные таблицы;
- вычислять и учитывать приборную и случайную погрешности прямых и косвенных измерений;
- представлять результаты эксперимента в виде сводных таблиц и графиков; определять параметры исследуемых функциональных зависимостей;
- анализировать полученные результаты, делать обоснованные выводы, составлять отчет по работе.

Все эти умения можно приобрести только в результате продолжительной целенаправленной самостоятельной работы и вдумчивом отношении к делу. Особенность занятий лабораторного практикума состоит в том, что они (в отличие от других учебных занятий) с первых шагов требуют Вашей самостоятельности, которая постепенно должна стать практически полной, при этом так работать нужно не только в лаборатории при сборке установки и проведении измерений, но и дома сначала при подготовке к измерениям, затем при графической, математической и литературной обработке результатов, а также при составлении отчета.

По цели, объему и содержанию лабораторные работы по физике могут резко различаться между собой. Однако все они содержат одинаковые последовательности общих по форме конкретных этапов. Более того, сравнительный анализ процессов выполнения учебной лабораторной работы и проведения научного эксперимента с использованием стандартной методики показывает, что в обоих случаях необходимо преодолевать одни и те же этапы, а именно:

- формулировка актуальности исследования данного физического явления;
- формулировка цели работы;
- постановка задачи, в основе которой лежат теоретические представления о сущности исследуемого физического явления;
- анализ физических основ метода, используемого в работе, выяснение его точности и пределов применимости;
- предварительная подготовка к выполнению работы: выяснение последовательности конкретных задач и их формулировка, выделение величин, получаемых прямыми и косвенными измерениями, составление таблиц для записи результатов измерений и их начальной обработки;
- сборка установки, проведение измерений, четкая запись результатов, регистрация характеристик и параметров используемых приборов, условий проведения опыта; прикидочная оценка значения измеряемой величины или характера исследуемой зависимости для устранения грубых ошибок; установление надежности результатов измерений;
- математическая обработка результатов измерений и оценка погрешности определения искомых величин с достаточной степенью достоверности;
- систематизация и обобщение результатов опыта, составление сводных таблиц, построение графиков;
- формулировка выводов, литературное оформление результатов опыта – написание отчета по работе.

Первые пять этапов – это Ваша самостоятельная работа до проведения измерений в лаборатории, а три последних – после их окончания. Остальные этапы работы выполняются под непосредственным руководством преподавателя и лаборанта.

Выполняя работы физического практикума, приучайте себя с самого начала выделять самостоятельно в каждой из работ все перечисленные девять этапов. Возможно, что вначале это не всегда будет получаться, какие-то этапы или моменты в них окажутся неочевидными. Обращайтесь с вопросами к преподавателю. Если сделать такой подход к работам для себя обязательным, то он постепенно станет привычным. Тем более, если преподаватель возьмёт на себя обязанность отдельно оценивать означенные этапы при защите Вами

работы. А так как для выполнения лабораторных работ по всем дисциплинам нужны практически одни и те же общие умения и навыки, то выполнение и контроль заявленных этапов работы значительно облегчит Вам также выполнение лабораторных работ, по другим дисциплинам.

Выполнение каждого этапа – это определенное действие. Система действий, связанных с осуществлением всех этапов, есть Ваша деятельность при выполнении учебного эксперимента. Овладев такой деятельностью, Вы сможете ее использовать и совершенствовать в ходе других практикумов и затем в условиях производства.

Учитывая важность этой деятельности и для обеспечения верного и сознательного ее усвоения, мы сочли целесообразным наглядно изобразить ее структуру в виде таблицы (табл. 1). В ней приведены не только действия (этапы деятельности), а также результат каждого действия, т.е. цель, на достижение которой оно направлено, и умение – качество личности, которое Вы постепенно должны вырабатывать, выполняя данное действие.

Таблица 1

п. п.	Действия (этапы выполнения)	Знания, формируемые в ходе выполнения действия	Умения, формируемые в ходе выполнения действия	Навыки, формируемые в ходе выполнения действия
1.	Определение актуальности исследования данного физического явления	Обобщающие знания о месте и роли исследуемого физического явления в конкретном разделе физики, всей физической науки в целом	Формулировать системные представления о физических процессах, явлениях	Системных обобщений, синтеза знаний
2.	Определение цели эксперимента	Формулировка цели работы	Умение формулировать цель	Выделения частного из общего
3.	Постановка задачи, в основе которой лежат теоретические представления о сущности исследуемого физического явления	Обобщающие знания о сущности исследуемого физического явления с поиском способов экспериментальной проверки его сущностных зависимостей	Формулировать сущностные признаки и связи исследуемого физического явления	Вычленять из всей совокупности знаний об исследуемом физическом явлении сущностные причинно-следственные связи
4.	Изучение литературы (описания работы)	Сведения о свойствах конкретного объекта и физических основах метода его исследования	Умение обосновать выбор объекта и метода, приводящих к достижению цели	Определения из литературных данных оптимальных способов проведения эксперимента

п. п.	Действия (этапы выполнения)	Знания, формируемые в ходе выполнения действия	Умения, формируемые в ходе выполнения действия	Навыки, формируемые в ходе выполнения действия
5.	Подготовка к проведению измерений	Перечень задач работы. Схема установки. Протокол с таблицами для записи результатов измерений	Умение обосновать последовательность задач, анализировать схему, продумать и готовить таблицы для записи результатов	Анализа и синтеза экспериментальной работы
6.	Подготовка установки и проведение опыта	Результаты измерений в виде таблицы	Умение работать с приборами, снимать показания, надежно их записывать, выдерживать и фиксировать условия опыта	Работы с измерительными приборами
7.	Обработка результатов измерения. Оценка погрешности измерения искоемых величин	Значения величин, измеренных прямо и косвенно, с указанием погрешности их измерения	Умение обрабатывать результаты и оценивать погрешность измерения	Работы с множеством экспериментальных данных
8.	Систематизация и обобщение результатов опыта, составление сводных таблиц, построение графиков, формулировка выводов. Составление отчета по работе	Сводные обобщающие таблицы, графики, выводы. Отчет по работе	Умение систематизировать и обобщать результаты, представлять их графически, составлять отчет по выполненной работе	Проведения анализа, синтеза и обобщения экспериментальных данных. Сопоставление полученных результатов с заявленными целями работы. Формулировка выводов

Результат учебного эксперимента – умение студентов проводить эксперимент, т.е. усвоенные Вами знания об эксперименте как методе исследования, о деятельности по его осуществлению и умения, необходимые для его грамотного проведения.

Выполнение лабораторной работы есть определенная последовательность действий:

подготовка к эксперименту;

- проведение измерений;
- обработка полученных результатов;
- формулировка выводов и написание отчета.

Для грамотного и быстрого их выполнения у каждого из Вас должна сложиться определенная система знаний и умений (ориентировочная осно-

ва действия), которая обеспечит правильное и рациональное исполнение действия. Другими словами, всякому действию должны предшествовать обосновывающие его знания. В данном случае это не только описание конкретной лабораторной работы, но и определенные разделы курса, а также знания по физике и математике, полученные Вами в средней школе, и умение пользоваться методическими указаниями по обработке экспериментальных результатов, назначению и устройству современных измерительных приборов.

Поэтому выполнение каждой лабораторной работы по физике необходимо начинать с изучения ее описания, и приведения знаний в систему, а именно:

- ясно представить себе общую цель данной конкретной лабораторной работы и последовательность задач, решение которых приведет к достижению окончательной цели;
- знать, какое физическое явление изучается в данной работе и какими зависимостями связаны величины его описывающие;
- знать основные особенности объекта исследования (образец, поток частиц, излучение);
- изучить и уметь объяснить физические основы используемых в работе методов измерения искомых величин;
- уметь нарисовать принципиальную схему используемой установки и знать назначение каждого из ее узлов;
- знать последовательность выполнения этапов лабораторной работы;
- иметь общее представление об ожидаемых результатах проводимого эксперимента и суметь выбрать метод, нужный для их математической обработки.

Только такая основательная и систематическая подготовка к каждой работе позволит сознательно выполнять лабораторные работы по физике и целенаправленно вырабатывать у себя необходимые для Вашей будущей деятельности умения и навыки.

Проверять степень своей готовности к выполнению каждой конкретной работы нужно с помощью приводимых ниже обобщенных контрольных вопросов. Они являются общими для всех работ физического практикума. Поэтому полезно (для экономии времени) не только обязательно отвечать на них, готовясь к работе, но и запомнить их как общий принцип подхода к выполнению лабораторных работ вообще.

Обобщенные контрольные вопросы

1. В чём актуальность проведения данной работы?
2. Какова цель работы?

3. Какие сущностные связи характерны для исследуемого физического явления?
4. Каковы возможные экспериментальные пути для проверки сущностных причинно-следственных связей исследуемого физического явления?
5. Что представляет собой объект исследования в данной работе?
6. Какие физические явления положены в основу экспериментального метода определения искомой величины (величин)?
7. Какие допущения сделаны в теории метода?
8. Какая теоретическая зависимость может быть проверена в данном конкретном опыте?
9. Какие конкретные задачи в ходе проведения измерений придется решать для достижения цели?
10. Каково назначение отдельных узлов экспериментальной установки?
11. Какие требования техники безопасности необходимо соблюдать при выполнении данного учебного эксперимента?
12. Какие меры нужно принимать в ходе эксперимента для предупреждения и исключения вредных воздействий на окружающую среду?
13. Какие таблицы нужны в протоколе для записи и начальной обработки результатов измерений?
14. Какие зависимости должны быть построены по полученным данным?
15. Какое уравнение (или система) позволяет найти искомую величину или нужную зависимость на основании опытных данных?
16. Какие постоянные (табличные данные, параметры образца и установки) нужны для определения искомой величины по данным опыта?
17. Как будет определена погрешность прямых измерений?
18. Как придется оценивать погрешность конечного результата?
19. Как можно проверить достоверность полученных экспериментальных результатов?
20. Совпадает ли результат эксперимента с предсказанием теории?
21. Чем вызвано расхождение результатов эксперимента и теории?
22. Можно ли сопоставить результаты эксперимента с литературными данными?
23. Достигнута ли цель работы?

На вопросы 1-9 Вы должны ответить при подготовке к работе и отразить эти ответы в конспекте. На вопросы 10-12 — при непосредственном знакомстве с установкой и в ходе беседы при допуске к работе. На последнюю группу вопросов 13-23 — в ходе опыта, обработки результатов, их систематизации и описании в отчете.

Эта система вопросов очень важна и по другой причине.

Психологами установлено, что процесс приобретения и развития знаний не может протекать и даже начаться без постановки и решения самых разнообразных вопросов. Любой шаг в познании предварен вопросом о том, чем данная информация важна. Именно вопросами выражается первое пробуждение мысли. Овладение умением правильно ставить вопросы не менее важно, чем нахождение способов получения ответов. Поэтому, используя принцип подхода к эксперименту заданный обобщенными вопросами, учитесь ставить и формулировать вопросы, связанные с содержанием конкретной работы.

Требования обобщенного характера к структурным элементам знаний по физике

При самостоятельном изучении всех разделов курса физики Вы имеете дело с такими понятиями, как: явление, величина, метод, закон, теория. Они будут встречаться и при подготовке к лабораторным работам. Для целенаправленного их изучения и изложения полезно знать требования обобщенного характера к этим структурным элементам научных знаний. Они могут исполнять роль планов при построении ответов.

Что нужно знать о каждом конкретном физическом явлении?

- Когда и кем открыто и впервые изучено явление?
- Внешние признаки проявления явления.
- Условия, при которых наблюдается явление.
- Механизм протекания явления (объяснение на основе современных теорий).
- Связь данного явления с другими.
- Количественные характеристики явления:
 - а) величины, характеризующие явление;
 - б) связь между величинами и формулы, выражающие эту связь.
- Примеры использования явления на практике, способы предупреждения его вредного воздействия.

- Определение явления.

Что нужно знать о каждой конкретной физической величине?

- Для чего введена данная величина?
- Общепринятое буквенное обозначение величины.
- Аналитическое выражение этой величины.
- Скалярная или векторная данная физическая величина?
- Единицы физической величины (в СИ обязательно).
- Методы измерения этой физической величины?
- Определение величины.

Что нужно знать о каждой конкретной модели?

- Название модели.
- Вид модели.
- Оригинал (прототип модели).
- Цель введения модели.
- Способ построения (описание) модели.
- Условия замены оригинала моделью.
- Определение модели.

При построении определений физических явлений, величин и моделей следует пользоваться нижеприведенными схемами.

Например:

скорость – векторная физическая величина, введенная для количественного оценивания быстроты и направления движения тела, и равная отношению перемещения тела к промежутку времени, за которое произошло это перемещение;

материальная точка – мысленная модель тела, введенная решения задач о его движении и взаимодействии с другими телами и построенная так, что пренебрегают формой, размерами и структурой тела, сохраняя лишь свойства инертности и гравитационности.

Что нужно знать о методе исследования каждого конкретного физического явления или измерения физической величины.

- Для изучения какого физического явления или измерения какой физической величины применяется метод?
 - Прямым или косвенным является этот метод?
 - Физические основы метода.
 - Области (границы) применимости метода.
 - Точность метода. При каких обязательных условиях она достигается?
 - Преимущества и недостатки данного метода по сравнению с другими.

Что нужно знать о каждом конкретном приборе?

- Название и марка (тип) прибора.
- Назначение прибора, т.е. для измерения каких физических величин или получения каких сигналов предназначен прибор.
 - Одноцелевым или многоцелевым является данный прибор?
 - Принцип действия прибора (желательно).
 - Основные узлы (части) прибора и их назначение.
 - Пределы значений величин или сигналов, допускаемые при работе с прибором.
 - Правила обращения (работы) с прибором.
 - Погрешности или предел допускаемой погрешности прибора.
 - Условное изображение прибора на схемах.

Что нужно знать о законе?

- Кем и когда открыт закон?
- Связь между какими величинами выражает закон?
- Формулировка закона.
- Аналитическое выражение (формула, выражающая закон).
- Опыты, подтверждающие справедливость закона.
- Примеры учета и использования закона.
- Границы применимости данного закона.

Что нужно знать о каждой конкретной теории?

- Кем и когда создана теория?
- Основные положения теории.
- Факты, послужившие основанием для разработки теории.
- Математический аппарат теории (основные уравнения).
- Круг явлений, объясняемых данной теорией (пределы применимости теории).
- Явления и свойства материи, предсказанные теорией.

Начальная обработка результатов измерений

Особенность данного этапа обработки в том, что его выполняют сразу после получения экспериментальных данных, т.е. прежде чем разобрана рабочая установка. Это позволяет при необходимости проверить отдельные точки, участки или даже всю зависимость в целом. В ходе такой обработки Вы сможете увидеть, значений каких величин (или постоянных параметров) у Вас еще нет, понять, откуда они могут быть взяты.

Начиная обработку результатов сразу после их получения, т.е. на лабораторном занятии, действуйте в такой последовательности:

- постройте зависимость между величинами по данным опыта, если они непосредственно измерялись;
- сопоставьте вид полученной зависимости с теоретически предполагаемым;
- определите однократно из графика значение нужной величины;
- вычислите конечный результат, используя данные 28 графика.

Иногда оказывается, что величины, зависимость между которыми должна быть построена, непосредственно не измерялись. Тогда начинать обработку придется в иной последовательности, а именно:

- вычислите, используя данные опыта, и запишите в таблицу значения величин, необходимых для построения графика; если экспериментальных данных много, то можно брать пока значения через точку (или даже через две), это сократит объем и ускорит работу;
- постройте зависимость между величинами, используя результаты вычислений;
- сравните вид полученной зависимости с предполагаемым теоретически.

После того, как график построен, обработку продолжайте как и в предыдущем случае.

Требование – успевать на занятии не только получить данные, но и построить снятую зависимость должно стать для Вас обязательным правилом.

Построенную зависимость и протокол с таблицами данных предъявите преподавателю для проверки и окончательной подписи. Хорошо, если тут же Вы подумаете о завершении обработки результатов, т.е. представите, что нужно делать для ее окончания и уточните неясные моменты. Обсуждать вопросы обработки, имея график и результаты, уже значительно проще.

Вы уже, вероятно, обратили внимание на то, что осмысливать результаты легче, если они изображены графически. Помимо наглядности графики необходимы для определения значений отдельных величин. График – очень распространенный способ представления экспериментальных результатов. Поэтому стройте их, выполняя общепринятые правила:

- используйте только миллиметровую бумагу и карандаш;
- откладывайте по оси абсцисс аргумент (переменную, условно принятую в данном эксперименте за независимую), а по оси ординат – функцию;
- выбирайте масштаб таким, чтобы он легко читался, поэтому одна клетка масштабной сетки должна соответствовать удобному числу – 1, 2, 5, 10 единиц откладываемой величины;
- пишите на осях числовые значения только для крупных единиц масштаба, делайте это за пределами графика (левее оси ординат и ниже оси абсцисс);
- стройте ту область значений, которая была исследована в опыте;
- не давайте начало координат (точка 0, 0), если это не имеет особого физического смысла (результат начального измерения);
- наносите на график все полученные при измерениях значения;
- проводите кривую плавно, по усредненным значениям, избегая изломов и перегибов;
- используйте разные обозначения точек при построении на одном графике нескольких кривых одной и той же зависимости, полученных при разных условиях опыта;
- снабжайте каждый график подрисуночной подписью (внизу листа), содержащей словесное название зависимости, которая на нем представлена, и условий ее получения, т.е. раскрывающей назначение и возможности использования графика;
- пишите обязательно на обратной стороне графика свою фамилию и номер группы.

Окончательная обработка результатов измерений

Общеизвестно, что принципиально невозможно измерить абсолютно точно значение какой-либо физической величины. Поэтому всегда необходимо учитывать полную погрешность опыта и указывать ее в окончательном результате. Полная погрешность опыта складывается из:

- погрешности, связанной с неидеальностью объекта исследования;
- погрешности метода;
- приборных погрешностей;
- ошибок, связанных с проведением данного конкретного опыта – промахи, систематические и случайные ошибки.

Все виды перечисленных погрешностей, кроме случайных, могут быть оценены и практически учтены или устранены еще до начала систематических измерений.

При выполнении работ физического практикума Вы не учитываете ошибок, обусловленных неидеальностью объекта исследования и самим методом. Допускается, что объект идеален, а метод позволяет верно наблюдать и достаточно точно оценивать изменение величины. Конечно, это далеко не всегда так, поэтому в описании работы бывают специально оговорены условия, ограничивающие применение метода. Нужно учиться подходу к учету таких ошибок. Это Вам пригодится в дальнейшей экспериментальной работе.

Оценку погрешности измерения величины для конкретной работы начинайте с расчета и указания в протоколе приборной погрешности. Об этом уже говорилось в разделе «Как проводить измерения». Помните, что погрешность прибора нужно определить обязательно в конце данной работы, пока все приборы перед Вами. Выработайте привычку кончать работу и разбирать установку только после того, как записаны погрешности приборов и выполнена предварительная обработка результатов измерений.

По результатам опыта Вы оцениваете случайные ошибки. Это можно сделать только после проведения достаточно большого числа измерений. Общепринятый метод вычисления случайной погрешности основан на предположении о том, что распределение случайных ошибок в процессе данного опыта соответствует нормальному закону распределения случайной величины.

Таким образом, проведя эксперимент, необходимо вычислять не только значение физической величины, но и погрешность ее измерения, используя особые приемы и методы, разработанные математиками, т.е. выполнять математическую обработку результатов измерений. Это следует делать, пользуясь пособиями, которые Вам рекомендованы.

Вычисление суммарной погрешности измерения величины в каждой работе имеет свои особенности. Однако схемы расчета оказываются об-

щими для всех работ. Они должны быть усвоены, так как Вам предстоит применять их не только при выполнении физического практикума, но и в дальнейшем в работах специальных лабораторий.

Выполнение вышеприведённых рекомендаций и требований к выполнению физического практикума должно приводить к формированию заявленных в начале специальных профессиональных компетенций бакалавра физико-математического образования по специальности «физика». Более подробно с рекомендациями по выполнению физического практикума можно ознакомиться в методическом пособии Кесаманлы Ф.П., Коликова В.М. Физика. **Как правильно организовать самостоятельную работу при выполнении учебных экспериментов.** Методическое пособие для студентов. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007., 56 с., а также в методическом пособии В.А. Хоник Оценка погрешностей измерений. Методические указания. Воронеж, ВГПУ, 2007, 24 стр.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАМПОЧКИ НАКАЛИВАНИЯ

Цель работы: определить силу света лампочки накаливания, рассчитать световое поле исследуемой лампы и построить индикатрису источника, определить удельную мощность, яркость, светототдачу и КПД исследуемой лампы накаливания.

В работе используются: фотометр Люммера-Бродхуна, оптическая скамья, эталонная лампа в металлическом кожухе, исследуемая лампа с вращающимся патроном, люксметр, РНШ.

Теоретическая часть

Свет, или оптическое излучение, представляет собой электромагнитные волны с длиной волны в интервале от 0,38 до 0,76 мкм. Среднее значение энергии, переносимой световыми волнами через поверхность в единицу времени, называется потоком лучистой энергии через эту поверхность, или мощностью излучения. Мощность излучения, которая оценивается по воздействию на человеческий глаз, адаптированный к свету, называется световым потоком. Чувствительность глаза к различным длинам волн неодинакова. При дневном освещении наибольшая чувствительность глаза к спектральному потоку с $\lambda = 0,55$ мкм. Отношение спектрального потока излучения с $\lambda = 0,55$ мкм к спектральному потоку, который имеет другую длину волны, но оказывает идентичное зрительное ощущение, называется относительной чувствительностью глаза, или относительной вид-

ностью. Чувствительность нормального человеческого глаза к излучению различной длины волны даётся кривой видности (V – функция видности) (рис. 1).

1) Функция видности для $\lambda = 0,55$ мкм принимается равной 1. При том же потоке энергии оцениваемая зрительно интенсивность света для других волн оказывается меньше, следовательно, и функция видности для других волн меньше 1. Величина функции видности обратно пропорциональна величинам потоков энергии при длине волн в определённом интервале, т.е.

$$\frac{V(\lambda_1)}{V(\lambda_2)} = \frac{d\Phi_{\lambda_2}}{d\Phi_{\lambda_1}} \quad (1)$$

2) Распределение энергетического потока по длинам волн можно охарактеризовать с помощью функции распределения:

$$\varphi(\lambda) = \frac{d\Phi}{d\lambda}, \quad (2)$$

где $d\Phi$ – поток энергии при длине волн в интервале от λ до $\lambda + d\lambda$.

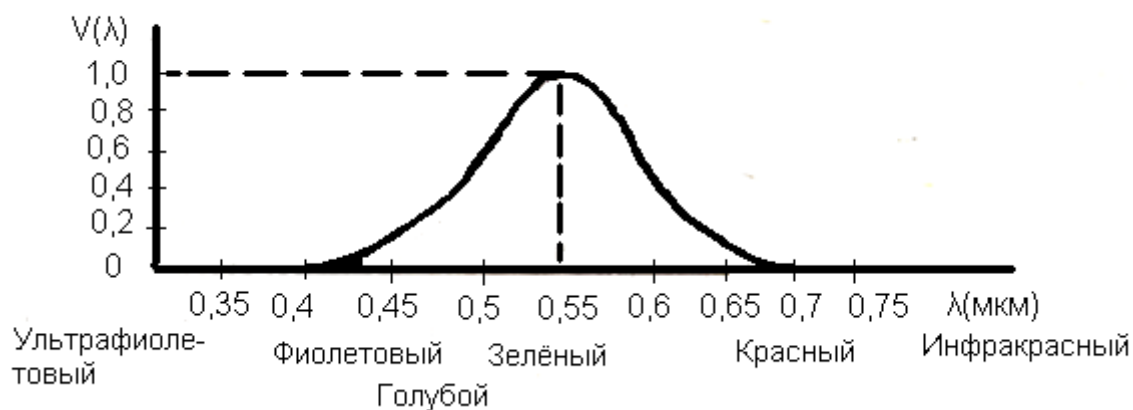


Рис. 1. Кривая видности

3) С помощью функции видности и энергетического потока можно дать определение светового потока. Для интервала длин волн $d\lambda$ световой поток равен произведению функции видности и потока энергии:

$$d\Phi_{\lambda} = V(\lambda)d\Phi(\lambda) \quad (3)$$

Функция видности – величина безразмерная, поэтому размерность светового потока совпадает с размерностью потока энергии, что подтверждает определение светового потока как потока лучистой энергии, оцениваемого по зрительному ощущению.

Чтобы непосредственно перейти к определению фотометрических величин и их единиц, представим себе источник света таких размеров, что на некотором малом расстоянии от него поверхность распространяющейся волны можно было считать сферической. Такой источник обычно называется точечным. Иногда говорят, что источник будет точечным, если его

размерами можно пренебречь по сравнению с расстоянием от линии наблюдения до источника.

Для характеристики точечного источника света принята величина, называемая силой света, которая определяется как поток излучения источника, приходящийся на единицу телесного угла:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \quad (4)$$

где $d\Phi$ – световой поток, излучаемый источником в пределах телесного угла $d\Omega$, измеряемого в стерadians. Стерadian (*ср*) – телесный угол, вершина которого расположена в центре сферы и который вырезает по поверхности сферы площадь, равную площади квадрата, со стороной равной радиусу сферы (рис. 2).

Если сила света зависит от направления излучения, то источник называется *анизотропным*, если не зависит – *изотропным*. Для изотропного источника

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}, \quad (5)$$

где Φ – полный поток, излучаемый источником по всем направлениям.

Основной единицей силы света является кандела (*кд*) – сила света, испускаемая с площади сечением $1/600000 \text{ м}^2$ полного излучателя в перпендикулярном этому сечению направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101325 Па.

Единицей светового потока люмен (*лм*). Он равен световому потоку, излучаемому точечным источником в 1 *кд*. в телесном угле в один стерadian (*ср*). Степень освещённости некоторой величины поверхности падающим на неё световым потоком характеризуется величиной, называемой освещённостью:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \quad (6)$$

где dS – элемент поверхности.

Единицей освещённости служит люкс (*лк*), равный освещённости, создаваемой потоком в 1 *лм*, равномерно распределённым по поверхности в 1 м^2 . Протяжённый неточечный источник можно характеризовать величиной, называемой светимостью. Светимость R – это световой поток, испускаемый единицей поверхности по всем направлениям. Светимость измеряется в $\text{лм}/\text{м}^2$.

Для характеристики излучения света в одном направлении (определённом) служит яркость B .

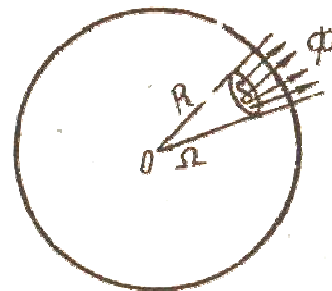


Рис. 2.

Яркость B – это отношение силы света элементарной поверхности в данном направлении к проекции площадки на плоскость, перпендикулярную к взятому направлению, т.е. к видимой поверхности.

