

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Физика»

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Пособие для студентов специальностей
1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»,
1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного
бассейна», 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана
водных ресурсов», 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели
и метрополитены»

В 2 частях

Часть 1

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2021

УДК 535.015(075.8)

ББК 22.34я7

В40

С о с т а в и т е л и:

*А. К. Есман, Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук, Г. Л. Зыков,
А. И. Бибик, В. А. Потачиц, С. В. Попко*

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Общая физика» БГУ, зав. кафедрой *А. И. Слободянюк*;
доцент кафедры медицинской и биологической физики БГМУ
И. Ф. Медведева

Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом: пособие для студентов специальностей 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство», 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна», 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов», 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитенъ»: в 2 ч. / сост.: А. К. Есман [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – Ч. 1. – 48 с.
ISBN 978-985-583-190-8 (Ч. 1).

В пособии представлены материалы для проведения лабораторных работ по изучению тем: «Поглощение света» и «Дисперсия света». Описаны спектры поглощения и испускания света. Подробно рассмотрены механизмы взаимодействия света с веществом, в том числе с учетом квантовых представлений о природе света.

Описана методика измерения углов с помощью гониометра. Представлен метод определения коэффициентов пропускания и отражения с помощью фотоколориметра.

УДК 535.015(075.8)

ББК 22.34я7

ISBN 978-985-583-190-8 (Ч. 1)

ISBN 978-985-550-987-6

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 1 (№ 36)

1. Изучение поглощения света оконным стеклом	4
1.1. Введение.....	4
1.2. Процесс поглощения света стеклом.....	6
1.3. Поглощение света в веществе. Закон Бугера	8
1.4. Спектры поглощения.....	12
1.5. Определение коэффициента пропускания с помощью фотокolorиметра	16
1.6. Измерение коэффициента поглощения света в оконном стекле с помощью фотокolorиметра	17
1.7. Порядок выполнения лабораторной работы	19
1.8. Контрольные вопросы	23

Лабораторная работа 2 (№ 45)

2. Изучение явления дисперсии света.....	25
2.1. Сущность явления дисперсии