Если источник имеет форму шара, то проекция площади его на плоскость, перпендикулярную направлению распространения света, будет круг, т.е. площадь, которую видит наблюдатель.

Обозначив эту площадь через dS и силу света в данном направлении через dI , получим:

$$B = \frac{dI}{dS} \quad (7)$$

Единицей яркости служит $кд/м^2$. Источники света, яркость которых одинакова по всем направлениям, называется ламбертовскими, или косинусными (источники, посылающие световой поток равномерно по всем направлениям), например, источники с матовой поверхностью. Для таких источников энергетическая светимость R и яркость B связаны соотношением: $R = \pi B$.

Описание установки

В фотометрии изучаются световые и энергетические потоки. Для этого применяются приборы, называемые фотометрами. При визуальных наблюдениях в качестве регистрирующего прибора используется глаз, при фотографировании – фотопластинки, фотоплёнки, гальванометры и др. В данной работе используется визуальный метод. При визуальном способе сравниваются освещённости или яркости двух поверхностей. В оптической системе должно быть два окошка для входа и выхода световых пучков от сравниваемых источников и светоделительное устройство, которое даёт возможность получать два соприкасающихся потока, идущих от различных источников.

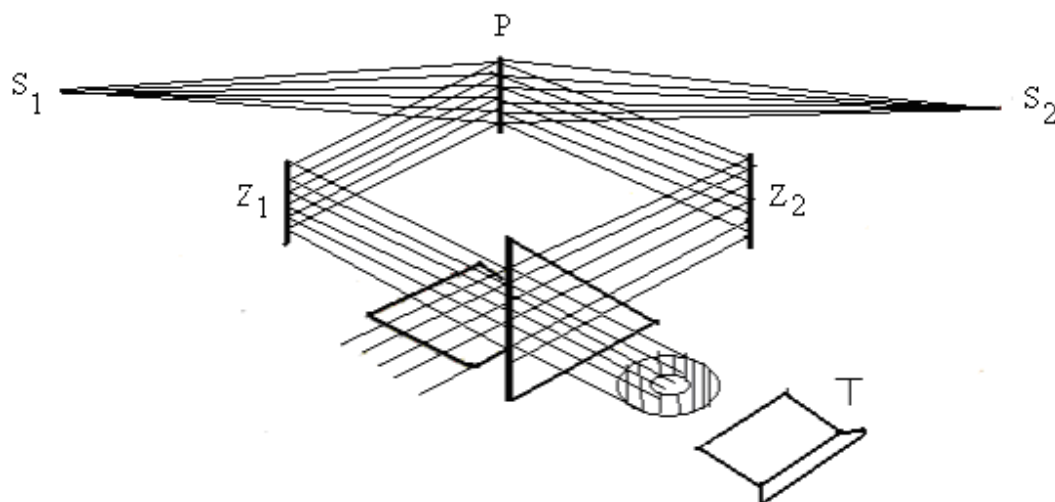


Рис. 3. Схематическое устройство фотометра

В качестве светоделительного устройства применяется фотометрический кубик Люммера–Бродхуна (рис. 4). Схематическое устройство фотометра представлено на рис. 3. На оптической оси (с масштабной линейкой) в противоположных её концах помещаются эталонная и исследуемая лампы. Эталонная лампа включается через РНШ-250. между ними на оптической скамье свободно перемещается фотометр. Свет от названных источников (на рис. 3 они обозначены S_1 и S_2) попадает на гипсовую или меловую пластинку Р. Рассеянный свет попадает на два симметрично расположенных зеркала Z_1 и Z_2 и далее на грани фотометрического кубика. Вся система источников света и фотометра центрируется. В месте оптического контакта двух призм свет проходит через них, не изменяя своего направления, а там, где между призмами имеется воздушный зазор, свет претерпевает полное внутреннее отражение. Аналогичный ход пучка света наблюдается от источника S_2 .



Рис. 4. Фотометрический кубик Люммера-Бродхуна

На глаз наблюдателя через зрительную трубку попадает свет, прошедший от первого источника через оптический контакт и от второго источника, претерпевшего полное отражение от кольцевого воздушного зазора. Поэтому фотометрическое поле представляет собой круг с охватывающим его концентрическим кольцом. Яркость центрального круга и внешнего кольца соответствует освещённости двух сторон рассеивающей пластины Р. При равенстве освещённости граница между кругом и кольцом почти исчезает. Это достигается перемещением фотометра.

Выполнение работы

Задание 1. Определение силы света источника.

Перемещая фотометр между источниками света вдоль оптической оси, добиваются одинаковой освещённости грани кубика фотометра, о чём судят по исчезновению границы раздела между полями, наблюдаемыми в окуляр трубы. Сила света рассчитывается из соотношения:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

где I_1 и I_2 – силы света точечных источников (эталонного и исследуемого); r_1 и r_2 – расстояние от фотометра до источников света. Силу света эталонного источника можно найти по формуле:

$$I_1 = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (8)$$

где Φ – световой поток эталонной лампы, равный 4350 лм.

Задание 2. Изучение светового потока исследуемой лампы.

Лампу с вращающимся патроном устанавливают так, чтобы указатель совпадал с нулевым делением на круглой шкале и лампа была обращена к фотометру. Изложенным выше способом определяют силу света исследуемого источника. Затем поворачивают лампу вокруг вертикальной оси каждый раз на 30° и определяют силу света в каждом случае до угла в 180° . Распределение силы света вокруг лампы представляют индикатрисой источника, построенной в полярных координатах, откладывая по радиусам-векторам силу света источника в определённом масштабе в каждом из фиксированных направлений. Вторую ветвь индикатрисы вычертить симметрично первой.

Задание 3. Определение удельной мощности исследуемой лампы.

Удельной называется мощность, затрачиваемая на получение единицы силы света:

$$W_{уд} = \frac{W}{I} \quad (9)$$

где $W_{уд}$ – удельная мощность источника света; W – мощность потребляемая лампой (смотреть маркировку лампы); I – сила света источника.

Задание 4. Определение яркости исследуемой лампы.

Яркость лампы определяется по формуле яркости как соотношение силы света к видимой поверхности нити лампы:

$$B = \frac{I}{S}, \quad (10)$$

где S – видимая поверхность нити лампы (её определяют приблизительно).

Задание 5. Определение светоотдачи исследуемой лампы.

Светоотдача – световой поток, созданный затратой одного ватта мощности:

$$\Phi' = \frac{\Phi}{W}, \quad (11)$$

где Φ – световой поток исследуемой лампы, равный 4350 лм; W – мощность, потребляемая лампой.

Задание 6. Определение КПД исследуемой лампы.

КПД лампы накаливания определяется отношением светоотдачи лампы к максимально возможной светоотдачи в области наибольшей чувствительности глаза к спектральному потоку, т.е. в области длины волн $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$. Светоотдача, соответствующая этой длине волны, равна 1250 лм/Вт . Тогда получаем:

$$\eta = \frac{\Phi'}{\Phi''} \cdot 100\% \quad (12)$$

Задание 7. Определение освещённости с помощью люксметра.

Ознакомившись с устройством люксметра (рис. 5) по инструкции, определить освещённость в любом месте стола.



Рис. 5. Люксметр

Контрольные вопросы

1. Назовите основные фотометрические величины и их единицы измерения.
2. Сформулируйте закон освещенности, создаваемый точечным источником света.
3. Какой источник называется Ламбертовым? Сформулируйте закон Ламберта для таких источников.
4. Что такое относительная видность и какой вид у кривой видности?
5. Как устроен фотометр Люммера-Бродхуна? Начертите ход лучей в нем.
6. Какие виды фотометров, кроме применяющегося в работе, вы знаете?
7. Объясните, каким образом проводится сравнение двух световых потоков, которые имеют различные длины волн
8. Что такое лучистый поток?
9. Объясните построение индикатрисы источника.
10. Как вы понимаете величины: удельная мощность, светосила, коэффициент световой отдачи КПД исследуемого источника?

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988, 496 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976, 926 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980, 751 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕТЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ ПИРОМЕТРА

Цель работы: изучение законов излучения абсолютно черного и не-черных тел, ознакомление с работой пирометра.

В работе используются: оптический пирометр с исчезающей нитью, проекционная лампа накаливания, блок питания, амперметр и вольтметр, ЛАТР.

Теоретическая часть

Наиболее распространенным в природе является свечение тел, обусловленное их нагреванием. Это вид свечения называется тепловым. Если окружить излучающее тело оболочкой с идеально отражающей поверхностью, то при длительном обмене энергии между телом и заполняющим оболочку излучением может возникнуть момент, после которого состояние системы тело-излучатель будет равновесным.

Возникшее динамическое равновесие характеризуется тем, что количество излучаемой в единицу времени телом энергии будет равно количеству поглощаемой энергии за то же время.

Как показали эксперименты, испускательная $r(\lambda, T)$ (возможно второе название этой функции – спектральная плотность энергетической светимости) и поглощательная $\alpha(\lambda, T)$ способности нагретых тел зависят от длины волны λ и абсолютной температуры T и оказываются различными для различных тел.

Количественная связь между этими функциями была установлена Кирхгофом и выражена следующим законом: отношение испускательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела, оно является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты (длины волны) и температуры, $r_\lambda / \alpha_\lambda = f(\lambda, T)$.

Абсолютно черное тело – это тело, для которого поглощательная способность $\alpha(\lambda, T) = 1$. Следовательно,

$$r_{\lambda} = f(\lambda, T), \quad (1)$$

где $f(\lambda, T)$ – универсальная функция Кирхгофа, аналитический вид которой нашел М. Планк, предположив, что излучение электромагнитной энергии происходит квантами (порциями). Эта универсальная функция имеет вид:

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi\hbar c^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{\hbar c}{kT\lambda}\right) - 1 \right]}, \quad (2)$$

где $\hbar = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света в вакууме, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана.

Излучательная (испускаемая) способность абсолютно черного тела имеет максимум, приходящийся на длину волны λ_m , определяемую из закона смещения Вина:

$$T\lambda_m = b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}, \quad (3)$$

Если проинтегрировать функцию Планка по всем длинам волн, то получится закон Стефана-Больцмана, показывающий, как зависит энергетическая светимость абсолютно черного тела от температуры:

$$R^*(T) = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (4)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(К⁴·м²). – постоянная Стефана-Больцмана.

Измерение температуры яркостным пирометром

Метод дистанционного определения температуры нагретого тела основывается на сравнении яркости его излучения с излучением абсолютно черного тела на одном и том же фиксированном узком участке спектра длин волн $\Delta\lambda$. Обычно используют участок, лежащий в окрестности $\lambda = 650$ нм (красная часть спектра).

В данной лабораторной работе в роли яркостного пирометра выступает оптический пирометр с исчезающей нитью ОППИР-17, принципиальная схема приведена на рис. 1.

Оптическая система пирометра представляет собой телескоп с объективом (1) и окуляром (4). Перед окуляром помещен красный светофильтр (3). Спектральная характеристика пропускания светофильтра подбирается с учетом спектральной чувствительности глаза так, чтобы при рассматривании объекта через светофильтр наибольшая видимая яркость соответствовала бы длине волны около 0,65 мк. В фокусе объектива находится вольфрамовая нить пирометрической лампочки (5). Нить лампочки питается от блока питания; ее накал можно регулировать вручную реостатом (6).

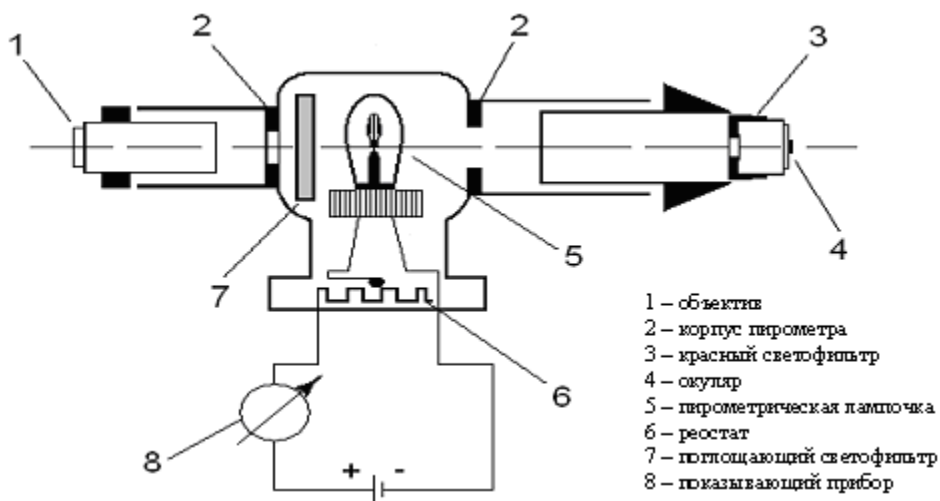


Рис. 1. Принципиальная схема оптического пирометра типа ОПИР-17

В поле зрения прибора наблюдатель видит участок излучающей поверхности накаливаемого тела (объекта измерения) и на этом фоне – нить лампочки (рис. 2). Если яркости нити и накаливаемого тела неодинаковы, нить будет видна более темной или более светлой, чем фон. Регулируя накал нити реостатом, наблюдатель добивается равенства яркостей, при этом изображение нити сольется с фоном и станет неразличимо (нить «исчезнет»).

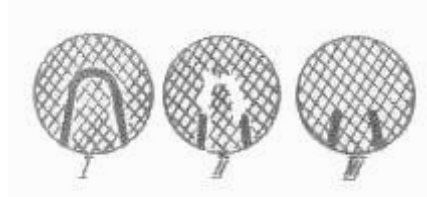


Рис. 2. Участок излучающей поверхности и нить пирометрической лампочки

В этот момент яркостная температура нити равна яркостной температуре объекта измерения. Глаз весьма чувствителен к различению яркостей и момент «исчезновения» нити улавливается с достаточной уверенностью. Показывающий прибор (8), включенный в цепь нити накаливания, градуируется по образцовому пирометру или по температурным лампам, в °С яркостной температуры.

Во избежание перегрева нити, ее температура не должна превышать 1500 °С, поэтому при измерениях в диапазоне более высоких температур перед лампой устанавливается поглощающий светофильтр (7), уменьшающий видимую яркость излучения объекта.

Прибор имеет две шкалы: одна – для измерений в интервале температур 700 – 1400 °С при введенном красном светофильтре, другая для интервала 1200 – 2000 °С при введении дополнительного светофильтра.

Показания пирометра соответствуют температуре абсолютно черного тела. Если исследуемое тело не является абсолютно черным, то температура, определяемая пирометром, называется яркостной.

Выражение, связывающее яркостную и истинную температуру:

$$\frac{1}{T_y} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda_0 k}{hc} \ln \alpha(\lambda_0, T), \quad (5)$$

где $\lambda_0 = 650 \text{ нм}$ – длина волны пропускаемая красным светофильтром, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж / К}$ – постоянная Больцмана и $\alpha(\lambda_0, T)$ – поглощательная способность исследуемого тела при данной длине волны и температуре.

Величины $\alpha(\lambda_0, T)$ для некоторых материалов и разных температур при $\lambda_0 = 650 \text{ нм}$ приведены в таблице 1:

Таблица 1

Материал	T, K	$\alpha(\lambda_0, T)$
Окись никеля	1500	0,85
Уголь	1500	0,89
	2500	0,84
Вольфрам	1000	0,45

Выполнение работы

1. Ознакомиться с работой оптического пирометра (рис. 4).
2. Собрать схему цепи питания исследуемой лампы (рис. 3).



Рис. 3. Схема цепи исследуемой лампы

3. Включить ток в цепи исследуемой лампы. Перемещением объектива пирометра добиться резкой видимости спирали исследуемой лампы. Вращением рифленого кольца (6) включить ток цепи пирометрической лампы (5). Перемещением окуляра (4) проверить, накладывается ли вершина пирометрической нити на спираль.

4. Установить на спирали исследуемой лампы напряжение, рекомендованное преподавателем. Одновременно с измерением напряжения на спирали лампы измерить значение тока, протекающего через спираль. Отсчет значения тока и напряжения необходимо производить через одну минуту, когда режим в цепи исследуемой лампы полностью установится.

5. Для каждого установленного значения напряжения производятся измерения температуры спирали исследуемой лампы с помощью пиро-

метра. Для этого регулируют накал нити (5) пирометрической лампы вращением рифленого кольца (6) до тех пор, пока изображение вершины нити не «исчезнет» на фоне спирали лампы (это означает, что яркость вершины нити и спирали одинаковы). При этом условия считывают температуру по шкале пирометра. Измерение температуры необходимо производить не менее 3-х раз. Регулировку накала нити следует производить медленно, учитывая, что нить лампы пирометра обладает тепловой инерцией.

6. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

№ опыта	I, A	U, B	$W, Вт$	$t_{я}^{\circ}, c$	t°, c	$T_{я}, K$	T, K
1							
2							
3							
.....							

Обработка результатов

1. По формуле рассчитать истинную температуру T , используя измеренные значения яркостной температуры $T_{я}$. Построить график зависимости истинной температуры от яркостной.

2. Вычислить с точностью до 0,1 Вт мощность, подводимую к спирали исследуемой лампы. Построить график зависимости мощности W , потребляемой лампой, от истинной температуры спирали лампы в градусах Кельвина.



Рис. 4. Оптический пирометр

Контрольные вопросы

1. Какое излучение называется тепловым?
2. Что такое тепловое равновесие? Какое излучение называется равновесным?
3. Что такое испускательная способность тела и энергетическая светимость? Как они связаны, в каких единицах измеряются?
4. Какие тела называются абсолютно черными?
5. Чем отличается излучение и поглощательная способность нечерного тела и абсолютно черного тела? Что такое поглощательная способность нечерного тела?
6. Сформулируйте закон Кирхгофа для теплового излучения.
7. Сформулируйте законы Стефана-Больцмана и Вина.
8. Сформулируйте квантовую гипотезу Планка для теплового излучения.
9. Получите закон Стефана-Больцмана и Вина из формулы Планка.
10. Расскажите, какие бывают виды пирометров и в чем состоит их принцип действия?
11. Расскажите, как работает пирометр с исчезающей нитью, какую температуру тела измеряют этим пирометром?
12. Что такое яркостная температура?
13. Почему измерения необходимо производить при введенном красном светофильтре? Когда необходимо пользоваться дополнительным светофильтром?

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988.– 496 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.– 926 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М. : Наука, 1980.– 751 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ И ПРОПУСКАНИЯ

Цель работы: исследование зависимости коэффициента пропускания светофильтра от длины волны излучения и определение типа фильтра.

В работе используются: монохроматор МУМ-01, узел светодиодного излучателя, тубус для установки исследуемого объекта (кюветное отделение), фотоприемный узел, блок обработки сигнала, блок питания 12 В, мультиметр.

Теоретическая часть

Поглощением (абсорбцией) света называется явление потери энергии световой волной при прохождении её через вещество вследствие возбуждения колебаний электронов среды. Эта энергия частично переходит во внутреннюю энергию или в энергию вторичного излучения. Поглощение света в веществе подчиняется закону Бугера:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha d}, \quad (1)$$

где I_0 и I – интенсивность падающей и прошедшей через слой поглощающего вещества толщиной d плоской монохроматической волны соответственно; α коэффициент поглощения, зависящий от длины волны λ (или частоты ν) света, химической природы и состояния вещества и не зависящий от интенсивности света.

Коэффициент поглощения α для разных веществ различен. Для одноатомных газов и паров металлов, где атомы расположены на значительных расстояниях друг от друга, α стремится к 0, и только в узких спектральных областях (10^{-12} - 10^{-11} м) наблюдаются резкие максимумы (линейчатый спектр поглощения). Эти области резкой абсорбции атомов соответствуют частотам собственных колебаний электронов внутри атомов. Колебания атомов в молекулах расширяют спектр поглощения, образуя полосы поглощения (шириной около 10^{-10} - 10^{-7} м). Коэффициент поглощения для диэлектриков невелик (порядка 10^{-3} - 10^{-5} см⁻¹) из-за отсутствия свободных электронов, однако в условиях резонанса при вынужденных колебаниях электронов в атомах и атомов в молекулах возникает сплошной спектр поглощения в определенных интервалах длин волн. Для металлов величина α велика (10^3 – 10^5 см⁻¹), так как из-за существования свободных электронов световая энергия быстро переходит во внутреннюю.

Коэффициент поглощения α зависит от длины волны, поэтому поглощающие вещества окрашены. Например, стекло, слабо поглощающее красные лучи и сильно поглощающее синие и зеленые лучи, при освещении белым светом будет казаться красным, а при освещении синим и зеленым светом – черным из-за сильного поглощения. Это явление используется в светофильтрах, которые в зависимости от химического состава пропускают свет только определенных длин волн. Таким образом, чем больше α для данной длины волны, тем отчетливее обнаружится ослабление соответствующих участков спектра поглощения.

По принципу действия фильтры могут быть разделены на поглощающие (абсорбционные) светофильтры (в которых световая энергия в основном переходит во внутреннюю) и фильтры, в которых происходит перераспределение излучения за счет дисперсии, отражения, рассеивания, дифракции, интерференции.

По виду спектральной характеристики фильтры делятся на полосовые (пропускающие излучение в узкой полосе длин волн (рис. 1а)) и отрезающие (пропускающие излучение с длиной волны, большей некоторой граничной (рис. 1б)).

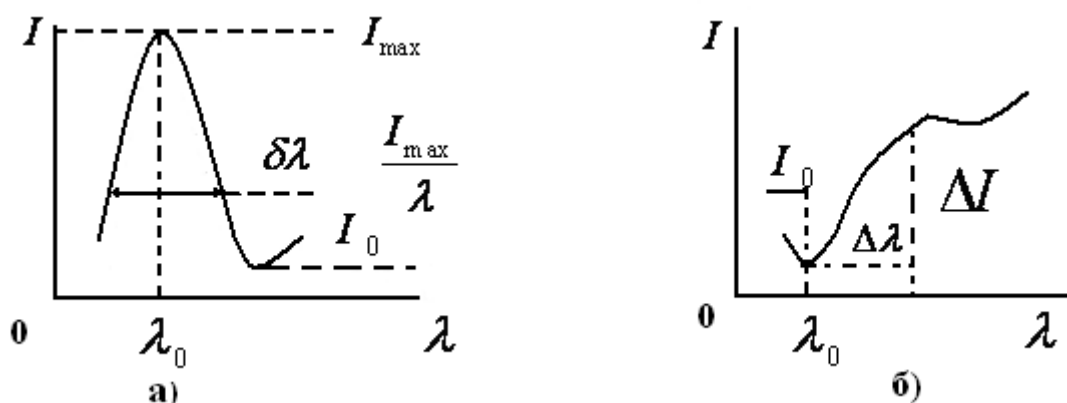


Рис. 1. Спектральная характеристика:
а) полосового фильтра; б) отрезающего фильтра

Параметрами полосового фильтра являются прозрачность в максимуме I_{\max} , рабочая длина волны λ_0 , ширина полосы $\delta\lambda$ на половине максимальной прозрачности, прозрачность за пределами полосы (фон) I_0 и контрастность, определяемая соотношением $\frac{I_{\max}}{I_0}$. Параметр $\theta = \frac{\lambda_0}{\delta\lambda}$ называется добротностью фильтра (разрешающей способностью спектрального прибора), в простейших случаях это величина порядка 10-100.

Параметрами отрезающего фильтра являются длина волны перехода от прозрачности к непрозрачности λ_0 , крутизна спектральной характеристики $K = \frac{\Delta I}{\Delta\lambda}$.

Описание лабораторной установки

В узле излучателя установлен специальный светодиод белого света, излучающий в диапазоне 400–700 нм. Узел излучателя закреплен непосредственно перед входной щелью монохроматора на его корпусе. За входной щелью установлен объектив, формирующий параллельный пучок света, проходящий кюветное отделение и попадающий на фотодиод фотоприемного узла. Электрический сигнал, пропорциональный интенсивности прошедшего излучения, регистрируется с помощью мультиметра. В качестве объектов для исследования прилагаются светофильтры из цветного оптического стекла.

Оптическая схема монохроматора приведена на рисунке 2.

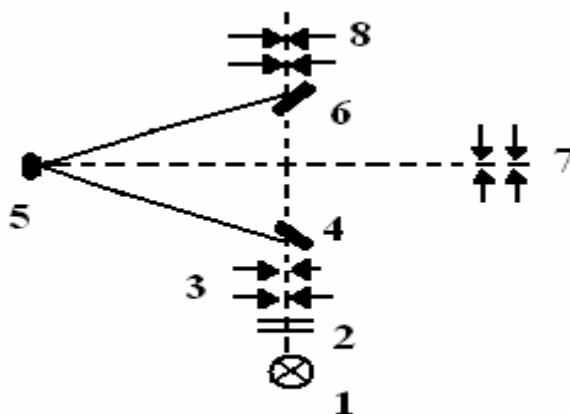


Рис. 2. Оптическая схема монохроматора

Принцип действия данного монохроматора основан на использовании в качестве фокусирующего диспергирующего элемента дифракционной решетки. Излучение от светодиода 1 через конденсор 2 попадает на входную щель 3 и посредством зеркала 4 попадает на дифракционную решетку 5. Дифракционная решетка имеет переменный шаг нарезки и криволинейные штрихи, что дает возможность значительно скомпенсировать расфокусировку и другие aberrации. Зеркало 6 позволяет направлять дифрагированное решеткой излучение на выходную щель 7 или 8.

Щели на выходе и входе монохроматора сменные, постоянной ширины. В настоящей работе на входе и выходе монохроматора могут быть установлены щели шириной 0,5 или 1,0 мм.

Сканирование спектра осуществляется поворотом решетки 5 вокруг оси на угол φ в пределах от $\varphi_0 = 6^\circ 54'$ до $\varphi_k = 28^\circ 44'$. Это осуществляется с помощью системы зубчатых передач, которая связана с ручкой на передней стенке прибора и механическим счетчиком, непосредственно отсчитывающим длины волн в диапазоне 200 – 800 нм с точностью $\pm 0,2$ нм.

Исследуемый образец помещают в тубус с закрывающейся крышкой.

Выполнение работы

1. Включите источник питания и мультиметр. Установите на мультиметре предел измерений 20 В (рис. 3).
2. Установите щели 0,5 мм перед источником и приемником излучения.
3. Подождите не менее 5 минут для стабилизации теплового режима приемника излучения.

4. Произведите калибровку оптической системы. Для этого следует при пустом тубусе кюветного отделения снять зависимость показаний мультиметра (U_0) от длины волны λ в диапазоне длин волн от 370 нм до 830 нм с шагом 5 нм. При необходимости переключайте пределы измерения мультиметра (20 В, 2 В, 200 мВ).

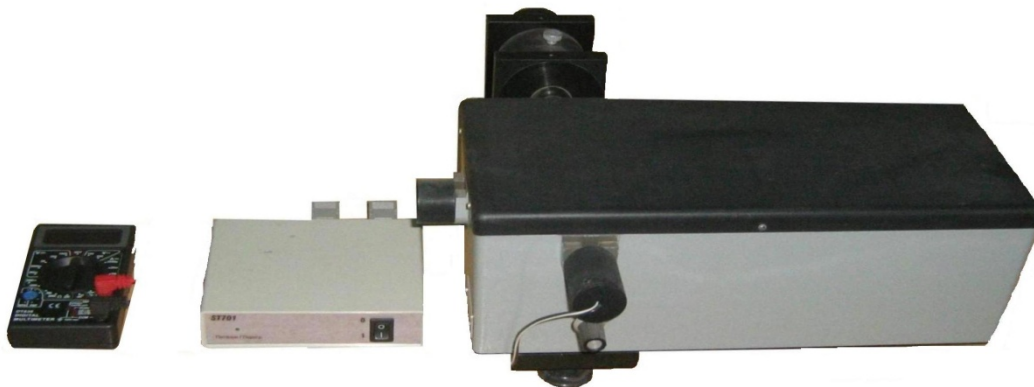


Рис. 3. Элементы сборки для выполнения работы

5. Поместите в тубус кюветного отделения поочередно красный, желтый, зеленый светофильтры и снимите соответствующие зависимости показаний мультиметра (U_1) от λ для каждого светофильтра в том же диапазоне длин волн (длину волны рекомендуется устанавливать с тем же шагом, что и в п. 4). При необходимости переключайте пределы измерения мультиметра (20 В, 2 В, 200 мВ).

6. Выключите источник питания и мультиметр.

* Если измеренное вольтметром напряжение составляет менее 0,1В, рекомендуется установить щели 1 мм или снять щель перед источником излучения.

* При больших световых потоках возможна перегрузка приемника излучения. При этом включается красный мигающий индикатор перегрузки и раздается звуковой сигнал. В этом случае рекомендуется уменьшить мощность источника излучения, переведя переключатель на блоке обработки сигнала в положение 0.

* Приемник излучения и блок обработки сигнала чувствительны к воздействию сильного переменного электромагнитного поля, поэтому не рекомендуется располагать установку поблизости от радиопередающих устройств (в частности, мобильных телефонов) – это может вызвать ошибки в измерениях.

7. Постройте графики зависимости коэффициента пропускания светофильтра T от длины волны излучения λ . Коэффициент пропускания рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{U_1}{U_2}, \quad (2)$$

8. По виду спектральной характеристики определите типы фильтров. Для полосовых фильтров определить основные параметры: $\frac{I_{\max}}{I_0}$, λ_0 , $\delta\lambda$, θ .

Для отрезающих фильтров определить λ_0 , и крутизну спектральной характеристики K . Результаты измерений занести в таблицу 1.

9. Сделайте соответствующие физические выводы, охарактеризуйте цвет фильтра по полученной для него спектральной характеристике.

10. Построить графики зависимости $U_0(\lambda)$, $U_1(\lambda)$, $T(\lambda)$.

Таблица 1

фильтр	$\frac{I_{\max}}{I_0}$	λ_0	$I = I_0 \cdot e^{-ad}$	θ	K	T
красный						
желтый						
зеленый						

Контрольные вопросы

1. Что такое свет? От каких факторов зависит окраска прозрачных или непрозрачных тел?
2. Что называется абсорбцией света?
3. Сформулируйте закон Бугера, и объясните его теоретически.
4. Как проявляется поглощение света визуально?
5. Что называется коэффициентом поглощения, от чего он зависит?
6. Приведите типы и виды фильтров.
7. Объясните принцип действия монохроматора по схеме.
8. Поясните график зависимости коэффициента пропускания от длины волны.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988.– 496 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.– 926 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М. : Наука, 1980.– 751 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА МАЛЮСА И ПРОХОЖДЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА ЧЕРЕЗ ФАЗОВУЮ ПЛАСТИНКУ

Цель работы: проверка закона Малюса и анализ поляризованного света, прошедшего через фазовую пластинку.

В работе используются: лазер, приемник излучения, поляризаторы, фазовая пластинки.

Теоретическая часть

Поперечные волны обладают особым, присущим только им, свойством, известным под названием поляризация. Если при распространении световой волны направление колебаний электрического вектора \vec{E} бессистемно, хаотически изменяется с равной амплитудой и, следовательно, любое его направление в плоскости, перпендикулярной распространению волны, равновероятно, то такой свет называют неполяризованным, или *естественным*. Если колебания электрического вектора фиксированы строго в одном направлении, свет называется *линейно-* или *плоскополяризованным*. Плоскость, образованная направлением распространения электромагнитной волны и направлением колебаний вектора напряженности электрического поля, называется плоскостью поляризации электромагнитной волны.

Поляризация света наблюдается при отражении и преломлении света на границе прозрачных изотропных диэлектриков. Если угол падения естественного света на границу раздела двух прозрачных диэлектриков отличен от нуля, то отраженный и преломленный пучки оказываются частично-поляризованными (рис.1). В отраженном свете преобладают колебания вектора \vec{E} , перпендикулярные к плоскости падения, а в преломленном свете – параллельные плоскости падения (рис. 1). Степень поляризации обеих волн (отраженной и преломленной) зависит от угла падения. Соответствующую зависимость в 1815 г. установил шотландец Дэвид Брюстер.

Как показали опыты, при некотором значении угла падения светового луча на границу раздела двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 соответственно, угол между отраженным и преломленным лучом становится равен 90° . При таком условии отраженный луч оказывается полностью поляризован (колебания вектора \vec{E} в нем перпендикулярны плоскости падения). Прошедший луч поляризован частично и содержит преимущественно

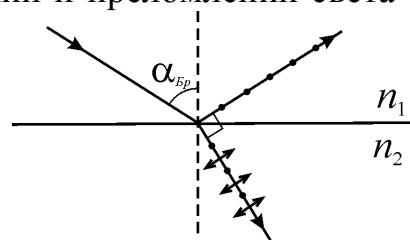


Рис. 1. Поляризация при отражении и преломлении

параллельную составляющую вектора \vec{E} . Тогда значение угла, соответствующего полной поляризации отраженного луча, определяется из закона преломления: $\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$, т.е.

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1)$$

Соответствующий угол падения $\alpha_{\text{Бр}}$ называют *углом Брюстера*. Степень поляризации преломленной волны при угле падения, равном углу Брюстера, достигает максимального значения, однако эта волна остается лишь частично поляризованной. Так как коэффициент отражения света в данном случае значительно меньше единицы (около 0,15 для границы раздела воздух-стекло), можно использовать преломленный свет, повышая его степень поляризации путем ряда последовательных отражений и преломлений. Это осуществляют с помощью, так называемой стопы, состоящей из нескольких одинаковых и параллельных друг другу пластинок, установленных под углом Брюстера к падающему свету. При достаточно большом числе пластинок проходящий через эту систему свет будет практически полностью линейно-поляризованным. И интенсивность прошедшего через такую стопу света (в отсутствие поглощения) будет равна половине падающего на стопу естественного света.

Для получения, обнаружения и анализа плоскополяризованного света используют приспособления, называемые поляризаторами. Поляризаторы могут быть сконструированы на основе рассмотренного отражения и преломления света на границе раздела двух сред, также на основе двойного лучепреломления (призмы Николя), на основе явления дихроизма. Поляризаторы свободно пропускают колебания вектора \vec{E} , параллельные плоскости, которую называют плоскостью пропускания поляризатора. Колебания же, перпендикулярные к этой плоскости, задерживаются полностью или частично. Широкое распространение для получения плоскополяризованного света имеют поляризаторы, действие которых основано на явлении дихроизма – селективного поглощения света в зависимости от направления колебаний электрического вектора световой волны. Сильным дихроизмом обладают кристаллы турмалина.

Для получения плоско-поляризованного света применяются также поляроиды – пленки на которые, как правило, наносятся кристаллики герпатита – двоякопреломляющего вещества с сильно выраженным дихроизмом в видимой области. Так, при толщине $\approx 0,1$ мм такая пленка полностью поглощает лучи с перпендикулярными

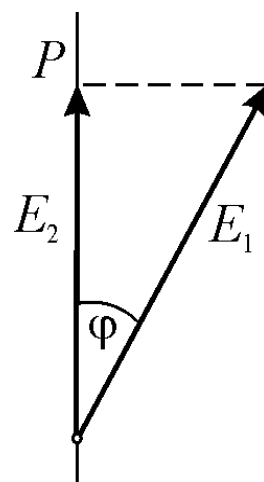


Рис. 2.
Иллюстрация
к закону Малюса

к плоскости падения колебаниями \vec{E} в видимой области спектра, являясь в таком тонком слое хорошим поляризатором. Недостаток поляроидов по сравнению с поляризационными призмами – их недостаточная прозрачность, селективность поглощения при разных длинах волн и небольшая термостойкость. Поляризаторы можно использовать и в качестве анализаторов – для определения характера и степени поляризации интересующего нас света.

Пусть на анализатор падает линейно-поляризованный свет, вектор \vec{E}_1 которого составляет угол φ с плоскостью пропускания P (рис. 2, где направление светового пучка перпендикулярно к плоскости рисунка). Анализатор пропускает только ту составляющую вектора \vec{E}_1 , которая параллельна его плоскости пропускания P , т.е. $E_2 = E_1 \cdot \cos \varphi$. Интенсивность пропорциональна квадрату модуля светового вектора, поэтому интенсивность прошедшего света

$$I_2 = I_1 \cdot \cos^2 \varphi, \quad (2)$$

где I_1 – интенсивность падающего плоскополяризованного света. Это соотношение было установлено в 1810 г. французским физиком Этьеном Луи Малюсом и носит название закона Малюса.

Получение циркулярно-поляризованного света

Из теории колебаний известно, что то или иное состояние поляризации получается при совместном действии двух взаимно перпендикулярных монохроматических световых волн равной частоты, распространяющихся в одном направлении при определенных отношениях их амплитуд A_1 и A_2 и разности фаз δ . Так, циркулярно-поляризованная волна получается в случае выполнения условий $A_1 = A_2$ и $\delta = (2m + 1)\frac{\pi}{2}$, что соответствует оптической разности хода складывающихся волн $(2m + 1)\frac{\lambda}{4}$, где λ – длина волны монохроматического света, $m = 0, 1, 2, \dots \infty$. Если одно условие нарушается, результирующая световая волна будет или эллиптически, или линейно поляризованной.

Рассмотрим один из методов практического получения циркулярно-поляризованного света. Для получения двух взаимно перпендикулярных линейно поляризованных волн, распространяющихся в одном направлении, необходимо пропустить монохроматический линейно поляризованный свет с длиной волны λ через плоскопараллельную пластинку толщиной d . Пластинку вырезают из анизотропного кристалла так, чтобы плоскость, на которую падает свет, была параллельна оптической оси $M - H$ кристалла (рис. 3).

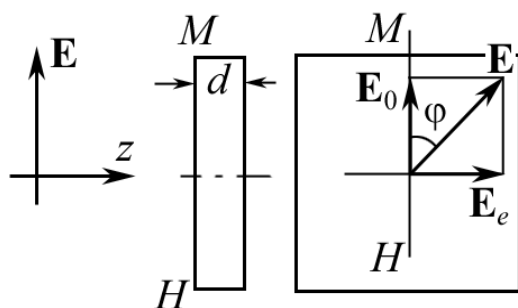


Рис. 3. Получение циркулярно-поляризованного света

В этом случае говорят, что пластинка вырезана параллельно оптической оси. Линейно поляризованная световая волна, попадая в тонкую пластинку, создает две волны – обыкновенную и необыкновенную. Будучи линейно-поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях, эти волны, распространяясь в пластинке с различными скоростями, приобретают на выходе из нее разность фаз δ , равную $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_0 - n_e)$, где n_0 и n_e – показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн в кристалле, соответственно. Оптическая разность хода равна $\Delta = d(n_0 - n_e)$.

Для получения разности фаз между обыкновенной и необыкновенной волной, равной $(2m + 1)\pi/2$, необходимо, чтобы пластинка имела определенную толщину d . Толщина пластинки d определяется как $d(n_0 - n_e) = (2m + 1)\pi/2$.

При $m = 0$ толщина пластинки, создающая необходимую разность фаз, будет минимальная и равна $d(n_0 - n_e) = (2m + 1)\lambda/4$.

Кристаллическую пластинку, которая создает оптическую разность хода между обыкновенной и необыкновенной волной равной $\lambda/4$, называют *пластинка « $\lambda/4$ »*. Для получения одинаковых амплитуд у обыкновенной и необыкновенной волн, распространяющихся в кристаллической пластинке, необходимо, чтобы плоскость поляризации падающего света составляла с оптической осью $M - H$ пластинки угол φ , равный 45° (см. рис. 3).

Выполнение работы

Источником света служит полупроводниковый лазер (рис. 4). На пути светового луча лазера закреплен поляризатор с нанесенной на торец его оправы круговой шкалой и фоточувствительный приемник, подключенный к вольтметру. Фотоприемник позволяет оценить интенсивность попадающего в него светового пучка. Соединенный с фотоприемником универсальный вольтметр используется в режиме измерения постоянного тока в $мА$.

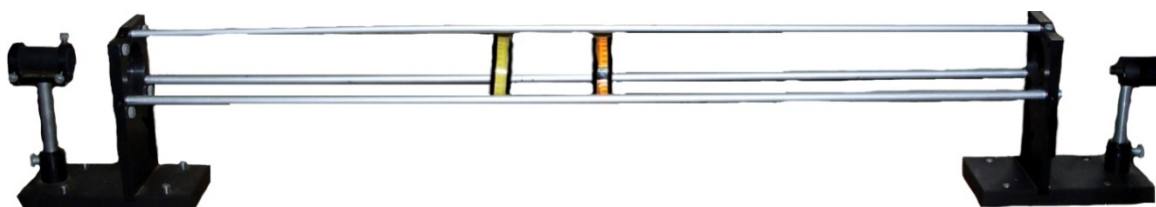
Во второй части работы между лазером и анализатором помещается четвертьволновая пластинка.

Задание 1. Исследование закона Малюса.

1. На установке в составе лазера, анализатора и фотоприемника вращением плоскости поляризации анализатора изменяется угол φ . Установить анализатор в положение, соответствующее $\varphi = 0^\circ$. Снять показания вольтметра в режиме тока I , мА. Затем, поворачивая анализатор через 15° заполнить таблицу 1.

Таблица 1

Угол	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
I , мА	1												
	2												



1. Излучатель (полупроводниковый лазер)



2. Приемник излучения



3. Поляризаторы

Рис. 4. Схема установки

2. Произвести указанные измерения дважды и рассчитать средние значения тока по результатам измерений.

3. Построить график зависимости $\bar{I} = f(\cos^2 \varphi)$.

Задание 2. Работа с фазовой пластинкой.

1. Вращением установить анализатор в такое положение, чтобы полностью погасить свет, попадающий на фотоприемник.

2. Поместить перед анализатором фазовую пластинку. Вращая пластинку вокруг своей оси, убедиться в наличии таких четырех ее положений, в которых опять будет наблюдаться полное гашение света. Эти положения соответствуют ориентации одной из собственных осей пластинки перпендикулярно плоскости главного пропускания анализатора.

3. Выбрав любое из таких положений, повернуть пластинку на 45° и закрепить ее в этом положении. В указанном случае мы получаем, что плоскость поляризации падающего излучения ориентирована под 45° к собственным осям пластинки, и, таким образом, амплитуды обыкновенного и необыкновенного лучей одинаковы.

4. Вращая анализатор, снять показания с вольтметра аналогично первой части работы и заполнить таблицу 2.

Таблица 2

Угол	0	10	20	30	40		...		320	330	340	350	360
$I, \text{мА}$	1												
	2												

5. Построить график зависимости $I = f(\varphi)$.

6. Найти средние значения I_{\min} и I_{\max} . Тогда эллиптичность, равная отношению малой и большой полуосей эллипса, выразится следующим обра-

$$\text{зом } \operatorname{tg}(\varepsilon) = \frac{a}{b} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}}.$$

При выполнении условия ориентации осей фазовой пластинки под углом 45° к плоскости поляризации падающего света разность фаз δ и ε связаны между собой простым соотношением: $\delta = 2\varepsilon$. Данная формула легко иллюстрируется следующими примерами: при разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучом $\delta = 0$ или $\delta = \pi$, как было описано выше, эллипс вырождается в прямую – эллиптичность обращается в ноль или бесконечность

($\operatorname{tg} \frac{\pi}{4}$ или $\operatorname{tg} \frac{3\pi}{4}$) и эллипс превращается в круг.

7. При известной толщине пластинки из слюды рассчитать разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей.

Контрольные вопросы

1. Линейная, круговая, эллиптическая поляризация световых волн.
2. Закон Малюса.
3. Поляризация при отражении и преломлении света. Закон Брюстера.
4. Поляризация при двойном лучепреломлении. Обыкновенный и необыкновенный лучи. Поляризация обыкновенного и необыкновенного лучей. Оптическая ось кристалла. Главная плоскость кристалла. Объясните явление двойного лучепреломления.
5. Способы получения поляризованного света (стопа Столетова, призма Николя, поляроиды, фазовые пластинки).
6. Искусственное двойное лучепреломление при механической деформации твердого тела и под действием электрического поля. Эффект Керра.
7. Вращение плоскости поляризации. Естественное вращение. Магнитное вращение плоскости поляризации. Эффект Фарадея.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988.– 496 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.– 926 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980.– 751 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. КОЛЬЦА НЬЮТОНА

Цель работы: ознакомление с явлением интерференции в тонких слоях, измерение диаметров колец Ньютона, наблюдаемых в отраженном монохроматическом свете, и расчет длины волны монохроматического света по данным измерений.

В работе используются: лазер, плосковыпуклая линза, стеклянная пластина, экран.

Теоретическая часть

Интерференцией называется явление усиления или ослабления амплитуды результирующей волны, образующейся при сложении в пространстве двух (или нескольких) когерентных волн. Интерференция может наблюдаться для любых волн, независимо от их природы.

Рассмотрим сложение волн. Найдем интенсивность света в какой-либо точке пространства, где перекрываются две световые волны. В

соответствии с принципом суперпозиции напряженность электрического поля результирующей волны равна: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, где \vec{E}_1 , \vec{E}_2 – напряженности электрических полей накладывающихся волн.

Если векторы \vec{E}_1 и \vec{E}_2 совершают колебания в одной плоскости и частоты их колебаний равны, то квадрат амплитуды результирующего колебания в некоторый момент времени равен:

$$E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \Delta\varphi \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – разность фаз колебаний в данной точке; E_{01} , E_{02} – амплитуды складывающихся колебаний.

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды напряженности, поэтому соотношение (1) можно записать так:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \Delta\varphi \rangle, \quad (2)$$

где $\langle \cos \Delta\varphi \rangle$ – среднее значение косинуса разности фаз.

Время пребывания атома, излучающего световую волну, в возбужденном состоянии составляет порядка 10^{-8} с. Если атомы излучают световые волны независимо друг от друга, то разность фаз колебаний, приходящих в данную точку пространства, меняется примерно с таким же интервалом времени. Глаз не способен видеть мигания света, меняющиеся за столь короткое время. Его инерционность равна ~ 0.1 с. В течение этого времени глаз усредняет все световые сигналы, попадающие в него и реагирует на среднее за время τ значение интенсивности, которое определяется выражением (2). Среднее значение $\langle \cos \Delta\varphi \rangle$ за время τ равно:

$$\langle \cos \Delta\varphi \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos \Delta\varphi dt. \quad (3)$$

Если разность фаз $\Delta\varphi$ за время τ меняется беспорядочно, она будет принимать любые значения от 0 до 2π , $\cos \Delta\varphi$ – значения от -1 до +1, а интеграл (3) – равняться 0. Тогда $I = I_1 + I_2$, и в любой точке пространства интенсивности света от двух источников складываются независимо, волны не усиливают и не ослабляют друг друга, то есть интерференции не наблюдается. Именно с таким случаем мы встречаемся в повседневной практике.

Для того чтобы интерференционная картина была устойчива и ее можно было бы наблюдать глазом или с помощью окуляра, разность фаз колебаний $\Delta\varphi$ в данной точке должна сохраняться постоянной в течение времени инерции глаза τ . Волны, имеющие одинаковые частоты колебаний и постоянную во времени разность фаз, называются когерентными. Когерентные волны, накладываясь друг на друга, дают устойчивую интерференционную картину, представляющую собой чередующиеся светлые и темные полосы. Если складываются пучки монохроматического света, например, красного, полосы будут иметь красную и черную

окраску. Если складываются пучки белого света, полосы будут иметь радужную окраску.

Выясним, от чего зависит разность фаз колебаний двух волн, проходящих в данную точку. Уравнения накладывающихся плоских волн имеют вид:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} n_1 s_1\right) \\ E_2 &= E_{02} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 s_2\right) \end{aligned} \quad (4)$$

где λ_0 – длина световой волны в вакууме; n_1, n_2 – показатели преломления тех сред, по которым распространяются волны; s_1, s_2 – пути, пройденные волнами от когерентных источников. Вычтя выражения, стоящие под символом косинуса, получим разность фаз колебаний в данной точке:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_2 s_2 - n_1 s_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta. \quad (5)$$

Величина $\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1$ называется оптической разностью хода волн, а произведение ns – оптической длиной пути световой волны. Если при наложении двух волн в данной точке разность фаз колебаний окажется равной $\Delta\varphi = 2m\pi$ (а оптическая разность хода волн, соответственно, равна четному числу полуволен $\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}$, где $m = 0; \pm 1; \pm 2 \dots$, то $E_0 = E_{01} + E_{02}$ и в данной точке будет наблюдаться максимум интенсивности света $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$. Если разность фаз будет равна нечетному числу π , то есть $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$, что соответствует оптической разности хода, равной нечетному числу полуволен $\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$, то будет наблюдаться минимум интенсивности света. В этом случае $E_0 = E_{01} - E_{02}$.

От двух обычных источников света, например, ламп накаливания, интерференция не наблюдается, так как атомы нитей ламп излучают свет независимо друг от друга и разность фаз колебаний в данной точке не будет постоянной. Две когерентные волны (которые могут интерферировать) можно получить, если световую волну, идущую от данного источника света, разделить на две, а затем их вновь соединить. Это можно сделать с помощью, например, двух параллельных щелей, освещаемых источником света (опыт Юнга); двух зеркал, установленных друг к другу под углом, близким к 2π (бизеркала Френеля); двух призм с очень малым углом преломления, соединенных своими основаниями (бипризма Френеля) и др. В этих случаях мы получим два пучка когерентных волн, идущих, соответственно, от двух щелей; отраженных от двух зеркал; преломленных в двух призмах, то есть в каждом из случаев

мы получим два когерентных источника света и сможем наблюдать устойчивые интерференционные картины.

Найдем положение полос и расстояние между ними в интерференционной картине, полученной от двух когерентных источников. На рис. 1 показаны два когерентных источника света C и C' , например, две параллельные щели.

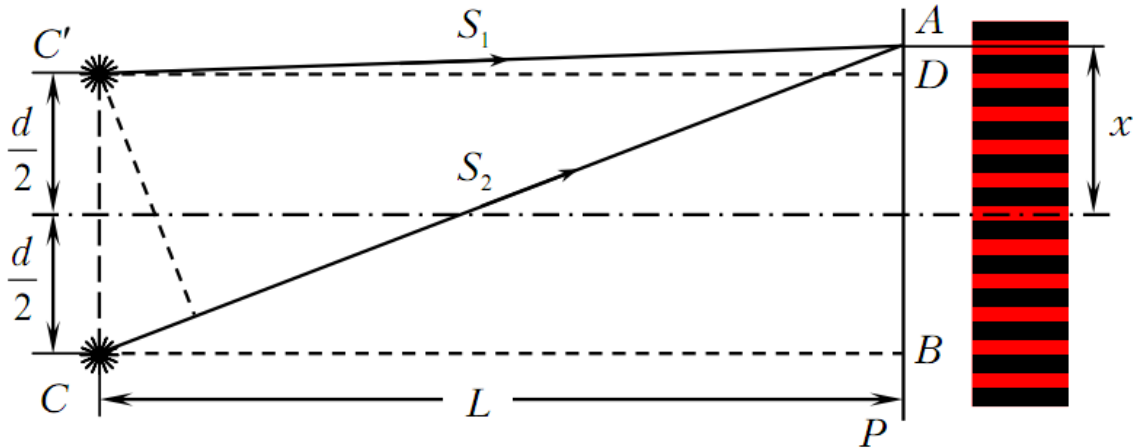


Рис. 1. Интерференционная картина от двух когерентных источников C и C'

На экране P наблюдается интерференционная картина в виде множества параллельных светлых и темных полос. Пусть d – расстояние между источниками; L – расстояние от источников до экрана P ; x – расстояние от центра картины до некоторой интерференционной полосы, проходящей через точку A .

Из рисунка видно, что $S_2^2 = L^2 + (x + \frac{d}{2})^2$ (из треугольника ABC), $S_1^2 = L^2 + (x - \frac{d}{2})^2$ (из треугольника ADC'). Вычтя второе уравнение из первого, находим

$$S_2^2 - S_1^2 = (S_2 - S_1)(S_2 + S_1) = 2xd \quad (5)$$

Если $d \ll L$ и $x \ll L$, что соответствует обычным условиям наблюдения, то можно считать приближенно, что $S_1 + S_2 = 2L$. Считаем, что свет распространяется в вакууме. Тогда из уравнения (5) получим:

$$x = \frac{\Delta \cdot L}{d} \quad (6)$$

Используя условия максимумов и минимумов света при интерференции и выражение (6), можно найти положения максимумов и минимумов:

$$x_{\max} = \frac{m\lambda L}{d}, \quad x_{\min} = \frac{(2m+1)\lambda L}{d}. \quad (7)$$

Из формул (7) можно определить расстояние между соседними темными (или светлыми) полосами:

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d} \quad (8)$$

Устойчивые интерференционные картины получаются также при отражении света от тонких прозрачных слоев, например, от пленки бензина на воде, от мыльных пленок, от воздушного слоя между стеклянной линзой и пластиной, на которой установлены линза (кольца Ньютона).

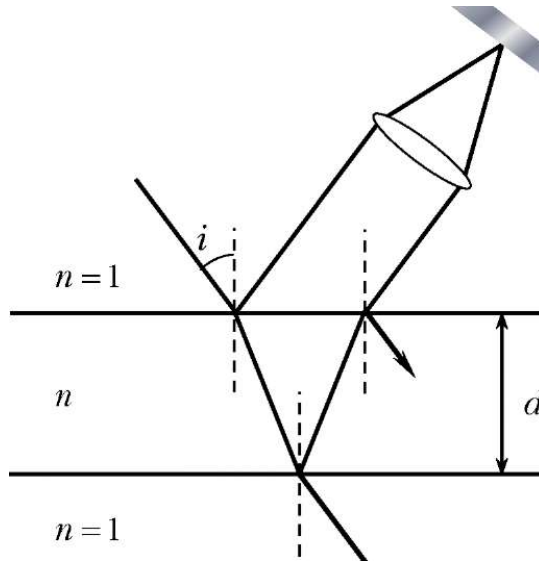


Рис. 2. Интерференция в тонких пленках

При интерференции двух волн, отраженных от верхней и нижней границ тонкого слоя (рис. 2), оптическая разность хода волн равна:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} \quad (9)$$

где d – толщина слоя, n – показатель преломления пленки (слоя); i – угол падения световых лучей, λ_0 – длина световой волны в вакууме. Второй член в правой части уравнения (9) обусловлен тем, что при отражении света от оптически более плотной среды вектор напряженности электрического поля скачком меняет свое направление на противоположное, или, как говорят, происходит «потеря полволны». Поэтому к оптической разности хода добавляется (или отнимается) $\lambda_0/2$.

Интерференционная картина, образующаяся при отражении света от тонкой воздушной прослойки между линзой и соприкасающейся с ней стеклянной пластинкой, называется кольцами Ньютона. Она представляет собой множество концентрических светлых и темных колец. В этом случае оптическая разность хода интерферирующих лучей 1 и 2 (рис. 3, 4) при нормальном падении лучей ($i = 0$) равна:

$$\Delta = 2d_m + \frac{\lambda_0}{2} \quad (10)$$

Толщину воздушного слоя d_m в том месте, где наблюдается одно из интерференционных колец, можно выразить через радиус кривизны линзы R и радиус данного кольца r_m (см. рис. 3): $R^2 = (R - d_m)^2 + r_m^2 \Rightarrow d_m(2R - d_m) = r_m^2$.

Так как $d_m \ll 2R$, получим $2d_m R \approx r_m^2$ и

$$d_m = \frac{r_m^2}{2R}. \quad (11)$$

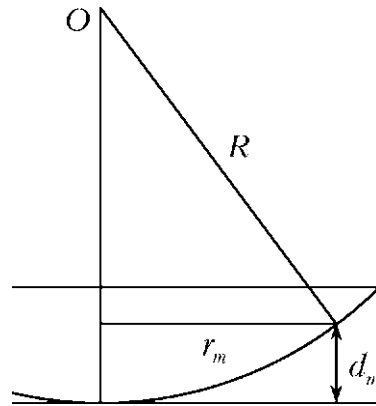


Рис. 3. Связь между толщиной d_m воздушного слоя и радиусом кольца R

Для темных колец $\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}$, и из (10) и (11) найдем выражение для радиусов темных колец Ньютона

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

где m – порядковый номер темного кольца, отсчитываемый от центрального темного пятна, принимаемого за нулевое.

Для колец с номерами n и m можно записать

$$d_m - d_n = \frac{r_m^2}{2R} - \frac{r_n^2}{2R} = \frac{\lambda}{4}(2m + 1) - \frac{\lambda}{4}(2n + 1). \quad (13)$$

Выразим из уравнения (13) длину волны, заменив для удобства радиусы колец их диаметрами:

$$\lambda = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4R(m - n)} \quad (14)$$

Эта формула пригодна для светлых и темных колец как в отраженном, так и в проходящем свете.

Выполнение работы

1. Добиться четкого изображения картины колец на экране, регулируя высоту положения лазера и меняя положение пластины и линзы с помощью регулировочных винтов (рис. 4).

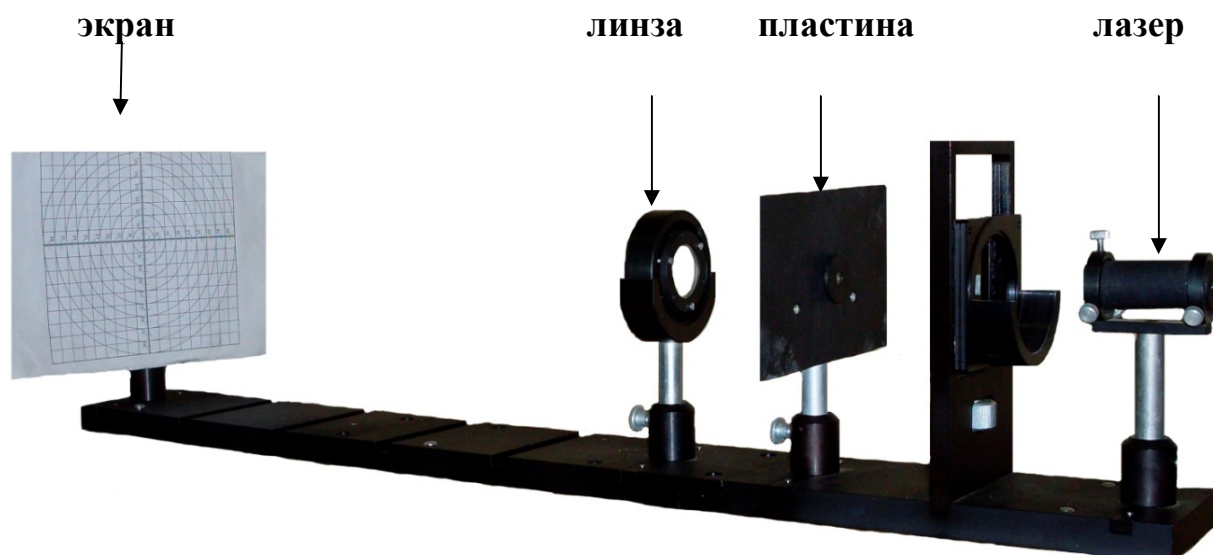


Рис. 4. Схема установки для наблюдения колец Ньютона

2. Измерить несколько раз (не менее 3-х) диаметры отчетливо видимых светлых колец Ньютона в двух взаимно перпендикулярных направлениях и занести результат измерений в таблицу.

3. Комбинируя кольца в пары, найти по уравнению (14) несколько значений длины волны монохроматического света. Следует учесть, что на экране получается шестикратно увеличенное изображение колец. Радиус кривизны линзы принять равным 50 м.

4. Оценить погрешность выполненных прямых и косвенных измерений.

Контрольные вопросы

1. Какие источники света называются когерентными?
2. Условия максимума и минимума в тонких пленках для отраженных и проходящих лучей.
3. Кривые равной толщины и равного наклона.
4. Каково происхождение интерферирующих волн в кольцах Ньютона?
5. Почему в отраженном свете в центре колец Ньютона возникает темное пятно?
6. Почему при освещении белым светом кольца становятся радужными?
7. Какова будет окраска первого кольца при освещении линзы белым светом?
8. Начертите ход лучей в системе плоская пластина – плосковыпуклая линза при произвольном угле падения.

9. Каким будет центральное пятно в отраженном свете, если между линзой и пластинкой в точке соприкосновения попадет пылинка и возникнет зазор $\frac{\lambda}{4}$?

10. Как изменится картина колец, если между пластинкой и линзой вместо воздуха поместить воду?

11. Выведите формулу оптической разности хода при интерференции в тонкой пленке.

12. Интерферометры Рэлея, Жамена. Как измерить малые углы, толщины и расстояния до звездных объектов?

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988.– 496 с.
2. Лансберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.– 926 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980.– 751 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Цель работы: изучение интерференции поляризованных лучей и практическое определение внутреннего напряжения в твердых телах оптическим методом.

В работе используются: поляризационная установка полярископ ПКС – 500.

Теоретическая часть

Свет является одной из форм существования движущейся материи. Природа света электромагнитная, а свойства его двойкие: волновые и корпускулярные (фотонные).

По электромагнитной теории Максвелла, свет представляет собой электромагнитные колебания с длиной волн от 3,8 до 7,6 мкм. В электромагнитной волне колебания вектора напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей происходит во взаимно перпендикулярных плоскостях перпендикулярно направлению распространения волн, т.е. световые волны поперечны.

Свет, взаимодействуя с веществом, оказывает на него, главным образом, влияние со стороны перпендикулярного электрического вектора. Действие же переменного магнитного поля в этом случае незначительно. Поэтому при изучении световых явлений рассматривают только вектор \vec{E} , который называют световым.

Источниками световых волн являются возбужденные атомы и молекулы, испускающие колебания независимо друг от друга, по всевозможным направлениям. Образующиеся при этом волны и соответствующие им лучи называются естественными. Источниками электромагнитных волн являются Солнце, лампы накаливания и др. источники света.

Если же колебания вектора \vec{E} происходят в одной плоскости, такой свет называют плоско-поляризованным. Когда колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений, мы имеем частично поляризованный свет.

Плоскость, в которой вектор \vec{E} совершает колебания, называют плоскостью колебания, а плоскость ей перпендикулярная называется плоскостью поляризации. Она совпадает с плоскостью, колебания вектора магнитной напряженности \vec{H} . Поляризованный свет можно получить следующим образом:

1. Путем отражения естественных лучей от диэлектрика, когда выполняется закон Брюстера, т.к. $tgi = n$, где i – угол падения, а n – показатель преломления диэлектрика.

2. При многократном преломлении в стопе стеклянных пластинок (стопа Столетова).

3. Пропускание света через анизотропную среду. Если естественный луч проходит через анизотропную среду, например, прозрачный кристалл с невысокой степенью симметрии, то он испытывает двойное лучепреломление.

На рис. 1 естественный луч попадает под углом i к поверхности кристалла исландского штата. В кристалле образуются два луча: обыкновенный (o) и необыкновенный (e). Обыкновенный луч подчиняется законам преломления на границе раздела двух изотропных сред, т.е.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = n_{12} = const$$

Обыкновенный луч распространяется в кристалле по всем направлениям с одинаковой скоростью v_2 , необыкновенный же луч не подчиняется закону преломления. Он распространяется в кристалле в *разных направлениях с различной скоростью*. Для него показатель преломления не является постоянной величиной, а зависит от угла падения, т.е.

$$\frac{\sin i}{\sin r'} = n' \neq const.$$

В кристалле исландского штата имеется направление, параллельно которому не наблюдается двойного лучепреломления. В этой случае обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются с одинаковой скоростью. Это направление называют оптической осью кристалла. Если в кристалле имеется одно такое направление, то кристалл называют одноосным (исландский шпат, кварц, турмалин), если два, то двуосным (гипс, слюда).

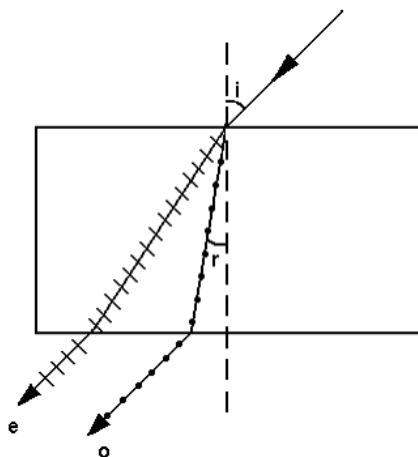


Рис. 1. Двойное лучепреломление естественного света при прохождении через прозрачный кристалл

Обыкновенные и необыкновенные лучи поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. В обыкновенном луче плоскость колебаний перпендикулярна плоскости главного сечения, а в необыкновенном луче колебания светового вектора лежат в плоскости главного сечения.

Плоскостью главного сечения называют плоскость, проходящую через падающий луч и оптическую ось кристалла.

Луч обыкновенный и необыкновенный, выходя из кристалла, идут параллельно друг другу, обладают одинаковыми свойствами и различаются только лишь направлением колебаний вектора \vec{E} . Устройство, с помощью которых из естественного луча получают поляризованный, называют поляризатором. Устройство, служащее для обнаружения поляризации, называют анализатором.

В качестве поляризатора и анализатора чаще применяют призмы полярроиды.

Призма Николя

Для изготовления призмы Николя (рис.2) естественный кристалл исландского шпата вырезают так, чтобы длинное плечо было в 3,75 раза больше короткого. Две грани АД и ВС срезают и доводят угол, который они образуют с основанием до 68° .

Затем кристалл распиливают на две части по AC под углом 90° к новым граням и склеивают обе половины канадским бальзамом (смола канадской пихты с показателем преломления $n=1,5$). Падающий на призму Николя естественный свет претерпевает двойное лучепреломление. Обыкновенный луч пройдет сквозь призму, не преломляясь, а необыкновенный луч претерпит полное отражение на слое бальзама под углом меньше предельного.

Поляриды

Поляризованный свет можно получить с помощью поляроидов. Поляриды представляют собой тонкие (около 50 мкм) пленки целлулоида, заключенные между двумя пластинами стекла или целлулоида.

Существует несколько видов поляроидов: герпатитовые (определенным образом ориентированные мелкие кристаллы геропатита), йодно-поливиниловые (сильно растянутые в одном направлении пленки поливинилового спирта), поливиниловые (растянутые пленки).

Преимущество поляроидов по сравнению с поляризованными призмами состоит в возможности получить поляризующие системы с большой апертурой.

Поляриды с успехом могут применяться в интервале длин волн от 0,40 до 0,75 мкм со степенью поляризации $P = 99\%$.

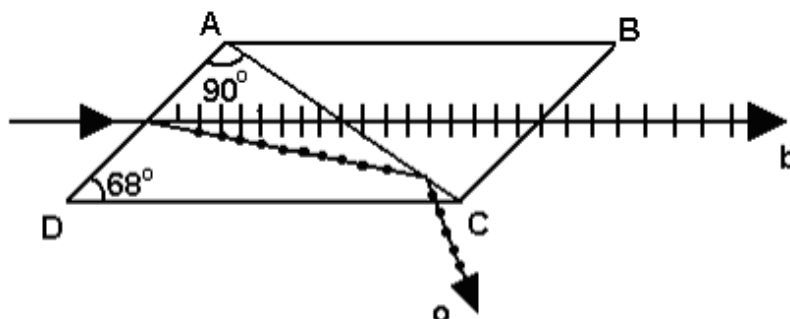


Рис. 2. Двойное лучепреломление естественного света при прохождении через кристалл исландского шпата

Мерой или степенью поляризации является функция

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}},$$

где I_{\perp} и I_{\parallel} - интенсивности света, поляризованного в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Оптический метод исследования напряжений

Оптический метод исследования напряжений (метод фотоупругости) основан на явлении интерференции поляризованных лучей, сущность которого состоит в следующем. Некоторые изотропные прозрачные вещества (стекло, целлулоид, пластмасса) под действием механических напряжений приобретают свойство двойного лучепреломления. Мерой, возникшей анизотропии, является разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей. Экспериментально установлено, что эта разность показателей преломления для лучей падающих перпендикулярно к оптической оси образца пропорциональна напряжению P , т.е. силе, приходящейся на единицу площади S :

$$n_o - n_e = k \frac{F}{S} = kP,$$

где k – коэффициент фотоупругости, характеризующий упругие свойства материала образца.

Так как n_o и n_e различны, то лучи проходят различные пути $n_o d$ и $n_e d$, где d – толщина образца. Разность хода, приобретаемая лучами равна

$$\Delta = (n_o - n_e)d. \quad (1)$$

Тогда $\Delta = kPd$.

Схема для изучения искусственной анизотропии изображена на рис. 3.

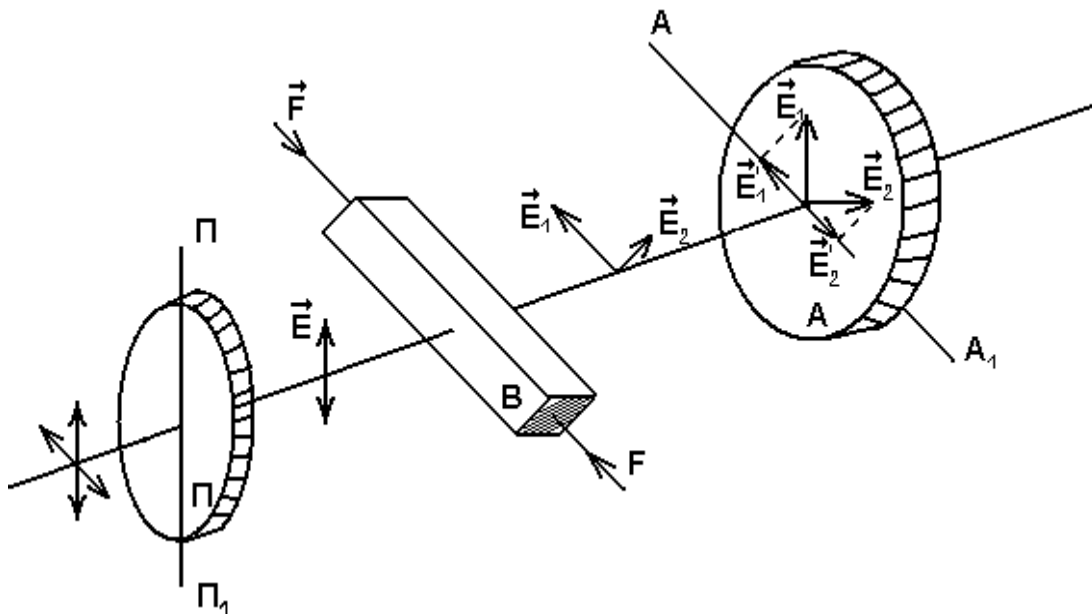


Рис. 3. Схема для изучения искусственной анизотропии

Здесь P – поляризатор, A – анализатор, B – образец, деформируемый силой F , PP_1 и AA_1 – пропускные направления поляризатора и анализатора соответственно

Для наблюдения эффекта фотоупругости поляризатор P и анализатор A устанавливаются на темноту (в отсутствии напряжений). При прохожде-

нии поляризованного луча через деформируемое тело B появится два луча \vec{E}_1 и \vec{E}_2 , поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Анализатор пропускает колебания в одном направлении AA_1 . Через него пройдут только составляющие \vec{E}'_1 и \vec{E}'_2 падающих лучей \vec{E}_1 и \vec{E}_2 . Эти составляющие \vec{E}'_1 и \vec{E}'_2 при выходе из анализатора интерферируют между собой, т.к. они получены из одного поляризованного луча и их колебания сведены к одной плоскости, т.е. они когерентны.

Для светлых полос должно выполняться условие максимума

$$\Delta = m\lambda \quad (2)$$

Для темных – условие минимума

$$\Delta = (2m-1)\frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

Тогда из (1) и (2) следует, что

$$kPd = m\lambda \quad (4)$$

Для напряжения P получаем формулу

$$P = \frac{m\lambda}{kd} \quad (5)$$

Интерференционная картина в белом свете возникает в виде цветных полос одного цвета, которые называют изохромами. Каждой изохrome соответствует определенное значение напряжения. Если к некоторой точке образца приложить силу F (рис. 4), то наблюдается для белого света интерференционная картина в виде цветных полос (изохром). Постепенное увеличение силы приводит к перемещению изохром и появлению максимумов больших порядков (2, 3, ...).

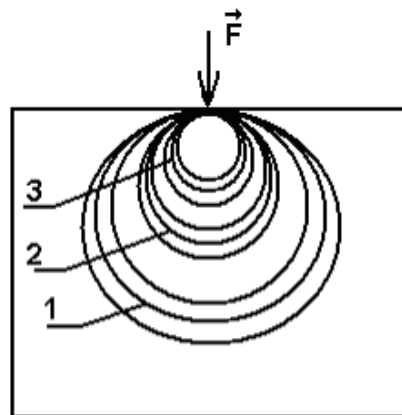


Рис.4. Интерференционная картина поляризованных лучей в виде полос – изохром. Номера 1,2,3 указывают порядки интерференции

Каждому цвету будет соответствовать определенное значение напряжения, зависящее от порядка максимума (см. уравнение 5). На рис.4 пока-

заны три интерференционных порядка для трех цветов. Для первого порядка изохромам соответствует меньшее напряжение, чем для третьего порядка. Зная зависимость напряжения от величины интерференционного порядка для различных цветов (рис.5), можно определить напряжение, соответствующее данной полосе.

По характеру изохром можно судить о распределении напряжения внутри прозрачного тела.

Оптический метод исследования напряжений широко применяется на практике для расчета распределения напряжений в деталях особенно сложной конфигурации. Для этого из прозрачного вещества изготавливают уменьшенную деталь (модель детали), на которой исследуют распределение напряжений. Эти напряжения соответствуют изучаемой прозрачной детали, например, зеленой во втором порядке (3_2).

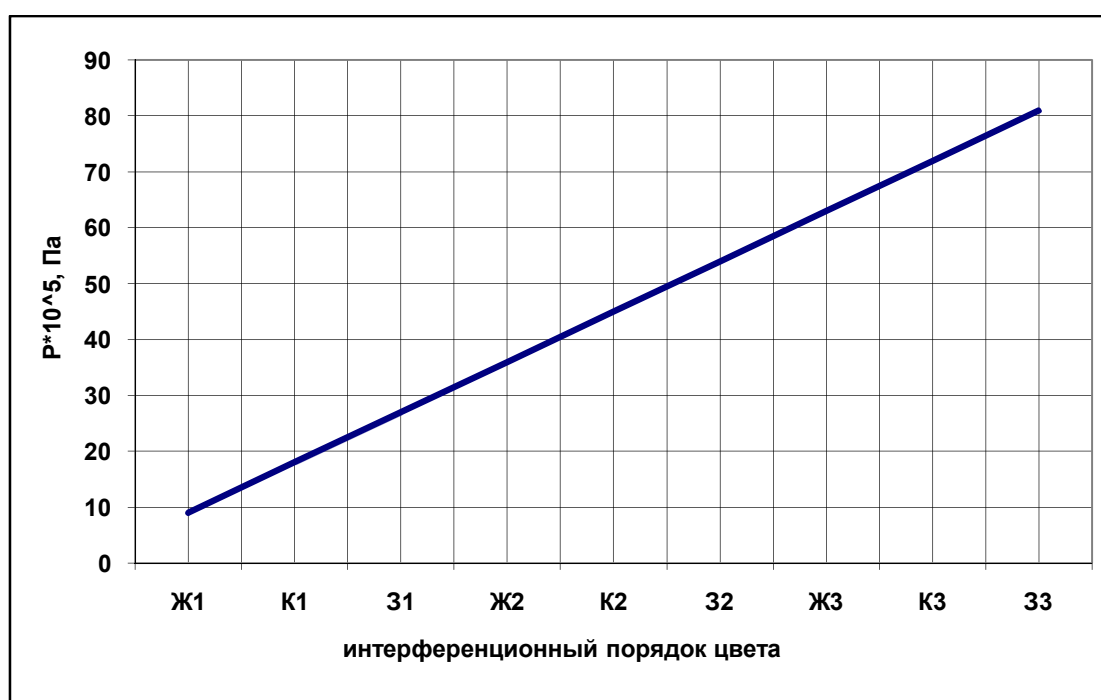
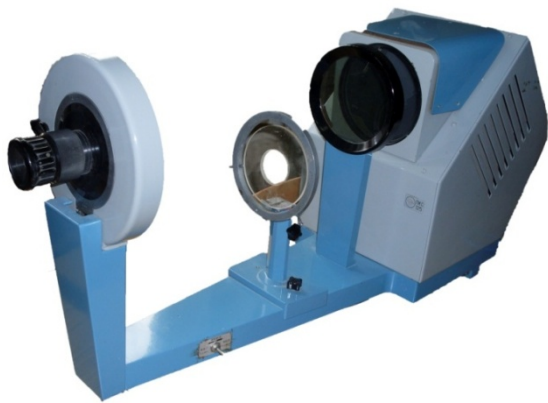


Рис. 5. Зависимость напряжения $P_{от}$ величины интерференционного порядка для различных цветов. Ж – желтый, К – красный, З – зеленый

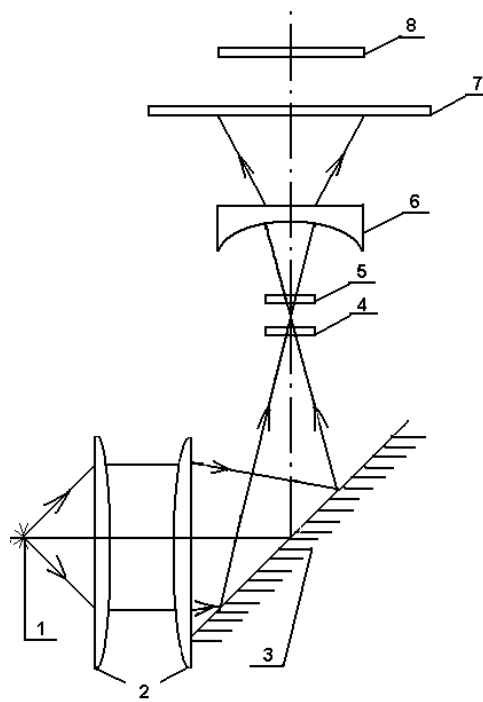
Выполнение работы

Лабораторная установка

В качестве поляризационной установки использован полярископ ПКС – 500, внешний вид которой представлен на рис. 6. Схема хода лучей в полярископе ПКС-500 от источника света представлена на рис. 7.



**Рис. 6. Внешний вид
поляризационной установки
ПКС-500**



**Рис. 7. Ход лучей
в полярикопе ПКС-500**

Пучок световых лучей от источника света 1 проходит конденсор 2, зеркало 3 и поляризатор (поляроид) 4. Затем плоскополяризованный луч проходит через кварцевую пластинку 5, двояковыпуклую линзу 6 (для рассеяния пучка лучей), матовое стекло 7 в деревянной раме и анализатор (поляроид) 8.

Исследуемый образец помещается между матовым стеклом и анализатором. В образце плоскополяризованный свет испытывает двойное лучепреломление. Образовавшиеся при этом обыкновенный и необыкновенный лучи имеют колебания электрического вектора взаимноперпендикулярные и сдвинутые по фазе в зависимости от величины напряжения и пути луча в образце. Анализатор приводит колебания обыкновенного и необыкновенного лучей в одну плоскость, в результате чего происходит интерференция лучей.

Кварцевая пластинка применяется для увеличения разности хода между обыкновенным и необыкновенным лучами, так как разность хода, даваемая исследуемым образцом, невелика.

Задание 1. Визуальное наблюдение цветной поляризации при искусственной анизотропии.

1. Ознакомиться с устройством полярикопа ПКС – 500.
2. Закрепить образец из оргстекла в тисках, расположенных между матовым стеклом и анализатором.

3. Наблюдать интерференционную картину в исходном образце во время периодического включения лампы ножной кнопкой. Кратковременность включения лампы исключает перегрев поляроидов, приводящий их в негодное состояние.

4. Создать напряжения сжатия с помощью тисков и наблюдать картину цветных полос. При этом обратить внимание на расположение изохром.

5. Повторить п.п. 2,3 и 4 для стеклянной пластинки или трубки; для полиэтиленовой пленки.

6. Создать анизотропию стекла термообработкой.

7. Наблюдаемую каждый раз картину расположения изохром зарисовать цветными карандашами.

Задание 2. Определение внутренних напряжений оптическим методом.

Пользуясь графиком рис.5, определить внутреннее напряжение в деформируемых образцах для желтой и зеленой полосы на зарисованных картинах.

Таблица интерференционных цветов в напряженном образце в зависимости от разности хода

Ц в е т а	Разность хода, мкм
Желтый	325
желтовато-зеленый	275
Зеленый	200
Голубовато-зеленый	145
Голубой	100 растяжение
Синий	25
Фиолетовый	0
Пурпуровый	25
Красный	70
Оранжевый	130
Ярко-желтый	200
Желтый	260
Белый	320

Контрольные вопросы

1. Какой свет называется естественным, линейно поляризованным, частично поляризованным?
2. Какими способами можно получить поляризованный свет?
3. Объясните двойное лучепреломление.

4. Что такое оптическая ось и главное сечение кристалла?
5. Что такое искусственная анизотропия и отчего зависит степень анизотропии при механической деформации?
6. Объясните явление интерференции поляризованных лучей.
7. В чем заключается оптический метод исследования напряжений?
8. Как устроен полярископ?
9. Каково назначение кварцевой пластинки в полярископе?

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики.Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988.– 496 с.
2. Лансберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.– 926 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М. : Наука, 1980.– 751 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ И ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ЛИНЗ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА БЕССЕЛЯ

Цель работы: определение фокусных расстояний положительной и отрицательной линз с помощью метода Бесселя.

В работе используются: лазер, двумерная дифракционная решетка, собирающая и рассеивающая линзы.

Теоретическая часть

Линза – это один из основных элементов оптических систем, предназначенных для получения оптических изображений. Она представляет собой оптически прозрачное тело (например, из стекла), ограниченное с двух сторон преломляющими (чаще всего сферическими) поверхностями. Основные типы линз показаны на рис. 1. Различают тонкие и толстые линзы.

Если расстояние O_1O_2 (рис. 2) между преломляющими поверхностями линзы значительно меньше радиусов кривизны, то линза называется тонкой.

В противном случае линза является толстой.

Для тонкой линзы вершины O_1 и O_2 можно считать совпадающими в точке O , называемой оптическим центром линзы. Причем ось, проходящая через оптический центр линзы и центры кривизны ее преломляющих поверхностей, называется главной оптической осью линзы (прямая PP' , рис. 2).

Если направить луч света параллельно главной оптической оси (вблизи нее), то, преломившись, он пройдет через точки F_1 или F_2 (в зависимости от того, слева или справа от линзы падает на нее луч), лежащие на главной оптической оси линзы. Эти точки называют главными фокусами линзы, а сама линза, преломляющая лучи таким образом, называется собирающей (рис. 2, а).

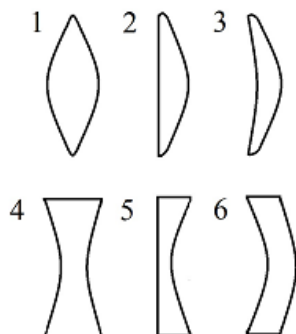
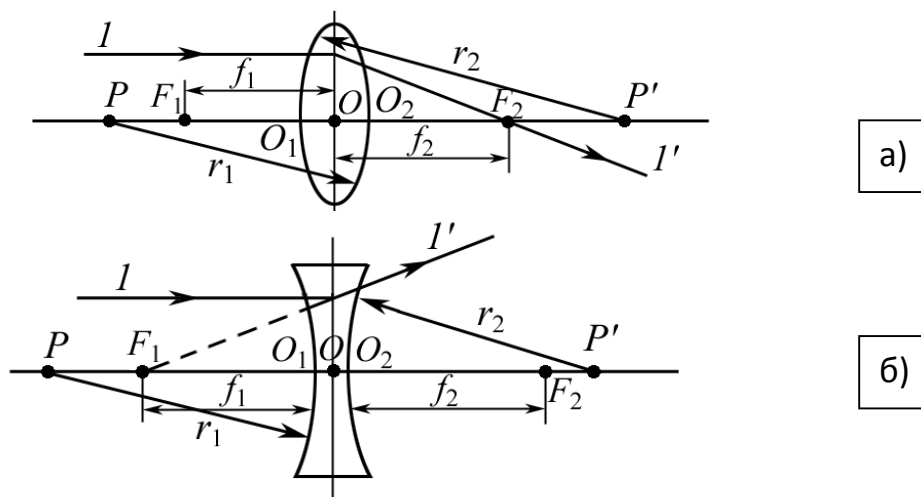


Рис. 1. Основные типы линз. Собирающие: 1 – двояковыпуклая, 2 – плоско-выпуклая, 3 – вогнуто-выпуклая; рассеивающие: 4 – двояковогнутая, 5 – плоско-вогнутая, 6 – выпукло-вогнутая



**Рис. 2. а) прохождение луча I , параллельного главной оптической оси через собирающую линзу, I' – преломленный луч;
б) прохождение луча I , параллельного главной оптической оси через рассеивающую линзу; I' – преломленный луч;
 r_1 и r_2 - радиусы кривизны преломляющих поверхностей линзы**

Если же после преломления светового луча линзой через точки F_1 или F_2 (главные фокусы) можно провести лишь прямую, представляющую продолжение преломленного луча в направлении, обратном направлению его распространения, то такая линза называется рассеивающей (рис. 2, б).

Расстояние между оптическим центром линзы и ее главными фокусами (расстояния f_1 или f_2) называют главными фокусными

расстояниями линзы. Они равны между собой, т.е. $f_1 = f_2 = f$, если слева и справа от линзы находится одна и та же среда (например, воздух).

Фокусное расстояние тонкой положительной (собирающей) линзы можно легко рассчитать, если с помощью этой линзы на экране получить действительное изображение предмета (рис. 3):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1}, \quad (1)$$

где f – главное фокусное расстояние тонкой линзы; a_2 – расстояние от линзы до изображения; a_1 – расстояние от линзы до предмета.

Однако у реальных (не тонких) линз все отрезки отсчитываются не от сферических поверхностей линзы, а от главных плоскостей, которые в общем случае не совпадают с поверхностями линзы (рис. 4). Главные плоскости могут лежать и внутри и вне линзы, совершенно несимметрично относительно ее сферических поверхностей. Главная плоскость представляет собой геометрическое место точек пересечения лучей, падающих на линзу параллельно главной оптической оси, и лучей, выходящих из линзы после преломления на двух ее поверхностях.

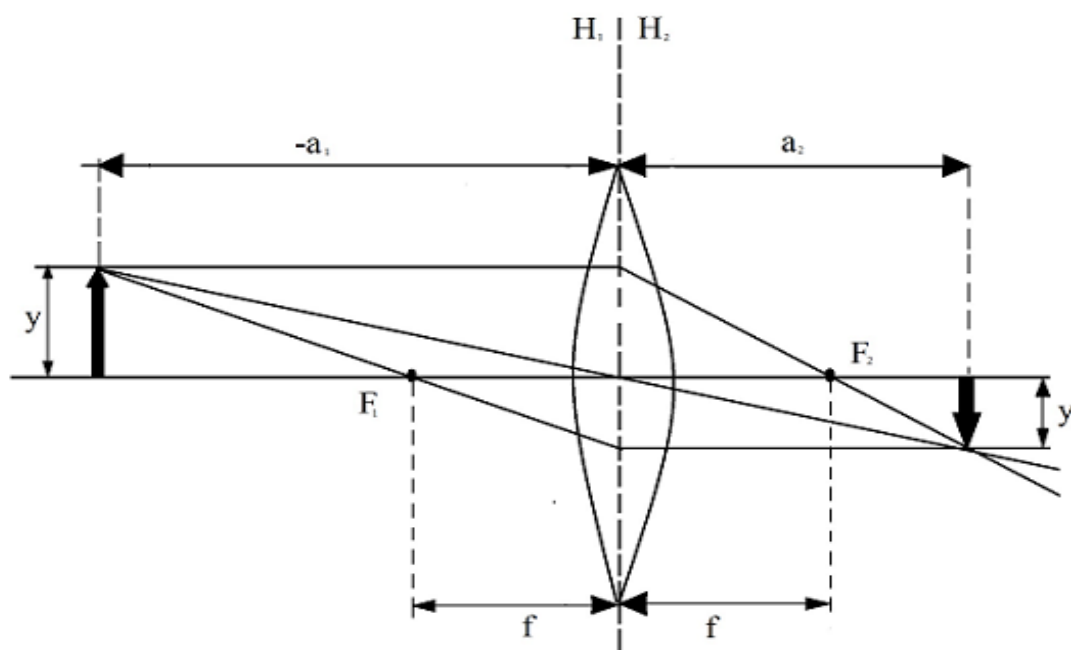


Рис. 3. Получение действительного изображения с помощью тонкой собирающей (положительной) линзы. y – предмет, y_1 – изображение предмета; главные плоскости для тонкой линзы H_1 и H_2 совпадают и проходят через ее оптический центр

Для расчета фокусного расстояния по формуле линзы в отрезках необходимо знать расстояния a_1 и a_2 , отсчитанные от главных плоскостей линзы, положение которых, как правило, неизвестно.

Точным методом определения величины фокусного расстояния линзы является метод Бесселя, который принципиально исключает влияние на результат местоположения главных плоскостей линзы.

Метод Бесселя заключается в следующем: если на оптической скамье расстояние между предметом y и экраном, на котором получается изображение предмета y' , взято больше четырех фокусных расстояний положительной линзы, то существуют два симметричных положения линзы, при которых на экране получаются четкие изображения предмета (рис. 5).

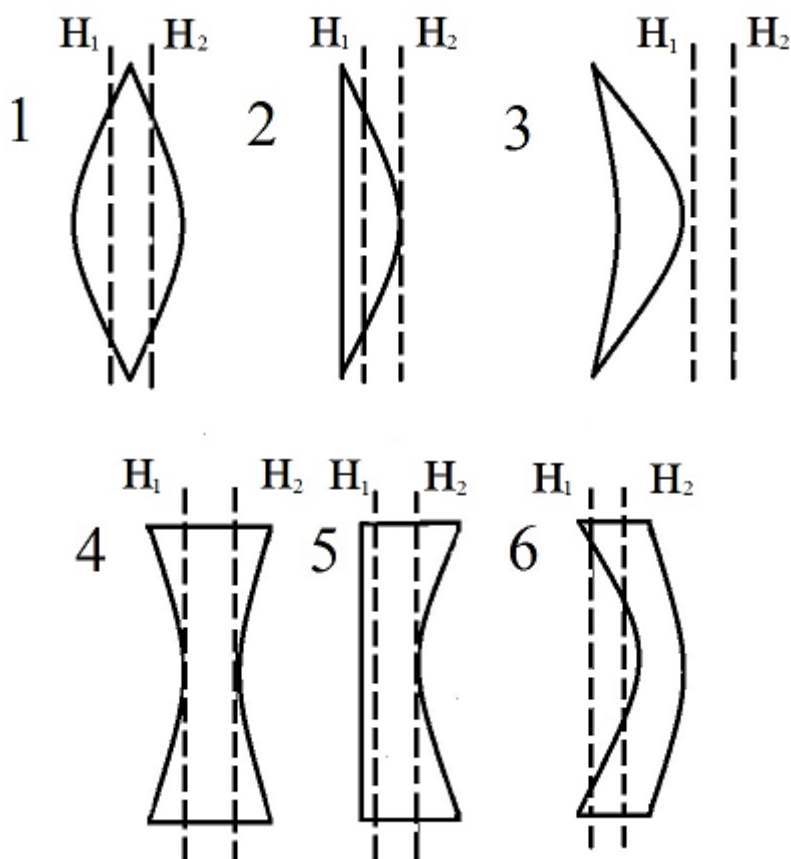


Рис. 4. Положения главных плоскостей для различных типов линз

При первом положении линзы на экране получается увеличенное изображение предмета y_1 , при втором – уменьшенное y_2 . (L – расстояние от предмета до экрана; A – расстояние между двумя положениями линзы).

Найдём эти положения из уравнения тонкой линзы (2) и условия (3). В формуле (3) мы пренебрегли расстоянием между главными плоскостями линзы по сравнению с L .

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a_2} + \frac{1}{|a_1|}, \quad (2)$$

$$|a_1| + |a_2| = L. \quad (3)$$

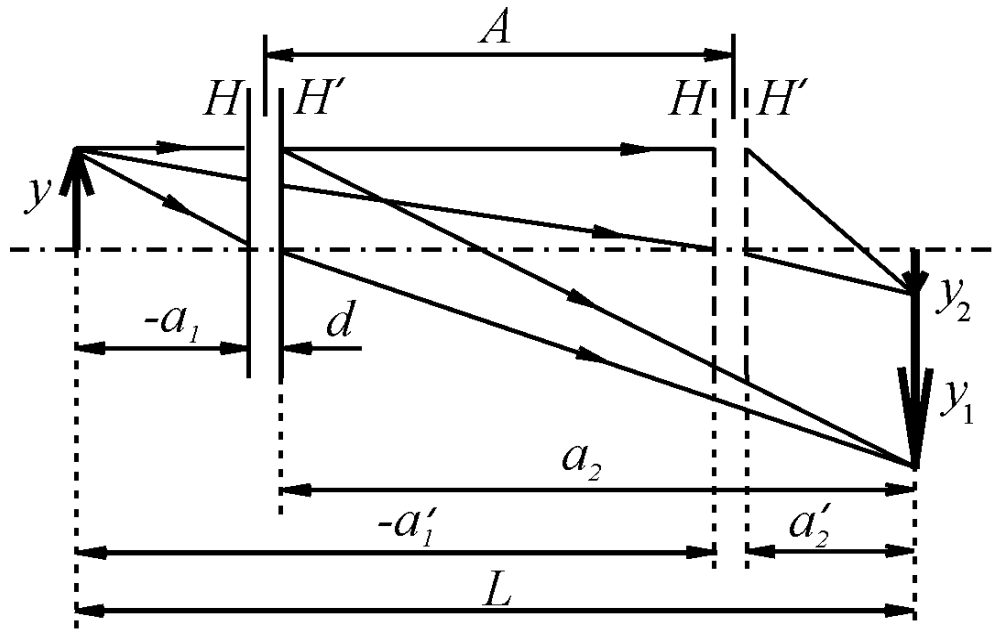


Рис. 5. Показано два симметричных положения линзы, при которых на экране получаются четкие изображения предмета y . При первом положении линзы на экране получается увеличенное изображение предмета y_1 , при втором – уменьшенное y_2

Выразим расстояние a_2 через расстояние $|a_1|$ и L из уравнения (3) и подставим это выражение в формулу линзы (2). Получится квадратное уравнение, которому должно удовлетворять расстояние между линзой и предметом $|a_1|$, для того чтобы на экране было чёткое изображение:

$$|a_1|^2 - L|a_1| + Lf = 0. \quad (4)$$

Если дискриминант этого уравнения больше нуля

$$L^2 - 4Lf \geq 0 \text{ или } L \geq 4f, \quad (5)$$

то существуют два решения, симметричных относительно середины промежутка предмет – экран:

$$|a_1| = \frac{L}{2} + \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - Lf}, \quad (6)$$

$$|a_1'| = \frac{L}{2} - \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - Lf}, \quad (7)$$

Условие (5) фактически означает, что чёткое изображение на экране можно получить только если расстояние от предмета до экрана превосходит фокусное расстояние линзы не менее, чем в четыре раза.

Расстояние A между двумя положениями линзы, которым соответствуют увеличенное и уменьшенное изображения предмета (см. рис. 5), равно разности расстояний $|a_1|$ и $|a_1'|$ и выражается через L и f как:

$$A = |a_1| - |a_1'| = 2\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - Lf}, \quad (8)$$

Решая уравнение (8) относительно фокусного расстояния, приходим к формуле определения фокусного расстояния по методу Бесселя

$$f = \frac{L^2 - A^2}{4L}. \quad (9)$$

Как видно из этой формулы, для вычисления фокусного расстояния положительной линзы достаточно знать расстояние от предмета до экрана L и расстояние между двумя положениями линзы A , которым соответствуют увеличенное и уменьшенное изображения предмета. Значения обоих этих отрезков (A и L) никак не связаны с положением главных плоскостей линзы, что и является главным достоинством метода Бесселя.

Непосредственно с помощью метода Бесселя определить фокусное расстояние отрицательной линзы невозможно, так как такая линза не дает действительных изображений на экране. Однако если отрицательную линзу вплотную сложить с такой положительной линзой, что они дадут положительную оптическую систему, фокусное расстояние такой системы можно будет определить по методу Бесселя. Оптическая сила системы линз, сложенных вплотную, определяется как сумма оптических сил отдельных линз системы, поэтому

$$\frac{1}{f_{\Sigma}} = \frac{1}{f_+} + \frac{1}{f_-}. \quad (10)$$

Определив по методу Бесселя фокусное расстояние положительной линзы f_+ и фокусное расстояние системы линз f_{Σ} , можно рассчитать и фокусное расстояние отрицательной линзы f_- :

$$f_- = \frac{f_{\Sigma} f_+}{f_+ - f_{\Sigma}}. \quad (11)$$

Выполнение работы

1. Лабораторная установка

Для имитации светящегося предмета в лабораторной установке РМС 1 применяется двумерная дифракционная решётка (центральная зона объекта МОЛ-1), освещаемая лазером.

Полный внешний вид установки изображён на рис. 6.

Из-за дифракции лазерный пучок за решёткой расщепляется на множество расходящихся лучей, которые дают характерное крестообразное расположение ярких пятен на экране.

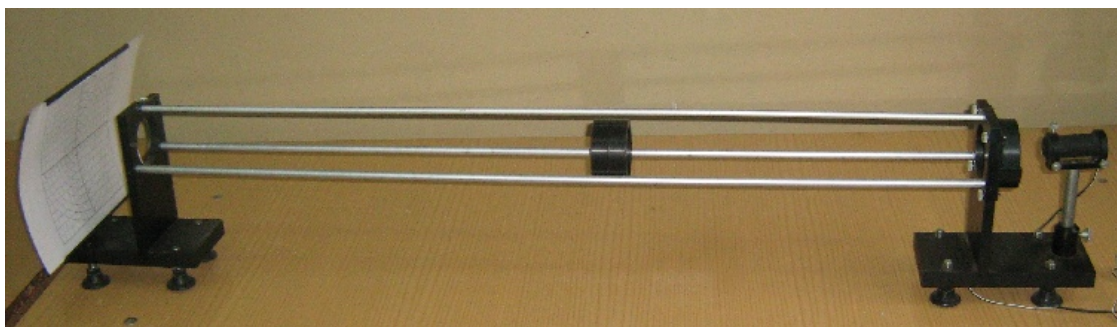


Рис.6. Внешний вид установки для определения фокусных расстояний собирающей и рассеивающей линзы методом Бесселя

Схема установки изображена на рис. 7. Лазер 1 подсвечивает дифракционную решётку 3. Пятно, возникающее на решётке при освещении её лазерным лучом, играет роль светящегося «предмета». Расходящиеся от «предмета» лучи исследуемая линза или система линз 4 сводит на экране 5 в пятно-изображение. Элементы установки размещены на оптической скамье. Решетка и линзы устанавливаются в оправах, перемещаемых вдоль стержней 2 оптической скамьи. Каждая из линз может быть независимо удалена из оптического тракта. Экран закреплен на специальном рейтере. Оптическая скамья снабжена метровой шкалой (лента рулетки, закрепленная в стойках), позволяющей определять положение элементов.

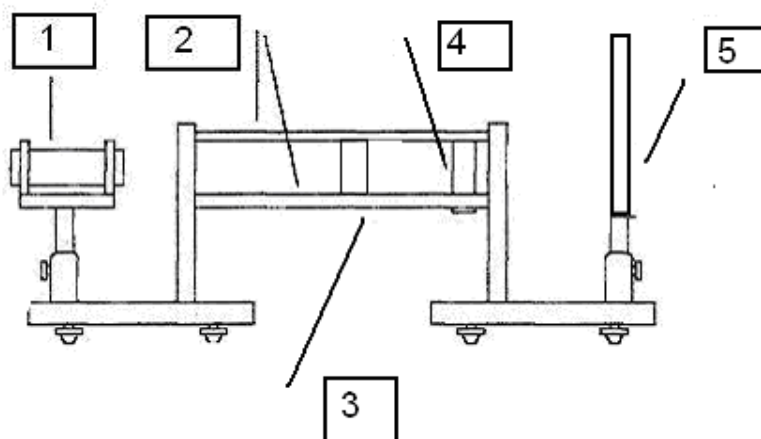


Рис. 7. Схема установки: 1 – лазер, 2- стержни оптической скамьи, 3 – дифракционная решетка, 4 – линза или система линз, 5 – экран

II. Измерения

1. Убрать линзы из оптического тракта. Включить лазер. Проверить правильность установки лазера, решетки и экрана. При правильной установке центральное дифракционное пятно должно находиться в центре экрана, и иметь круглую форму. Кроме того, при перемещении решетки вдоль оси на 20 см центральное пятно должно смещаться не более чем на 1мм.

2. Установить решётку и экран на расстоянии, указанном преподавателем и определить их координаты x и x' по шкале оптической скамьи.

3. Установить в тракт первую положительную линзу и, перемещая её, найти координаты x_1 и x_2 положений, при которых линза сводит лучи на экране в увеличенное и уменьшенное пятно-изображение. Повторить измерение координаты каждого положения пять раз. Результаты вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1

N	1	2	3	4	5	Средние значения для положительной линзы
$x_1, мм$						
$x_2, мм$						

4. Установить в тракт вторую отрицательную линзу. Произвести измерения п. 3 с системой, составленной из двух линз и результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2

N	1	2	3	4	5	Средние значения для системы линз
$x_1, мм$						
$x_2, мм$						

III. Вычисления и анализ

Вычислить расстояние L по формуле:

$$L = x' - x, \quad (10)$$

где x и x' – координаты решетки и экрана соответственно.

Найти средние значения координат x_1 и x_2 для положительной линзы и системы линз и определить по ним расстояние A в обоих случаях по формуле

$$A = \bar{x}_2 - \bar{x}_1, \quad (11)$$

где \bar{x}_1 и \bar{x}_2 – средние значения координат линзы при сведении лучей на экране.

Определить фокусные расстояния положительной линзы f_+ по формуле (9).

Определить фокусные расстояния системы линз f_2 по формуле (9). Рассчитать фокусное расстояние отрицательной линзы f_- по формуле (11).

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику четырем законам геометрической оптики:
 - 1) закону прямолинейного распространения света;
 - 2) закону независимости световых волн;
 - 3) закону отражения света;
 - 4) закону преломления света.
2. Формулировка принципа Ферма.
3. Докажите закон отражения и закон преломления света с помощью принципа Ферма.
4. Докажите закон отражения и закон преломления света, используя граничные условия для векторов магнитной индукции и напряженности электрического поля световой волны.
5. Понятие линзы. Оптические характеристики линзы: оптический центр, главная оптическая ось, фокус, фокусное расстояние, фокальная плоскость, оптическая ось. Какие лучи нужно использовать при построении изображения в линзах?
6. Построить изображение предметов в собирающей и рассеивающей линзах для всех случаев и для точки, лежащей на главной оптической оси.
7. Вывод формулы тонкой линзы.
8. Оптическая сила линзы, ее единица измерения.
9. Как определяется оптическая сила системы тонких линз?
В чем заключается метод Бесселя?
10. Дайте характеристику основных недостатков линз: сферической аберрации, астигматизму, дисторсии и хроматической аберрации.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988. – 496 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980. – 751 с.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 926 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА

Цель работы: ознакомление с дифракционными картинками различных типов, определение ширины одинарной дифракционной щели и определение постоянной двумерной дифракционной решетки.

В работе используются: лазер, одинарная дифракционная щель, двумерная дифракционная решетка, собирающая и рассеивающая линзы.

Теоретическая часть

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики. Дифракция приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени. Различают два случая дифракции света – дифракцию Френеля, или дифракцию в сходящихся лучах, и дифракцию Фраунгофера, или дифракцию в параллельных лучах. Характер дифракции зависит от значения безразмерного параметра:

$$\frac{b^2}{L\lambda} \begin{cases} \ll 1 & \text{– дифракция Фраунгофера,} \\ \approx 1 & \text{– дифракция Френеля,} \\ \gg 1 & \text{– свет распространяется по законам геометрической оптики,} \end{cases} \quad (1)$$

где b – размер препятствия, λ – длина световой волны, L – расстояние от препятствия до экрана наблюдения.

Дифракция Фраунгофера на одной щели

Схема наблюдения дифракции Фраунгофера на одной щели представлена на рис. 1. Параллельный пучок света от лазера **1** падает нормально на непрозрачную преграду с щелью шириной b . На экране наблюдаются чередующиеся светлые и темные полосы.

Расчет дает формулу распределения интенсивности света на экране в зависимости от угла дифракции φ в виде

$$I_\varphi = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi\right)^2}, \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность света в середине дифракционной картины (в направлении $\varphi = 0$; I_φ – интенсивность света в точке, положение которой определяется данным значением угла φ . В направлениях, удовлетворяющих условиям:

<i>min</i>	$b \sin \varphi_k = \pm m \lambda$	(3)
<i>max</i>	$b \sin \varphi_k = \pm (2m + 1) \cdot \lambda / 2$	(4)

Интенсивность колебаний результирующего поля соответственно равна нулю (дифракционные минимумы) или максимальна (дифракционные максимумы).

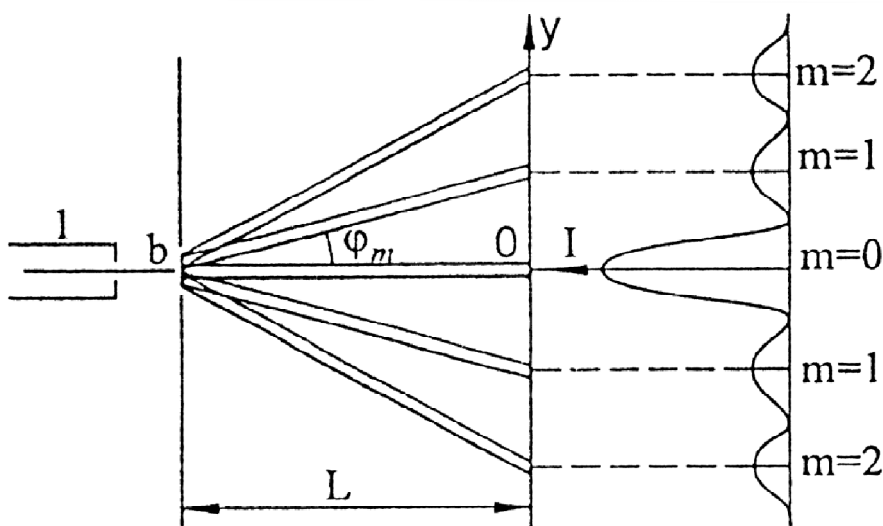


Рис. 1. Дифракция Фраунгофера на одной щели.
На рисунке также показано распределение интенсивности света
в зависимости от у-координаты экрана; 1 – лазер

Здесь $m = 1, 2, 3, \dots$. В направлении $\varphi = 0$ наблюдается самый интенсивный центральный максимум нулевого порядка. Ему соответствует 90% всего светового потока, выходящего из щели. Центральный максимум в 2 раза шире побочных максимумов.

Дифракция Фраунгофера на двух щелях

Рассмотрим дифракцию от двух параллельных щелей одинаковой ширины a и расположенных на расстоянии b друг от друга. Дифракционная картина наблюдается в фокальной плоскости линзы L . (рис. 2). На экран Э со щелями падает плоская монохроматическая волна длиной λ . Положение дифракционных максимумов и минимумов от одной щели не зависит от ее положения, а определяется направлением дифрагированных лучей. Это значит, что перемещение щели параллельно самой себе не приводит к изменению дифракционной картины. Следовательно, картины, создаваемые каждой щелью в отдельности будут совершенно одинаковыми.

Результирующую картину можно определить путем сложения этих двух картин с учетом интерференции волн, идущих от каждой из щелей. Очевидно, что в тех направлениях, в которых ни одна из щелей света не дает, не будет света и при двух параллельных щелях.

Условие минимума интенсивности

$$a \sin \varphi = k \lambda, \quad (5)$$

где $k = \pm 1, 2, 3, \dots$, выполняется и в данном случае. Кроме того, возможны направления, в которых колебания, посылаемые двумя щелями, взаимно уничтожаются. Возникают добавочные минимумы. Они будут наблюдаться в тех направлениях, которым соответствует разность хода

$\frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \dots, \frac{2m+1}{2}\lambda$ для волн, идущих от соответственных точек (отстоящих на расстоянии $\mathbf{a+b}$) обеих щелей. Такие направления определяются (см. рис. 2) условием

$$\Delta = (a + b) \sin \varphi = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (6)$$

где $m = \pm 0, 1, 2, 3, \dots$.

В направлениях, определяемых из условий

$$\Delta = (a + b) \sin \varphi = m\lambda, \quad (7)$$

где $m = \pm 0, 1, 2, 3, \dots$, действие одной щели усиливает действие другой. Этим направлениям соответствуют максимумы интенсивности.

Расстояния между первичными минимумами (от одной щели) зависят от ширины щели a . Если $a \ll a+b$, то между двумя первичными минимумами может расположиться несколько минимумов и максимумов. Кривая на рис. 2 показывает распределение интенсивностей света при дифракции на двух параллельных щелях. Пунктиром показано распределение интенсивности света от одной щели.

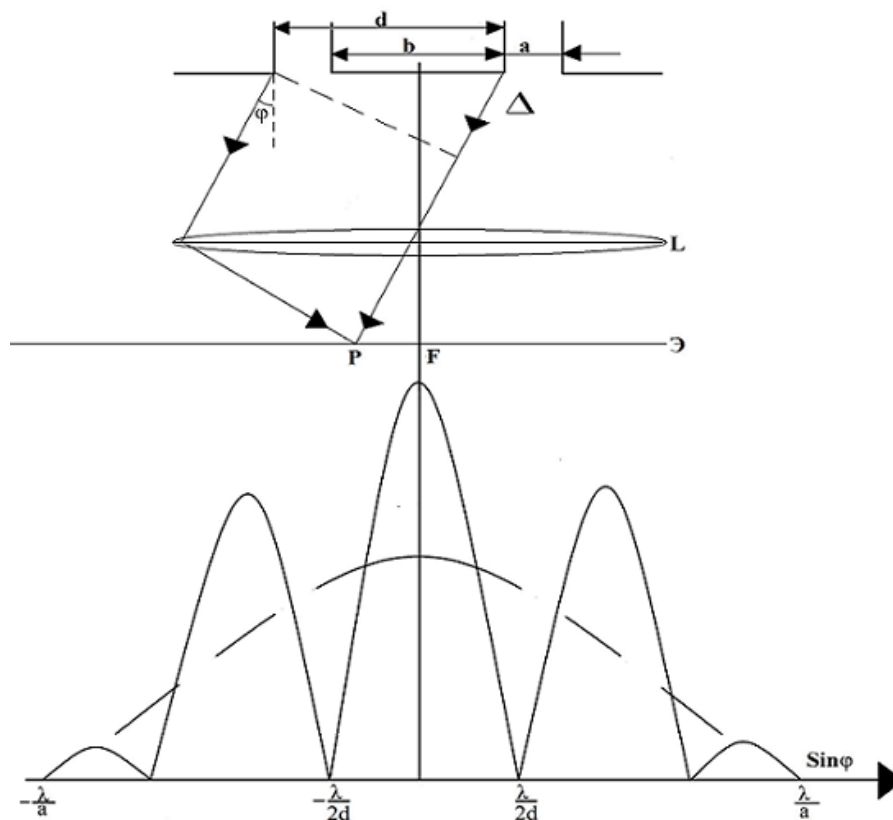


Рис. 2. Дифракции Фраунгофера на двух щелях. Кривая на рисунке показывает распределение интенсивностей света при дифракции на двух параллельных щелях в зависимости от синус угла дифракции. Пунктиром показано распределение интенсивности света от одной щели

Если ширина щели a значительно меньше расстояния от щели до экрана, дифракция Фраунгофера будет иметь место и при отсутствии линзы между щелью и экраном (падающая на щель волна должна быть плоской). В этом случае лучи, идущие в точку Р от краев щели, будут практически параллельны, так что все полученные ранее результаты остаются справедливыми.

Измерив на опыте по дифракционной картине от узкой щели ширину центрального максимума и зная длину волны источника света, можно определить ширину щели. По картине дифракции от двух параллельных узких щелей, зная длину волны источника и ширину каждой щели, можно определить расстояние между ними.

Дифракционная решетка

Если плоская монохроматическая волна встречает непрозрачную преграду, содержащую N параллельных щелей шириной a на одинаковом расстоянии $d = a+b$ друг от друга (плоскую дифракционную решетку), то на экране наблюдается более четкая по сравнению с одиночной щелью дифракционная картина – чередующиеся светлые и темные полосы. Расстояние b представляет собой ширину непрозрачной части дифракционной решетки. Величина $d = a+b$ называется периодом решетки.

Расчет дифракционной решетки дает формулу распределения интенсивности света на экране в зависимости от угла дифракции φ в виде

$$I_{\text{РЕШ}} = I_1 \frac{\sin^2(N\delta/2)}{(\delta/2)^2} \quad (8)$$

где I_1 – интенсивность света от одной щели, $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi$ – разность фаз колебаний от соседних щелей, $\Delta = d \sin \varphi$ – разность хода колебаний от соседних щелей.

Подставив в формулу (8) выражение (2) для I_1 , получим окончательно **основную формулу дифракционной решетки** в виде

$$I_{\text{РЕШ}} = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \varphi\right)^2} \frac{\sin^2(N\pi d \sin \varphi / \lambda)}{\sin^2(\pi d \sin \varphi / \lambda)} \quad (9)$$

где I_0 – интенсивность, создаваемая одной щелью против центра линзы.

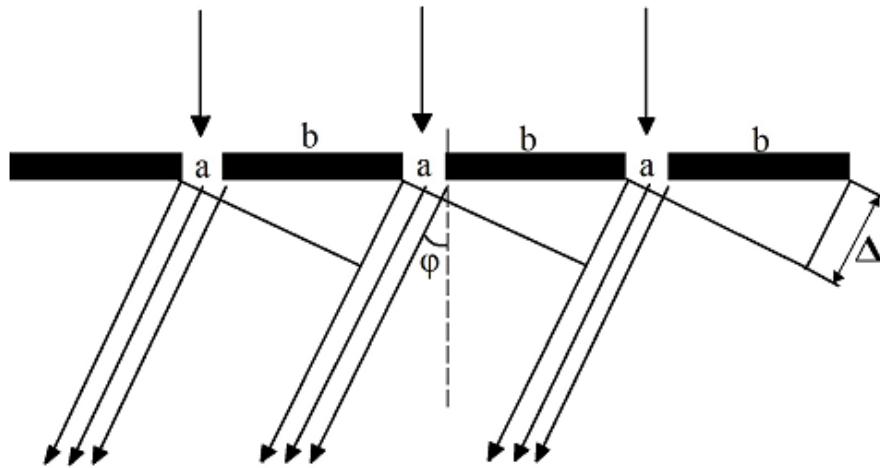


Рис. 3. Падение плоской монохроматической волны на дифракционную решетку. Показаны дифрагированные лучи под углом дифракции φ

a – ширина щели, b – ширина непрозрачной части между двумя соседними щелями, $d=a+b$ – период решетки.

Первый множитель в (9) обращается в нуль в точках, для которых

$$a \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

В этих точках интенсивность, создаваемая каждой из щелей в отдельности, равна нулю, то есть *min*.

Второй множитель в (9) принимает значение, определяемое по правилу Лопиталья и равно N^2 в точках, удовлетворяющих условию

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

Для направлений, определяемых этим условием, колебания от отдельных щелей взаимно усиливают друг друга, вследствие чего амплитуда колебаний в соответствующей точке экрана равна *max*.

Условие (11) определяет положения главных максимумов интенсивности, а число m называют порядком главного максимума или порядком спектра.

Кроме минимумов, определяемых условием (10), в промежутках между соседними главными максимумами имеется $(N-1)$ добавочных минимумов. Эти минимумы возникают в тех направлениях, для которых колебания от отдельных щелей взаимно погашают друг друга. Направления добавочных минимумов определяются условием

$$d \sin \varphi = \pm \frac{p}{N} \lambda, \quad (12)$$

$(p=1, 2, \dots, N-1, N+1, \dots, 2N-1, 2N+1, \dots)$

В формуле (12) p принимает все целочисленные значения, кроме $0, N, 2N, \dots$, то есть кроме тех, при которых условие (12) переходит в (11).

Между дополнительными минимумами располагаются слабые вторичные максимумы. Число таких максимумов, приходящееся на промежутку

ток между соседними главными максимумами, равно $N-2$. Интенсивность вторичных максимумов не превышает $1/22$ интенсивности ближайшего главного максимума.

Побочные максимумы обуславливают при низком разрешении слабый фон освещенности, на котором проявляются узкие и резкие главные максимумы.

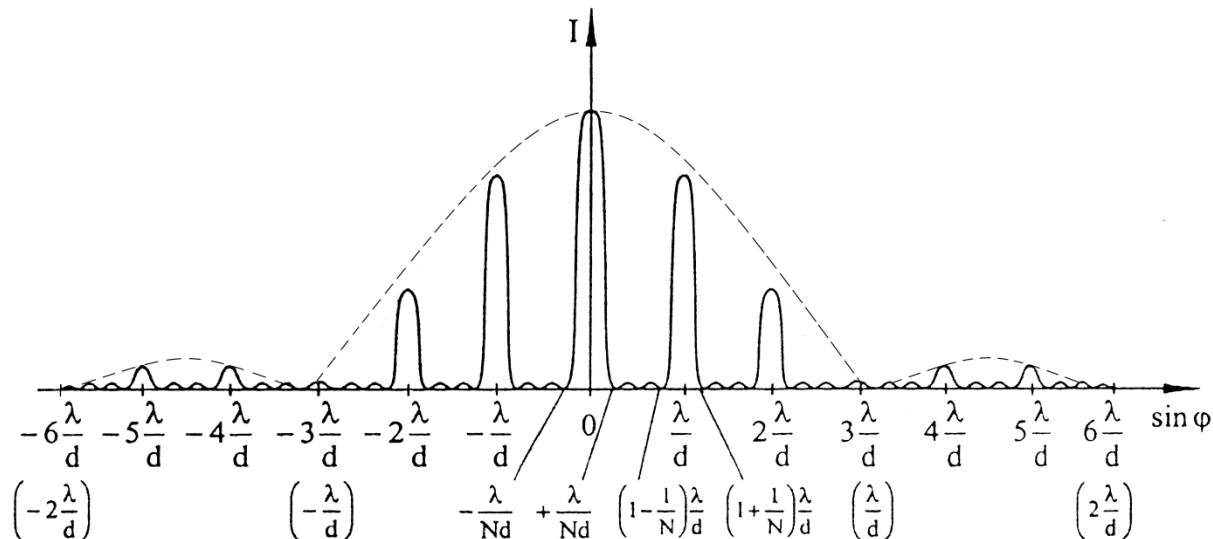


Рис. 4. Зависимость интенсивности света от синуса угла дифракции при дифракции на решетке с числом щелей $N = 6$. Штриховой линией показана картина дифракции на одной щели.

Примеры дифракционных картин

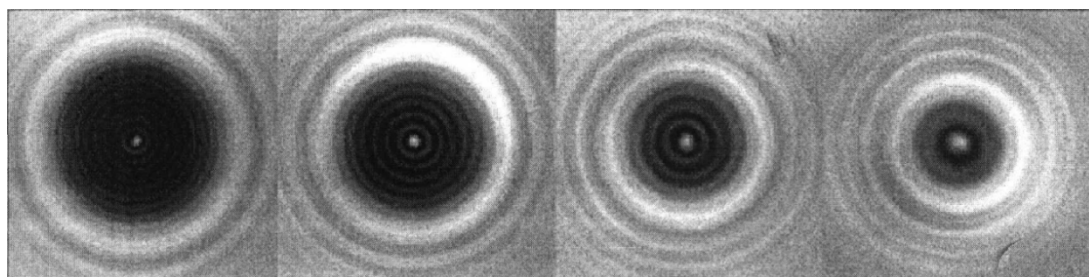


Рис. 5. Пятно Пуассона. Дифракция на дисках различного диаметра приводит к появлению в центре геометрической тени максимума – пятна Пуассона. Диаметр и яркость пятна увеличиваются при уменьшении диаметра диска

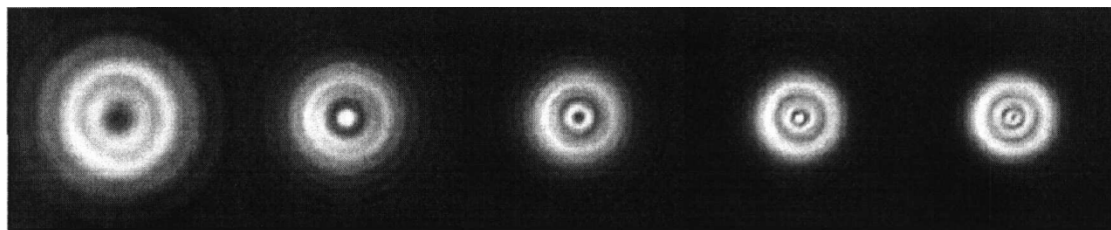


Рис. 6. Дифракция Френеля на круглом отверстии по мере приближения к краю с отверстием. Число открытых полуволновых зон увеличивается слева направо с 2 до 6. Размер картины уменьшается, приближаясь к диаметру отверстия

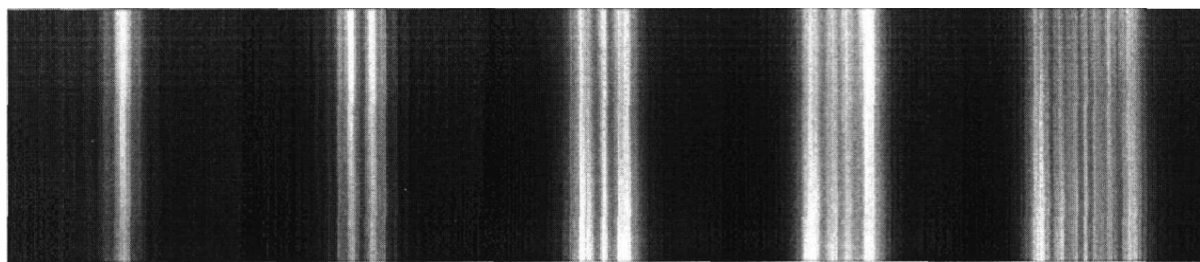


Рис. 7. Дифракция Френеля на щели. Одномерная дифракция Френеля на вертикальной щели по мере ее расширения. Начальная ширина соответствует примерно одной открытой полуволновой зоне, конечная – пяти открытым зонам. Вертикальный размер картины определяется диаметром пучка, падающего на щель

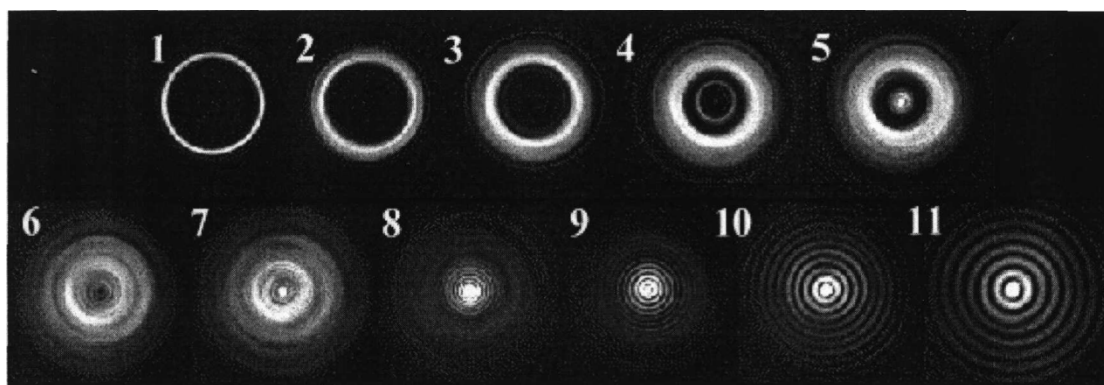


Рис. 8. Границы дифракционных приближений. На примере дифракции на кольце можно проследить плавный переход от геометрической оптики (1-3) через дифракцию Френеля (4-7) к дифракции Фраунгофера (9-11). Число открытых зон m уменьшается слева направо, при этом значение $m = 1$ (дистанция Рэля – условная граница между дифракциями Френеля и Фраунгофера) соответствует снимку 8

Выполнение работы

1. Лабораторная установка

В данной лабораторной работе в качестве источника света используется лазер. В качестве объекта наблюдения используется «Учебно-демонстрационный тест-объект МОЛ-1», который содержит множество различных структур (двойные и одинарные щели, круглые отверстия с центральным непрозрачным диском и без него, зонные пластинки). Картина дифракции наблюдается на экране.

Внешний вид установки для наблюдения дифракции изображен на рис. 10.

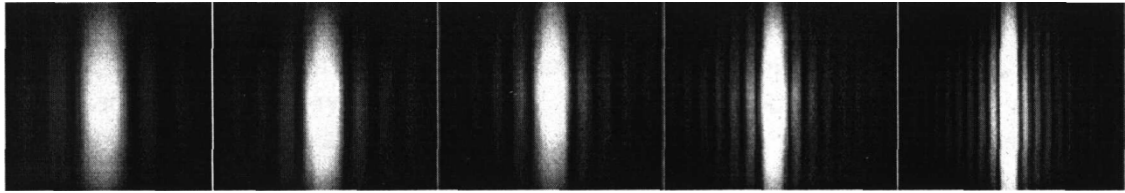


Рис. 9. Дифракция Фраунгофера на щели. Одномерная дифракция Фраунгофера на вертикальной щели по мере ее расширения слева направо. Нулевой максимум наиболее яркий и вдвое шире побочных максимумов. Размер области дифракционного расплывания обратно пропорционален ширине щели

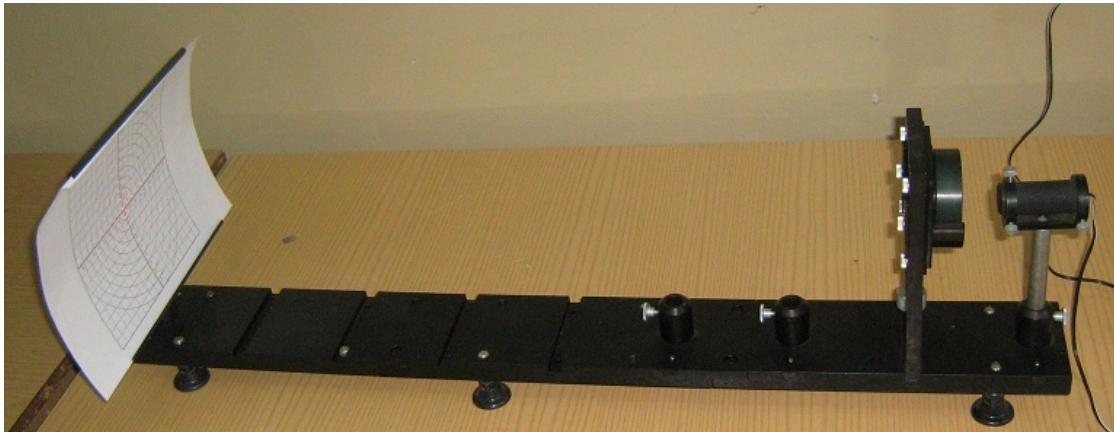
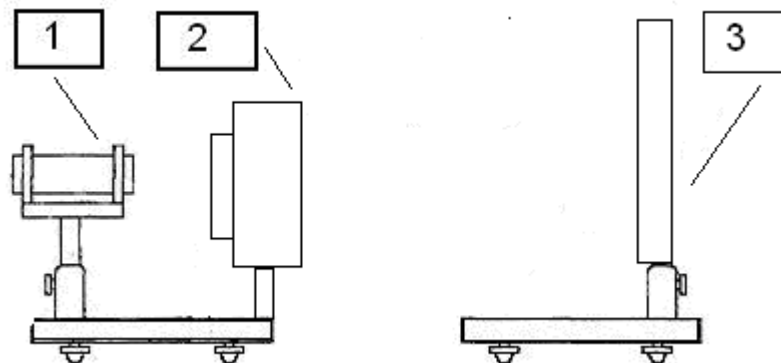


Рис. 10. Внешний вид установки для наблюдения дифракции

На рис. 11 представлена схема установки для наблюдения картины дифракции. Лазер 1 подсвечивает один из дифракционных объектов 2 тест-объекта МОЛ-1. Картина дифракции наблюдается на экране 3.



**Рис. 11. Схема установки для наблюдения картины дифракции.
1- лазер, 2- тест-объект МОЛ-1, 3-экран**

II. Измерения, вычисления и анализ

Задание 1. Изучение дифракции Фраунгофера на одной щели

1. Наоптическую скамью установки поместите тест-объект МОЛ-1.
2. Включите лазер и получите на экране дифракционную картину от одинарной щели. Выбор щели на тест-объекте МОЛ-1 проводить по указанию преподавателя.
3. Измерьте на экране расстояние между минимумами m -го порядка слева и справа y'_m и y''_m , начиная с $m = 1$. Данные занесите в таблицу 1. ($y_m = (y'_m + y''_m)/2$).

Таблица 1

m	1	2	3	4	5
$y'_m, \text{мм}$					
$y''_m, \text{мм}$					
$y_m, \text{мм}$					
$b, \text{мкм}$					

4. Измерьте расстояние L между щелью и экраном.
Обработка экспериментальных данных проводится по следующей схеме.

Представим формулу (3) с учетом выражения $\sin \varphi_m \approx y_m/L$ в виде уравнения прямой линии $y = A + Bx$:

$$y_m = (L\lambda/b) \cdot m; \text{ где } y = y_m; \quad x = m; \quad B = L\lambda/b. \quad (12)$$

Постройте график зависимости y_m от m . Дальнейшую обработку экспериментальных данных проведите по указанию преподавателя.

а) Графический метод

1. Из графика определите угловой коэффициент B .
2. Вычислите среднее значение ширины щели $\bar{b} = L\lambda/B$, $\lambda = 650 \text{ нм}$.
3. Оцените параметр дифракции $b^2/(L\lambda)$ и сравните его с 1.

б) Аналитический метод

1. Для каждого минимума m -го порядка вычислите ширину щели b по формуле

$$b = L\lambda \frac{m}{y_m} \quad (13)$$

и полученные данные занесите в таблицу 1.

2. По данным таблицы 1 вычислите среднее значение ширины щели \bar{b}
3. Используя формулу (13), рассчитайте систематическую и случайную погрешность в определении ширины щели b .
4. Оцените параметр дифракции $b^2/(L\lambda)$ и сравните его с 1.

Задание 2. Изучение дифракции Фраунгофера на дифракционной решетке.

1. На оптическую скамью установки поместите тест-объект МОЛ-1.
2. Включите лазер и получите на экране дифракционную картину от двумерной дифракционной решетки.
3. Для пяти различных расстояний L от решетки до экрана измерьте расстояние между дифракционными максимумами первого порядка. Данные занесите в таблицу 2. ($y_1 = (y_1' + y_1'')/2$).

Таблица 2

№ опыта	1	2	3	4	5
$L, \text{ см}$					
$y_1', \text{ мм}$					
$y_1'', \text{ мм}$					
$y_1, \text{ мм}$					
$d, \text{ мкм}$					

Обработка экспериментальных данных проводится по следующей схеме.

Представим формулу (11) с учетом $\sin \varphi_1 = y_1/L$ и $m=1$ в виде уравнения прямой линии $y = A + Bx$:

$$y_1 = (\lambda/d) \cdot L; \quad \text{где } y = y_1; \quad x = L; \quad B = \lambda/d. \quad (14)$$

Постройте график зависимости y от L . Дальнейшую обработку экспериментальных данных проведите по указанию преподавателя.

а) Графический метод

1. Из графика определите угловой коэффициент B .

2. Вычислите среднее значение постоянной дифракционной решетки $\bar{d} = \lambda/B$, $\lambda = 650 \text{ нм}$.

б) Аналитический метод

1. Для каждого расстояния L от решетки до экрана вычислите постоянную дифракционной решетки по формуле

$$d = \frac{L\lambda}{y_1} \quad (15)$$

и полученные данные занесите в таблицу 2.

2. По данным таблицы 2 вычислите среднее значение постоянной дифракционной решетки \bar{d} .

3. Используя формулу (15), рассчитайте систематическую и случайную погрешность в определении постоянной дифракционной решетки \bar{d} .

Контрольные вопросы

1. В чем заключается основная задача дифракции?
2. Принцип Гюйгенса.

3. Принцип Гюйгенса-Френеля.
4. Метод зон Френеля.
5. Метод графического сложения амплитуд.
6. Амплитудная и фазовые зонные пластинки.
7. Условия дифракционного минимума и максимума при рассмотрении дифракции Фраунгофера на щели.
8. Условия дифракционного минимума и максимума при рассмотрении дифракции Фраунгофера на двух щелях.
9. Условия дифракционного максимума и минимума при рассмотрении дифракции на дифракционной решетке.
10. Анализ выражения для интенсивности дифрагированного света от дифракционной решетки.
11. Определение длины волны при помощи дифракционных картин.
12. Определение периода решетки кристалла при помощи дифракции рентгеновских лучей.
13. Определение угловой дисперсии и разрешающей силы дифракционной решетки.
14. Дифракция Френеля от простейших преград:
 - 1) от круглого отверстия;
 - 2) от круглого диска;
 - 3) от прямолинейного края полуплоскости;
 - 4) от прямоугольной щели.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988, 496 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980, 751 с.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976, 926 с.
4. Хоник В.А. Оценки погрешностей измерений. Методические указания. – Воронеж: ВГПУ, 1994. – 13 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9. ИЗМЕРЕНИЕ ОСВЕЩЕННОСТИ РАБОЧИХ МЕСТ

Цель работы: научиться определять состояние освещенности рабочих мест. Освоить методику работы с приборами.

В работе используется: люксметр Ю-116.

Теоретическая часть

Освещение рабочего места – важнейший фактор создания нормальных условий труда. Практически возникает необходимость освещения как естественным, так и искусственным светом.

Естественное освещение по своему спектральному составу является наиболее приемлемым. Искусственное же, наоборот, отличается относительной важностью восприятия человеком. Это связано с тем, что суточные переходные режимы естественной освещенности имеют частоту при достаточной высокой (днем) или очень низкой (ночью) интенсивности светового потока, а искусственные – довольно большую частоту при недостаточной в целом освещенности. Поэтому при искусственном освещении начинают возникать неустойчивые зрительные процессы, которые из-за большой частоты сменяемости световых условий накладываются друг на друга, не давая глазам времени адаптироваться к новым условиям, что вызывает физическую усталость организма. Несмотря на это, искусственное освещение необходимо как важнейший фактор для приближения ночных условий труда к дневным.

Условия работы зрения можно охарактеризовать как количественными показателями, так и качественными. К качественным показателям относятся фон, контраст объекта с фоном, видимость, цилиндрическая освещенность, показатель ослепляемости, показатель дискомфорта и коэффициенты пульсации освещенности. К количественным показателям: световой поток, сила света, освещенность, яркость, светимость.

Прибор для измерения освещенности И правила работы с ним

Для измерения освещенности используется люксметр. Люксметр Ю-116 состоит из фотоэлемента с набором светопоглощительных насадок и гальванометра. Действие прибора основано на фотоэлектрическом эффекте. Световой поток, падающий на селеновый фотоэлемент, вызывает электрический ток, величина которого фиксируется стрелкой гальванометра пропорционально величине светового потока. Прибор имеет две шкалы измерения: от 0 до 30 лк и от 0 до 100 лк и соответствующие им кнопки управления. При нажатии левой кнопки отсчет показаний ведется по шкале 0-30 лк, при нажатии правой кнопки – по шкале 0-100 лк. Наибольшую погрешность измерений прибор дает при малых отклонениях стрелки гальванометра. Поэтому на каждой шкале точкой обозначено допустимое начало измерения. На шкале 0-30 лк эта точка находится над отметкой 5 лк, а на шкале 0-100 лк над отметкой 20 лк.

С целью уменьшения косинусовой погрешности применяется насадка на фотоэлемент, состоящая из полусферы, выполненной из белой светорассеивающей пластмассы, и непрозрачного пластмассового кольца, имеющего сложный профиль. Насадка обозначена буквой *K*, нанесенной на ее внутреннюю сторону. Эта насадка применяется не самостоятельно, совместно с одной из трех насадок (обозначенных *M*, *P* и *T*). При использовании насадок *K* и *M* коэффициент ослабления светового потока составляет 10, при использовании насадок *K* и *P* – 100, а насадок *K* и *T* – 1000. Показание прибора при использовании насадок умножают на соответствующий коэффициент ослабления.

Выполнение работы

Задание 1. Исследование естественного освещения

Выключить в помещении искусственное освещение. Измерить естественную освещенность и определить коэффициент естественной освещенности в пяти точках помещения в одном направлении. Первое измерение провести на расстоянии 1-2 м друг от друга по направлению к световым поемам. Освещенность определяется на высоте рабочих столов (0,8 м от пола).

Для определения коэффициента естественной освещенности (КЕО) в любой точке помещения необходимо измерить освещенности на улице (*E*) и в исследуемой точке внутри помещения (*E*₁). Значение коэффициента естественной освещенности для исследуемой точки определяется по формуле:

$$KEO = \frac{E_1}{E} \cdot 100\%$$

При измерении фотоэлемент люксметра необходимо установить горизонтально, чувствительной стороной вверх. Корпус гальванометра тоже располагают горизонтально. Во избежание излишнего засвечивания селенового фотоэлемента и закаливания стрелки гальванометра измерение по шкале 0-100 лк следует начинать с установки на фотоэлемент насадок *K* и *T*, обладающих наибольшим коэффициентом ослабления света. Если в этом случае показания стрелки, менее отметки 5 лк, то необходимо установить другие насадки – *K* и *P* или *K* и *M* и повторить намерения, каждый раз нажимая сначала правую, а затем левую кнопку люксметра. При малых освещенностях – (менее 100 лк) измерения ведут без насадок открытым фотоэлементом. Показания люксметра при использовании насадок следует умножать на коэффициент ослабления. Результаты замеров оформить в виде таблицы. По полученным значениям построить график зависимости КЕО от расстояния от окна.

В помещениях с боковым односторонним освещением нормируется минимальное значение КЕО в точке, расположенной на расстоянии 1 м от наиболее удаленной от световых проемов стены (на пересечении вертикальной плоскости характерного размера помещения и условной рабочей поверхности или пола).

При двустороннем боковом естественном освещении нормируется минимальное значение КЕО в середине помещения (на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности или пола).

При верхнем или комбинированном естественном освещении нормируется среднее значение КЕО (в точках, расположенных на пересечении вертикальной плоскости характерного размера помещения и условной рабочей поверхности или пола). Первую и последнюю точки выбирают на расстоянии 1 м от поверхности стен или перегородок.

Расстояние от окна	E_1 ; лк	E ; лк	КЕО %
1 м			
2 м			
3 м			
4 м			

Задание 2. Исследование искусственного освещения.

Исследовать зависимость искусственного комбинированного освещения от высоты расположения светильника местного освещения.

Зашторить в помещении окна для исключения влияния естественного света. Включить общее освещение в помещении. Измерить освещенность на рабочем месте на плоскости стола под светильником общего освещения. Включить дополнительно светильник местного освещения. Включить дополнительно светильник местного освещения, установить его на высоту 0,26 м от плоскости стола и вновь измерить под ним освещенность при комбинированном освещении. Затем, последовательно устанавливая светильник на высоту 0,5; 0,75; 1,0 м произвести остальные замеры. Результаты оформить в виде таблицы и построить график, сделать вывод о соблюдении или несоблюдении санитарных норм. Определить оптимальную высоту расположения светильника местного освещения.

Общее освещение должно составлять не менее 10 % нормируемой величины комбинированного при тех источниках света, которые применяются для местного освещения. При этом общая освещенность должна быть в пределах 150-500 лк при использовании газоразрядных ламп и 50-100 лк при использовании ламп накаливания.

По результатам замеров освещенности определить допустимый разряд работы для положений светильника на различной высоте.

Расстояние до поверхности стола	$E_{\text{комб}}$; ЛК	$E_{\text{общее}}$; ЛК	$\frac{E_0}{E_k} \cdot 100\%$
0,25 м			
0,5 м			
0,75 м			
1 м			

Задание 3. Проверка законов освещенности

В затемненном помещении расположите на столе свечу, экран с квадратным отверстием и белый экран. Экраны установите перпендикулярно нити, натянутой вдоль крышки стола, пламя свечи или лампы – на уровне середины отверстия.

Измерьте площадь отверстия в экране.

Расположите экран с отверстием на расстоянии 25 см от свечи, а второй экран на таком же расстоянии от первого, т.е. на расстоянии 50 см от свечи. Измерьте величину площади на экране, освещенной через отверстие. Внесите результат в таблицу измерений.

Повторите измерение, отодвигая сплошной экран еще на 25 см дважды.

Выразите зависимость между расстоянием и освещенностью математической формулой. Сформулируйте закон, устанавливающий зависимость между освещенностью поверхности и расстоянием ее от источника света, посылающего пучок расходящихся лучей.

Поставьте сплошной экран под углом 30° к направлению светового пучка (нити, натянутой на столе). Как велика теперь площадь, освещаемая на экране, во сколько раз она увеличилась? Повторите измерение. Беря углы 45° и 60° .

Сделайте вывод о зависимости освещенности от угла падения светового пучка.

Таблицу измерений разработать самостоятельно.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определения основных энергетических характеристик излучения потока энергии излучения: энергетической светимости, яркости, силы света, освещенности. В каких единицах их выражают?

2. Что такое точечный источник? Как зависит от расстояния создаваемая им освещенность?

3. При каком условии протяженный источник называется ламбертовым? Приведите примеры ламбертовых источников.

4. Почему наряду с энергетическими характеристиками излучения необходимо вводить светотехнические?

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988. – 496 с.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – 926 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980. – 751 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10. СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Цель работы: Иллюстрация соотношения неопределенности Гейзенберга.

В работе используется: излучатель лазерный полупроводникового STL650 (источник направленного монохроматического излучения), тест-объект МОЛ-01 стеклянная подложка имеющая ряд S одинарных щелей различной толщины в порядке возрастания, держатель, однокоординатный экран, оптический рельс.

Теоретическая часть

Движение частиц в области микромира описывается квантовой или волновой механикой. Одним из фундаментальных положений квантовой механики является принцип неопределенностей, сформулированный В. Гейзенбергом в 1927 г. (Нобелевская премия 1932 год). О том, каково его значение, можно судить, исходя из того факта, что всего одного из соотношений неопределенностей достаточно, чтобы объяснить целый ряд закономерностей в атомной и ядерной физике. В частности, он позволяет объяснить тот факт, что электрон не падает на «дно» атома, а также оценить размеры простейшего атома и минимальную возможную энергию электрона в таком атоме. Соотношения неопределенностей указывают, в каком случае можно пользоваться понятиями классической механики применительно к микрочастицам, в частности, с какой степенью точности можно говорить о траекториях микрочастиц.

В классической механике для описания движения частиц применимо такое понятие, как траектория. При этом частице в каждый момент време-

ни приписываются определенная координата x и определенное значение проекции импульса P_x . Координата x задает положение частицы, а импульс P_x указывает, как изменяется это положение в течение бесконечно малого интервала времени:

$$x + dx = x + \frac{dx}{dt} dt = x + v_x dt = x + \frac{P_x}{m} dt, \quad (1)$$

где m – масса частицы; v_x – проекция скорости частицы на ось x .

На смену классической механики для описания движения микрочастиц пришла квантовая механика. Это обусловлено двойственной природой микрочастиц. Всякий микрообъект (молекула, атом, электрон, фотон и т.д.) обладает свойствами и волны, и частицы. В то же время микрочастицы не ведут себя ни как волны, ни как частицы. Отличие микрочастицы от волны заключается в том, что она всегда обнаруживается как неделимое целое. Никому еще не удавалось наблюдать, например, половинку электрона. Волну же можно разделить на части, например, направить ее на полупрозрачное зеркало и воспринимать затем каждую часть в отдельности. Своеобразие свойств микрочастиц проявляется в том, что не для всех переменных получаются при измерениях определенные значения. Неопределенности значений x и P удовлетворяют соотношению

$$\Delta x \cdot \Delta P_x \geq \hbar \quad (2)$$

где Δx , ΔP_x – неопределенности значений x и P_x , соответственно; $\hbar = h / 2\pi$.

Из (2) следует, что чем меньше неопределенность одной из переменных (x или P_x), тем больше неопределенность другой. Возможно такое состояние микрочастицы, в котором одна из перечисленных переменных имеет точное значение (ее неопределенность равна нулю), другая переменная при этом оказывается совершенно неопределенной (ее неопределенность равна бесконечности т.е. при $\Delta x \rightarrow 0$ $\Delta P \rightarrow \infty$ или же при $\Delta P \rightarrow 0$ $\Delta x \rightarrow \infty$).

Соотношение, аналогичное (2), имеет место для y и P_y , для z и P_z , а также для ряда других пар величин, которые в классической механике называются канонически сопряженными. Обозначив канонически сопряженные величины буквами A и B , можно написать

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq \frac{\hbar}{2} \quad (3)$$

Соотношение (3) называется соотношением неопределенностей для величин A и B .

Принцип неопределенностей Гейзенберга: произведение неопределенностей значений двух канонически сопряженных переменных не может быть по порядку величины меньше постоянной Планка \hbar .

Соотношение неопределенностей – фундаментальный закон природы, который не выводится, не доказывается теоретически, а справедливость его доказывается экспериментально. Нужно заметить следующее: неправильно было бы величины ΔA и ΔB понимать только как неточности изме-

рения величин A и B , поскольку сам термин «неточность» как бы предполагает, что существуют и более точные значения A и B (например, координаты и импульса), но только они почему-то не могут быть измерены. На самом деле невозможность такого измерения есть следствие того, что микрочастица по своей природе не имеет одновременно точного значения координаты и импульса. Иначе говоря, эта невозможность есть следствие корпускулярно-волновой природы микрочастицы.

Справедливость соотношения неопределенностей можно проверить в опыте по дифракции фотонов на щели. Рассмотрим поток фотонов, который падает слева на непрозрачный экран M . В экране имеется щель шириной b (рис. 1). Энергия каждого фотона E . Как ранее было сказано, микрочастицы обладают волновыми свойствами. Поэтому поток фотонов с заданной энергией можно рассматривать как пучок монохроматического света с длиной волны λ или частотой ν . Причем между введенными характеристиками фотона как частицы (E , P) и как волны (λ , ν) существует вполне определенная связь:

$$E = P \cdot c = 2\pi\hbar\nu = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda} \quad (4)$$

где c – скорость света в вакууме. Если на расстоянии $L \gg b$ от экрана M поместить второй непрозрачный экран N , то, как известно из курса оптики, на этом экране будет наблюдаться дифракционная картина, распределение освещенности для которой показано на рис. 1. Этому явлению можно дать двойное объяснение. С точки зрения волновой оптики явление дифракции объясняется перераспределением светового потока в результате суперпозиции волн от вторичных источников.

Рассмотрим теперь эту дифракционную картину с точки зрения представления о свете, как о совокупности световых квантов-фотонов. Если фотоны проходят через щель в экране M поодиночке, то каждый фотон попадает в определенную точку на экране N . Предсказать, в какую именно точку попадает один отдельно взятый фотон, принципиально невозможно. Однако в совокупности большое число попавших на экран фотонов дает дифракционную картину. С точки зрения квантовой теории взаимодействие фотонов с веществом при прохождении света через преграду приводит к перераспределению фотонов в пространстве и возникновению дифракционной картины на экране, расположенном на пути света, прошедшего через преграду (щель).

Рассмотрим, как происходит движение фотона в рассматриваемой системе. Для прохождения фотона через щель нам точно известен импульс фотона:

$$P = \frac{2\pi\hbar c}{\lambda} \quad (5)$$

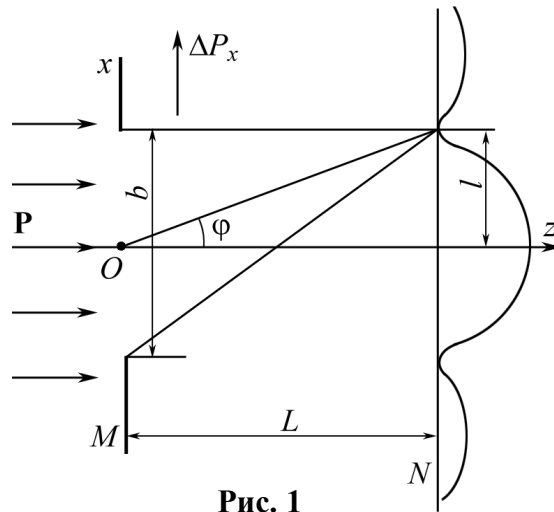


Рис. 1

Направленный вдоль оси z , перпендикулярной экрану M и N . Составляющая импульса фотона по оси Ox равна нулю ($\Delta P_x = 0$), т.е. известна точно, но зато совершенно не определена координата фотона x . При прохождении фотона через щель в экране M ширина щели b будет служить мерой неопределенности Δx значения координаты фотона x . Далее, по корпускулярным представлениям возникновение на экране дифракционной картины следует истолковать в том смысле, что каждый отдельно взятый фотон, пройдя через щель, отклоняется либо вверх, либо вниз. Но для этого фотон должен приобрести составляющую импульса ΔP_x , перпендикулярную направлению первоначального движения. Величина полного импульса фотона P как следует из (5), не меняется, т.к. не меняется длина волны.

Возникает вопрос: в результате чего фотоны приобретают составляющую импульса, перпендикулярную направлению первоначального движения? Ответ может быть только один: в результате «взаимодействия» со щелью в экране M , поскольку никаким другим воздействиям фотоны не подвергались. А в чем же заключается «взаимодействие» фотона с щелью? Ясно, что это не есть взаимодействие в классическом смысле, так как размеры щели много больше размеров фотона. В такой ситуации классическая частица просто «не заметила» бы щели на своем пути и продолжала бы двигаться в прежнем направлении. Квантовая же частица, в силу уже упомянутых выше необычных своих свойств, «чувствует» любые изменения окружающего ее пространства. Поэтому стоило измениться пространству, окружающему рассматриваемые фотоны (появилась пусть и широкая, но щель – пространство вдоль оси Ox «сжалось»), как они тут же «отреагировали». Причем чем уже щель, через которую должны проходить фотоны, тем более вероятным становится их отклонение на большие углы от направления первоначального движения.

Оценим произведение $\Delta x \cdot \Delta P_x$.

Как было отмечено выше, $\Delta x = b$. Определить значение составляющей ΔP_x каждого фотона невозможно, так как принципиально невозможно предсказать, куда пойдет каждый отдельный фотон после прохождения щели, но мы знаем, что большая часть фотонов попадает в область главного максимума. (Поскольку освещенность в максимумах дифракционной картины спадает в пропорции 1000 : 47 : 17, вероятностью попадания фотонов в побочные максимумы можно пренебречь). Поэтому, как видно из рис. 1, мера неопределенности компонента импульса P_x после прохождения фотона через щель равна

$$\Delta P_x = P \cdot \sin \varphi \quad (6)$$

где φ – угол дифракции, характеризующий направление на первый минимум дифракционной картины.

Теперь имеем $\Delta x \cdot \Delta P_x = bP \cdot \sin \varphi$ или с учетом (4)

$$\Delta x \cdot \Delta P_x = b \frac{E}{c} \sin \varphi \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что возможно провести экспериментально оценку соотношения неопределенностей для фотонов с известной энергией.

Выполнение работы

Для экспериментальной иллюстрации соотношения неопределенностей собирается установка по схеме, изображенной на рис. 2.

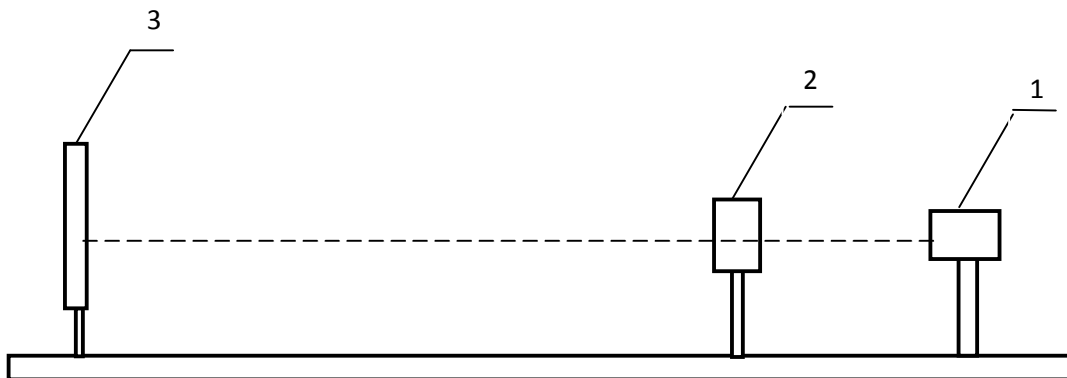


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

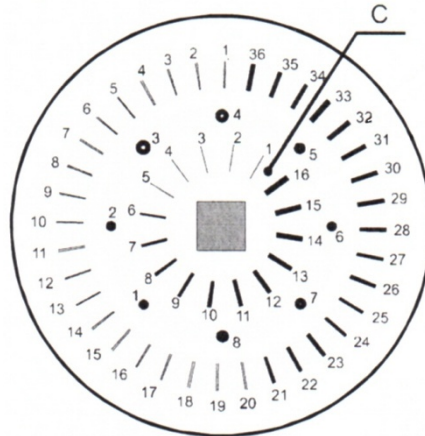
Установка состоит из излучателя лазерного полупроводникового STL650 (источник направленного монохроматического излучения). Длина волны излучений $\lambda = 650$ нм (1), тест-объект МОЛ-01 – стеклянная подложка, имеющая ряд S одинарных щелей различной толщины в порядке возрастания (2), укрепленной в держателе, однокоординатного экрана (3). Все детали установки располагаются на оптическом рельсе.

Задание. Провести экспериментальную проверку соотношения неопределенностей $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ для случая фотонов с известной энергией.

1. Зажгите лазер, для чего включите вилку светового шнура источника питания в розетку, переведите тумблер на шнуре питания в положение «Вкл».

2. Установите расстояние L от щели до экрана, равное 1 м.

3. Получите, с помощью тест-объекта МОЛ-01, дифракционную картину на экране, вращая стеклянную подложку (ряд С) меняя одинарные щели толщины d (в мкм) в порядке возрастания номера.



Учебно-демонстрационный тест-объект МОЛ-01

ВНИМАНИЕ! Запрещается смотреть через щель в выходное окно лазера и таким образом фиксировать момент закрытия щели. Это опасно для зрения.

4. Измерьте, ширину $2D$ центрального максимума дифракционной картины, медленно вращая стеклянный диск, открывая поочередно щель. Ширину максимума определяют по положению первых темных полос, примыкающих к максимуму.

5. Выполните пункты 3 ÷ 4 для всех значений Δx .

6. Вычислите энергию фотона E , используя формулу (4) и учитывая, что $\lambda = 650$ нм.

7. Вычислите $\sin \varphi$, учитывая, что при $l \ll L$ можно считать, что $\sin \varphi \approx \tan \varphi \approx \frac{l}{L}$, после этого определите произведение $\Delta x \cdot \Delta p_x = b \frac{E}{c} \cdot \frac{l}{L}$ и запишите в таблицу.

8. Сравните полученные значения произведений $\Delta x \cdot \Delta p_x$ с величиной постоянной Планка. Убедитесь в справедливости соотношения неопределенностей: $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ для всех без исключения измеренных значений Δx и Δp_x .

9. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№ щели	Δx	$2D$	D	Δp_x	$\Delta x \Delta p_x$
	мкм	мм	мм	кг·м/с	Дж·с
1	10				
2	12				
3	15				
4	20				
...	...				
15	100				

10. По формуле (6) рассчитайте неопределенность импульса фотона Δp_x , взяв значение длины волны лазерного излучения 650 нм и постоянную Планка $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

11. Постройте график зависимости Δp_x от Δx .

12. Произведение неопределенностей Δx и Δp_x запишите в табл. 1.

Контрольные вопросы

1. Как соотносится дифракционная картина на щели с корпускулярной природой света?

2. Известно, что дифракция света является причиной предельной разрешающей способности оптических приборов. Как это связано с принципом неопределенности?

3. Почему принцип неопределенностей считается одним из основополагающих принципов квантовой механики?

4. Как соотношение неопределенностей связано с двойственной природой света?

5. Как соотносятся понятия длины волны света и импульса фотона?

6. Предположим, что в вашем распоряжении имеются абсолютно точные измерительные приборы и вы являетесь отличным экспериментатором. С какой точностью вы можете провести измерения?

7. Почему в квантовой механике неприменимо понятие траектории микрочастицы?

8. Дайте понятие степени монохроматичности света, учитывая принцип неопределенностей.

9. Дайте определение ширины спектральной линии. Можно ли получить идеальный монохроматический свет?

10. Какие экспериментальные факты подтверждают справедливость принципа неопределенностей?

11. В чем заключается корпускулярно-волновая двойственность природы света?

12. Запишите соотношение неопределенностей для энергии и времени.
13. Получите выражение для вычисления минимальной неопределенности длины волны излучения при переходе атома в основное состояние.
14. Сформулируйте принцип неопределенностей для импульса частицы и ее положения в пространстве.
15. Что утверждает принцип неопределенностей, записанный для энергии частицы в стационарном состоянии и времени пребывания частицы в этом состоянии?
16. Запишите принцип неопределенностей, справедливый для любого пакета волн.
17. Среднее время жизни π^0 -мезона равно $1,9 \cdot 10^{-16}$ с. Какова должна быть энергетическая разрешающая способность прибора, с помощью которого можно зарегистрировать π^0 -мезон?
18. Объясните, почему исследование центрального максимума дифракционной картины на щели позволяет провести проверку соотношения неопределенностей. Возможно ли провести проверку, используя явление дифракции на круглом отверстии или на тонкой нити?
19. Запишите соотношение неопределенностей для радиоволн.
20. Атом испустил фотон с длиной волны 0,55 мкм. Продолжительность излучения – 10 нс. Определить наименьшую погрешность, с которой может быть измерена длина волны излучения.
21. Среднее время жизни атома в возбужденном состоянии равно 12 нс. Вычислите минимальную неопределенность длины волны $\lambda = 12$ мкм излучения при переходе атома в основное состояние.
22. Кинетическая энергия электрона в атоме водорода примерно равна 10 эВ. Используя соотношение неопределенностей, оцените минимальные линейные размеры атома.
23. Среднее время жизни возбужденных состояний атома составляет 10 нс. Вычислите естественную ширину спектральной линии ($\lambda = 0,7$ мкс), соответствующую переходу между возбужденными уровнями атома.
24. Как, исходя из соотношения неопределенностей, объяснить наличие естественной ширины спектральных линий?
25. В каком из приведенных случаев $\frac{\Delta v_x}{v_x} \gg 1$ или $\frac{\Delta v_x}{v_x} \approx 1$ можно говорить о движении частицы по определенной траектории?

Список литературы

1. Савельев, И.В. Курс общей физики. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц : в 5-ти кн.: учеб. пособие для студ. высш. техн. учеб. заведений. – М.: Астрель; АСТ, 2001. – 368с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА ПО СПЕКТРУ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА

Цель работы: ознакомление с закономерностями в спектре водорода, определение длин волн спектральных линий серии Бальмера, расчет постоянной Ридберга.

В работе используются: монохроматор, генератор «Спектр», выпрямитель, спектральные трубки, соединительные провода.

Теоретическая часть

Спектры излучения изолированных атомов, например, атомов разреженного одноатомного газа или паров металла, состоят из отдельных спектральных линий и носят название линейчатых. Относительная простота линейчатых спектров объясняется тем, что электроны, входящие в состав таких атомов, находятся под действием только внутриатомных сил и практически не испытывают возмущающего действия со стороны окружающих удаленных атомов.

Изучение линейчатых спектров показывает, что в расположении линий, образующих спектр, наблюдаются определённые закономерности: линии располагаются не беспорядочно, а группируются сериями. Впервые это было обнаружено Бальмером (1885 г.) для атома водорода. Серийные закономерности в атомных спектрах присущи не только атому водорода, но и другим атомам и свидетельствуют о проявлении квантовых свойств излучающих атомных систем. Для атома водорода эти закономерности могут быть выражены с помощью соотношения (обобщенная формула Бальмера)

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{i^2} \right), \quad (1)$$

где λ – длина волны; R – постоянная Ридберга, значение которой, найденное из эксперимента, равно $R = 1.09 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, n и i – целые числа, причем $i > n$. Формула (1) является обобщением зависимостей, полученных на опыте для отдельных серий спектральных линий. В обобщенной формуле Бальмера целое число n дает номер серии, а целое число i – номер линии в серии (см. рис. 1).

Спектральные закономерности атома водорода объясняются согласно теорией Бора, которая строится на двух постулатах:

а) Из бесконечного множества электронных орбит, возможных с точки зрения классической механики, осуществляются в действительности только некоторые дискретные орбиты, удовлетворяющие определенным квантовым условиям.

б) Электрон, находящийся на одной из этих орбит, несмотря на то, что он движется с ускорением, не излучает электромагнитных волн.

Излучение испускается или поглощается в виде светового кванта энергии $h\nu$ при переходе электрона из одного стационарного (устойчивого) состояния в другое. Величина светового кванта равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается переход электрона $h\nu = E_m - E_n$.

Для построения боровской теории водородного атома необходимо также привлечь постулат Планка о дискретности состояний гармонического осциллятора, энергия которого равна $E = nh\nu$, где n – целое число. Из этого постулата вытекает правило квантования круговых орбит: из всех орбит электрона, возможных с точки зрения классической механики, осуществляются только те, для которых момент импульса равен целому кратному постоянной Планка: $M = n\hbar$.

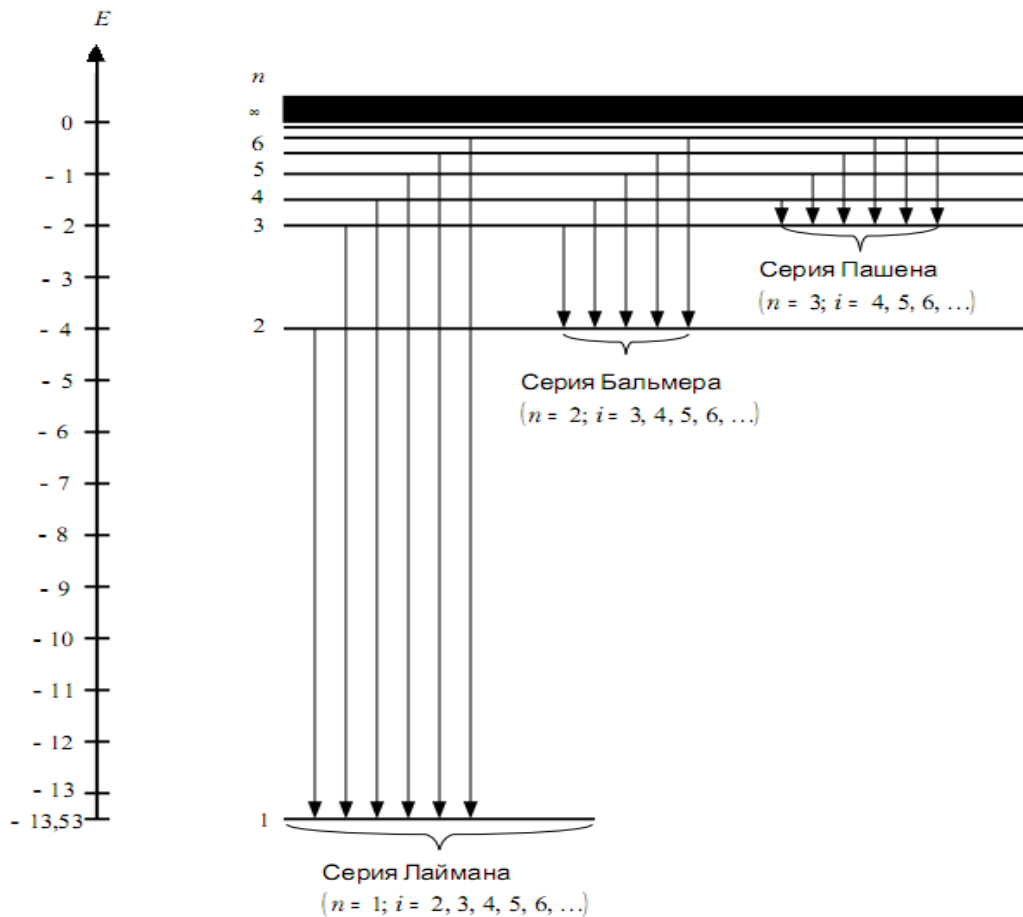


Рис. 1. Схема образования спектральных серий атомарного водорода

Как отмечалось ранее, постулаты Бора несовместимы с классической физикой. И тот факт, что вытекающие из них результаты хорошо согласуются с опытом, например, для атома водорода, свидетельствует о том, что законы классической физики ограничены в своем применении к микрообъ-

ектам и требуют пересмотра. Правильное описание свойства микрочастиц дает квантовая механика.

В соответствии с формализмом квантовой механики поведение любой микрочастицы описывается волновой функцией $\Psi(x, y, z, t)$. Форма этого описания является статистической. Это означает, что знание волновой функции не позволяет судить о состоянии микрочастицы и её дальнейшем поведении достоверным образом. Характер вытекающих из знания волновой функции сведений вероятностный. А именно, квадрат модуля волновой функции $|\Psi|^2$ даёт значение плотности вероятности нахождения микрочастицы в единичном объеме около точки с координатами (x, y, z) в момент времени t . В этом заключается её физический смысл. Зная плотность вероятности, можно найти вероятность P нахождения частицы в конечном объёме ΔV : $P = \int_{\Delta V} |\Psi|^2 dV$. Для волновой функции выполняется условие нор-

мировки: $\int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty |\Psi|^2 dx dy dz = 1$. Если состояние частицы стационарно, то есть не зависит от времени (именно такие состояния мы и будем рассматривать), то в волновой функции можно выделить два независимых множителя: $\Psi(x, y, z, t) = \Phi(x, y, z)e^{-i\omega t}$.

Для нахождения волновой функции служит так называемое уравнение Шрёдингера, которое для случая стационарных состояний имеет следующий вид:

$$\Delta\Psi = \frac{2m}{\hbar}(E - U)\Psi = 0, \quad (2)$$

где E – полная, U – потенциальная энергия частицы, Δ – оператор Лапласа. Волновая функция должна быть однозначной, непрерывной и конечной, а также иметь непрерывную и конечную производную.

Решая уравнение Шрёдингера для электрона в атоме водорода, можно получить выражение для уровней энергии электрона

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (3)$$

где $n = 1, 2, 3$, и т.д.

Постоянную Ридберга можно найти с помощью формулы (1), определив экспериментальным путем длины волн в какой-либо серии. Наиболее удобно это сделать для видимой области спектра, например для серии Бальмера $\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{i^2}\right)$, где $i = 3, 4, 5$, и т.д. В настоящей работе определяются длины волн первых четырех наиболее ярких спектральных линий этой серии.

Выполнение работы

1. В генератор спектр, показанный на рис. 2, поставить неоновую спектральную трубку.



Рис. 2. Генератор «Спектр»

2. Снять показания отсчетного устройства монохроматора, показанного на рис.3, для всех линий спектра неона.



Рис. 3. Вид установки для измерения постоянной Ридберга

2. Прodelать то же с гелиевой и водородной трубками.
3. Для каждой длины волны по формуле (1) вычислить постоянную Ридберга и найти ее значение.
4. Вычислить среднее значение массы электрона по формуле:

$$R = \frac{me^4}{8h^3 \epsilon_0^2 c}$$

Контрольные вопросы

1. При каких условиях возникают линейчатые спектры?
2. Какова модель атома по теории Резерфорда-Бора? Сформулируйте постулаты Бора.
3. Выведите на основе теории Бора формулу для энергии электрона на n -ой орбите.
4. Объясните смысл отрицательного значения энергии электрона в атоме.
5. Выведите формулу для константы Ридберга на основе теории Бора.
6. Каковы трудности теории Бора?
7. Что такое волновая функция и каков ее статистический смысл?
8. Напишите уравнение Шредингера для электрона в атоме водорода. От каких квантовых чисел зависит решение этого уравнения? Каков их смысл?

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988.– 496 с.
2. Лансберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.– 926 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М. : Наука, 1980.– 751 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12. ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Цель работы: Изучить явление фотоэффекта. Снять вольтамперную и световую характеристики газонаполненного вакуумного фотоэлемента, определить его чувствительность.

В работе используются: фотоэлемент, эталонная лампа, микроамперметр, вольтметр на 100В, реостат, ЛАТР, постоянного тока, ключ, оптическая скамья.

Теоретическая часть

Поглощение света веществом часто сопровождается электрическими явлениями, которые называются фотоэффектом. Различают: 1) внешний фотоэффект; 2) внутренний фотоэффект и 3) фотоэффект в запирающем слое (вентильный фотоэффект).

Внешний фотоэффект

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света, возникновение ЭДС или изменение электропроводности. Электромагнитная теория света не может объяснить всех закономерностей фотоэффекта. Объяснение фотоэффекта дает *квантовая теория*. По квантовой теории электромагнитное излучение имеет двойственную корпускулярно-волновую природу: с одной стороны оно обладает *волновыми свойствами*, обуславливающими явления интерференции, дифракции, поляризации, а с другой стороны, представляет собой поток *частиц – фотонов*. Фотоны – это *кванты электромагнитного излучения*, понятие которых ввел в 1905 году Эйнштейн.

Эйнштейн предположил, что свет не только излучается, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом в виде отдельных порций энергии – квантов электромагнитного излучения – фотонов. Для монохроматического излучения с частотой ν все фотоны обладают одинаковой энергией $\varepsilon = h\nu$.

С квантовой точки зрения при попадании пучка фотонов на поверхность металла происходит соударение фотона с электроном металла; фотон отдает электрону свою энергию $h\nu$. Эта энергия идет на то, чтобы вырвать электрон из металла и сообщить электрону кинетическую энергию. В соответствии с законом сохранения энергии уравнение для внешнего фотоэффекта (*уравнение Эйнштейна*) будет иметь вид:

$$h\nu = A + \frac{mV_{\max}^2}{2} \quad (1)$$

где $h\nu$ – энергия светового кванта, переданная электрону; A – работа выхода электрона за пределы вещества (металла) – минимальное значение энергии, необходимое для вывода электрона из металла; $\frac{mV_{\max}^2}{2}$ – максимальная кинетическая энергия освобожденного электрона (вылетевшего из металла), m и V – масса и скорость электронов.

Уравнение (1) дает теоретическое обоснование законов фотоэффекта. Для внешнего фотоэффекта имеют место законы, экспериментально установленные А.Г. Столетовым (в 1883–1889 гг.):

1. Скорость электронов зависит от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности. Наибольшая длина волны λ_0 или соответствующая ей наименьшая частота ν_0 , начиная с которой прекращается вылет фотоэлектронов, определяется порог фотоэффекта и называется *красной границей фотоэффекта или порог фотоэффекта*.

2. Число фотоэлектронов, вылетевших в единицу времени с единицы поверхности при $\lambda = const$, пропорционально интенсивности потока излучения (фототок насыщения пропорционален световому потоку $I_n = k\Phi$).

3. Число фотоэлектронов, вылетающих в единицу времени с единицы поверхности при постоянной интенсивности падающего потока излучения (т.е. при постоянном числе падающих фотонов), увеличивается с увеличением частоты.

Если поглощенная электроном энергия равна энергии, необходимой для того, чтобы электрон мог совершить только работу выхода, то уравнение (1) примет вид:

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = eU_s \quad (3)$$

Кинетическая энергия фотоэлектрона связана с задерживающим потенциалом U_s , т.е. с таким потенциалом, при котором фотоэффект не наблюдается

Подставляя (2) и (3) в (1) получим:

$$h\nu = h\nu_0 + eU_s \quad (4)$$

Зная ν_0 для данного металла и U_s , легко определяется постоянная Планка

$$h = \frac{eU_s}{\nu - \nu_0} \quad (5)$$

Внутренний фотоэффект

Внутренний фотоэффект возникает при облучении светом полупроводников или диэлектриков. Освобождаемые при облучении электроны не покидают пределы тела, а, оставаясь внутри этих тел, увеличивают их электропроводность за счет возрастания в теле числа свободных носителей тока – электронов и дырок. Если энергия фотона $\varepsilon = h\nu$ достаточна для того чтобы при ее поглощении электрон перешел из валентной зоны в зону проводимости, то в зоне проводимости появятся электроны, а в валентной зоне – дырки, что увеличит число носителей тока.

Фотоэффект в запирающем слое – вентильный

Вентильный фотоэффект, или фотоэффект в запирающем слое, состоит в возникновении электродвижущей силы на границе двух полупроводников различной проводимости (или металла и полупроводника) вследствие внутреннего фотоэффекта. При соприкосновении двух полупроводников с различной проводимостью (р-проводимость и п-проводимость) или полупроводника и металла в месте контакта возникает «запирающий слой» (толщина которого $\approx 10^{-4}$ - 10^{-5} см), который обуславливает одностороннюю проводимость такой системы. Односторонняя проводимость про-

является в том, что ток через запирающий слой практически идет только в одном направлении.

При освещении светом области контакта в данном участке, вследствие внутреннего фотоэффекта возрастает число свободных носителей тока. Это вызывает нарушение равновесного распределения носителей тока в области контакта и *приводит к изменению контактной разности потенциалов по сравнению с равновесной, т.е. к возникновению фото-э.д.с.* Фото – э.д.с. поддерживается действием света ($h\nu$). Таким образом, *при облучении светом места контакта образуется элемент, способный служить источником тока.* В этом и заключается вентильный фотоэффект.

Все рассмотренные виды фотоэффекта нашли широкое применение в науке и технике: в фотоэлектронном контроле, в звуковом кино, в телевидении, в видении в темноте при помощи инфракрасных лучей и т.д. *Приборы, в которых фотоэффект используется для превращения энергии света в электрическую энергию, называются фотоэлементами.* Фотоэлементы очень разнообразны по своей конструкции и типу. Различают фотоэлементы с *внешним фотоэффектом*, так называемые *вакуумные или газонаполненные фотоэлементы*, с *внутренним фотоэффектом* – *фотосопротивления* и фотоэлементы, основанные на фотоэффекте в запирающем слое – *вентильные*. КПД вентильных фотоэлементов выше, чем газонаполненных или вакуумных, он достигает 10–11%, теоретические расчеты говорят о том, что он может быть 20%.

В вентильных фотоэлементах происходит преобразование света в энергию тока, для таких фотоэлементов не требуется внешнего источника эдс. Кремниевые фотоэлементы с запирающим слоем применяются в создании солнечных батарей, в которых происходит прямое преобразование энергии солнечного излучения в электроэнергию. Такие солнечные батареи стоят на искусственных спутниках Земли. При нормальном падении солнечных лучей фотоэлемент с площадью в 10 м^2 (КПД 10 %) равноценен мотору с мощностью 1 квт .

Простейший тип вакуумного фотоэлемента (внешний фотоэффект) представлен на рис. 1. Вакуумный фотоэлемент состоит из стеклянного баллона, внутри которого создан высокий вакуум. Анод А обычно изготавливается из проволоки и имеет форму рамки или кольца.

Катод К выполняется из щелочноземельного металла, имеющего малую работу выхода и в виде тонкого металлического слоя непосредственно наносится на внутреннюю поверхность баллона. Материалом катода служит сурьма и цезий. Такой фотоэлемент работает только в том случае, когда к его электродам приложено напряжение от внешнего источника. У вакуумных фотоэлементов рабочим режимом является режим

напряжения, которому соответствует горизонтальный участок (рис. 2) вольтамперной характеристики. Чувствительность их невелика и достигает порядка 100 люмен.

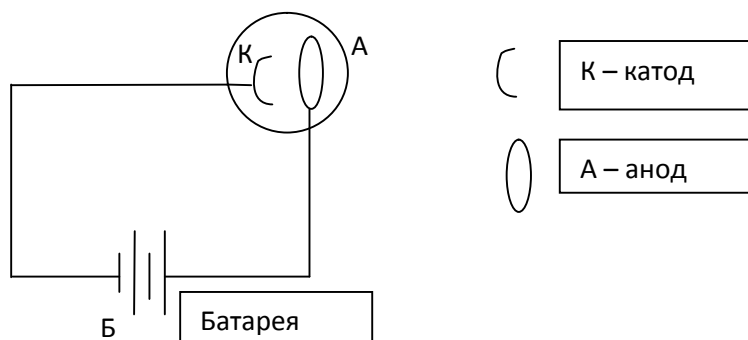


Рис. 1. Вакуумный фотоэлемент

Для повышения чувствительности фотоэлемента баллон наполняют каким-либо инертным газом под небольшим давлением 13,0 Па. Такой газонаполненный фотоэлемент имеет чувствительность в 10–12 раз больше вакуумного. Это происходит вследствие того, что фотоэлектроны, ускоренные электрическим полем ионизируют молекулы инертного газа. В таком фотоэлементе ток насыщения отсутствует, а кривая зависимости тока от напряжения круто поднимается вверх. Если напряжения будет больше рассчитанного, то фотоэлемент начнет светиться. Потенциал, при котором это происходит, называется потенциалом зажигания. Создания такого потенциала может привести к разрушению катода.

К недостаткам газонаполненных фотоэлементов следует отнести отсутствие, в отличие от вакуумных, пропорциональности между освещенностью и силой фототока, а также относительно большую инертность. На внешнем фотоэффекте основана работа фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и электроннооптических преобразователей (ЭОП). Первые применяются, главным образом, для измерения малых световых потоков, а вторые для преобразования изображения малых световых потоков, а вторые для преобразования изображения из одной области спектра в другую, а также для усиления яркости изображения.

Очень важным свойством вакуумных фотоэлементов является их практическая безынерционность. Время между освещением и моментом появления фототока в них не превышает 10^{-9} с.

Газонаполненные фотоэлементы по своему внешнему виду, устройству и схеме включения не отличаются от вакуумного фотоэлемента. Различие заключается в том, что его стеклянный баллон содержит инертный газ

(обычно аргон или неон), давление которого лежит в пределах от 1 до 0,05 мм. рт. ст. Ионизация молекул газа электронами, летящими с катода приводит к увеличению тока, текущего в цепи фотоэлемента.

Одной из основных характеристик фотоэлемента является вольтамперная характеристика, т.е. зависимость тока I от U – напряжения между катодом и анодом.

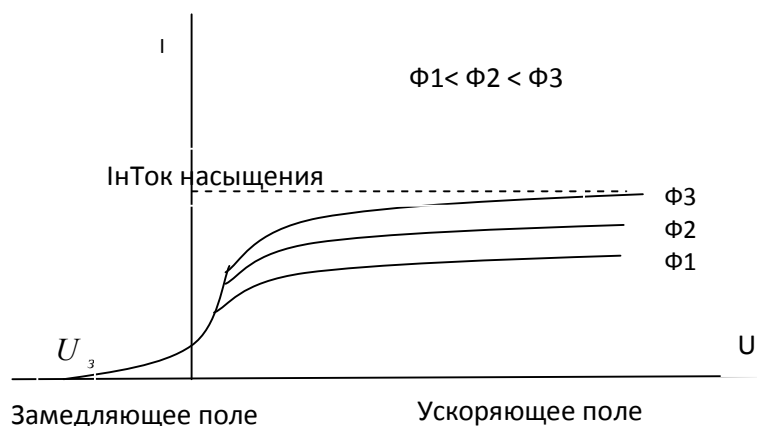


Рис. 2. Вольтамперные характеристики фотоэлементов

Основным параметром фотоэлемента является его чувствительность

$$k = \frac{i}{\Phi} \quad (6)$$

где i – сила фототока насыщения; Φ – световой поток, вызвавший этот ток. Различают интегральную и спектральную чувствительности фотоэлемента. Интегральная чувствительность характеризует способность фотоэлемента реагировать на воздействие светового потока сложного излучения. Спектральная чувствительность определяет силу фототока при воздействии монохроматического светового потока. Чувствительность вакуумных фотоэлементов достигает 150 мкА/лм (световой поток в 1 лм вызывает поток в 150 мкА). Чувствительность газонаполненных фотоэлементов достигает 200 мкА/лм.

Внешний фотоэффект находит применение в фотоэлектронных умножителях (ФЭУ) и электронно-оптических преобразователях (ЭОП).

Выполнение работы

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

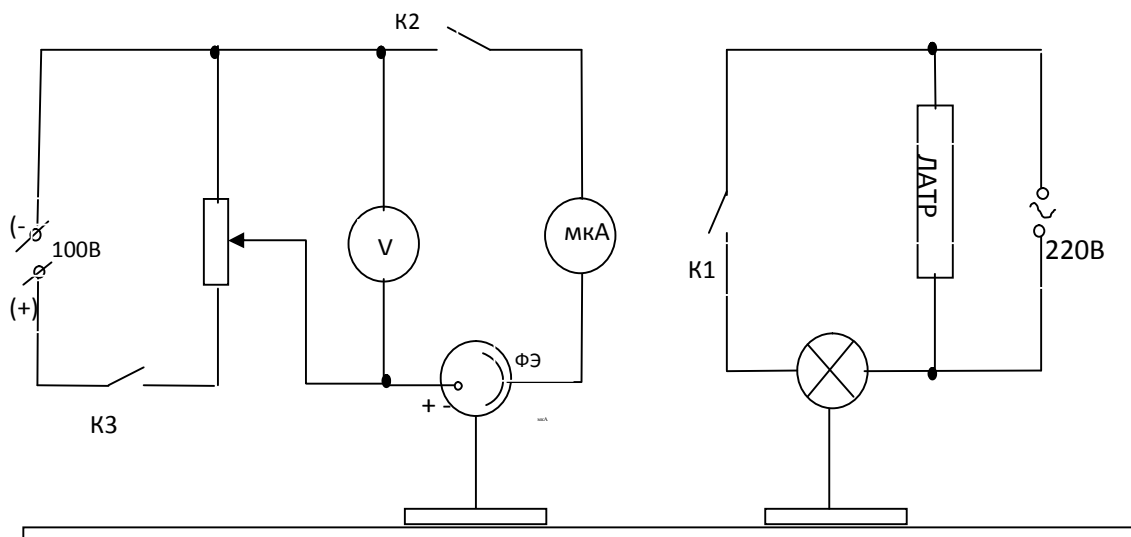


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

При помощи переменного сопротивления изменяется напряжение на электродах фотоэлемента. Освещение фотоэлемента осуществляется лампой накаливания.

Задание 1. Снятие световой характеристики.

1. На оптическую скамью помещают эталонную лампу фотоэлемент, так чтобы центр был на общей горизонтали. Включить их по схеме, указанной на рис. 3.

2. Устанавливают фотоэлемент на расстоянии 20 см от лампы и подают на него напряжение $U = 90$ В.

3. Записывают показания микроамперметра в делениях шкалы (n), рассчитывают силу фототока в микроамперметрах и заносят в таблицу.

4. Аналогично производят опыты при установке фотоэлемента на расстоянии 30, 40, 50, 60 см.

5. Рассчитывают для каждого наблюдения световой поток Φ , падающий на фотоэлемент, из следующих соображений.

$$\Phi = I\omega,$$

где I – сила света лампы, $I = 346 \text{ кд}$ $I = \frac{\Phi}{4\pi}$;

ω – телесный угол, внутри которого распределен световой поток Φ , падающий на светочувствительный слой фотоэлемента. Телесный угол равен отношению площади светочувствительного слоя (круга, диаметр которого равен СД) к квадрату расстояния до источника света $\omega = \frac{S}{R^2}$.

Подставляя значение телесного угла, в формулу для определения светового потока имеем $\Phi = \frac{IS}{R^2}$.

Для предлагаемого фотоэлемента $S = 11,5 \text{ см}^2$.

Задание 2. Снятие вольтамперной характеристики.

1. Устанавливают фотоэлемент на расстоянии 40 см от лампы; меняя напряжение на фотоэлементе через каждые 10 В производят 5 опытов по определению силы фототока i , заносят в таблицу.

2. Строят график $I = f(u)$.

Задание 3. Определение чувствительности фотоэлемента.

По данным наблюдений упражнения 1 рассчитывают чувствительность фотоэлемента $j = \frac{i}{\Phi}$ и результаты заносят в таблицу:

Световая характеристика				Вольтамперная характеристика				Чувствительность		
№		n , делений микро-амперметра	i мкА	Φ люмен	№ опыта	U	n , делений микро-амперметра	I мкА	Φ лм	j мкА/лм

Задание 4. Школьный эксперимент (УИРС). Определение постоянной Планка.

В факультативном практикуме в средней школе можно поставить работу по определению постоянной Планка (h). Предлагается описать, как, пользуясь уравнением (4), определить постоянную Планка и какие приборы для этого потребуются?

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление фотоэффекта?
2. Виды фотоэффекта.
3. Что такое работа выхода электрона из металла?
4. Какая теория света объясняет фотоэффект?
5. Основные законы фотоэффекта.
6. Чем отличаются вольтамперные характеристики вакуумного и газоразрядного фотоэлементов?
7. Раскройте физический смысл термина «красная граница» фотоэффекта.
8. Устройство и принцип действия вакуумного фотоэлемента.
9. Применение фотоэлементов.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988.– 496 с.
2. Лансберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976.– 926 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М. : Наука, 1980.– 751 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа № 1. Изучение основных характеристик лампочки накаливания	14
Лабораторная работа № 2. Измерение температуры нагретых тел с помощью пирометра	21
Лабораторная работа № 3. Исследование спектров поглощения и пропускания	26
Лабораторная работа № 4. Изучение закона Малюса и прохождения поляризованного света через фазовую пластинку	32
Лабораторная работа № 5. Кольца Ньютона	38
Лабораторная работа № 6. Изучение внутреннего напряжения в твердых телах оптическим методом	45
Лабораторная работа № 7. Определение фокусных расстояний положительной и отрицательной линз методом Бесселя	54
Лабораторная работа № 8. Исследование дифракции света	62
Лабораторная работа № 9 Измерение освещенности рабочих мест	73
Лабораторная работа № 10. Соотношение неопределенностей Гейзенберга	78
Лабораторная работа № 11. Определение постоянной Ридберга по спектру атомарного водорода	86
Лабораторная работа № 12. Изучение внешнего фотоэффекта	90

Учебное издание

КОНЧАКОВ Роман Анатольевич, ПОМЕРАНЦЕВ Юрий Александрович,
КРОХИНА Елена Валентиновна, ШЕВЦОВ Сергей Васильевич

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Оптика. Атомная физика

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов физико-математического
факультета*

В авторской редакции

Изготовление оригинала-макета: *В.Ф. Юрченко, О.Ф. Манжосова*

Налоговая льгота – общероссийский классификатор
продукции ОК-005-93, том 2; 953000 – книги, брошюры

Подписано в печать 22.08.2011. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 6,25.

Уч.-изд. л. 5,81. Заказ 158. Тираж 50 экз.

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

«Воронежский государственный педагогический университет».

Отпечатано в типографии университета.

394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 86. Тел. (4732) 255-58-32, 255-61-83.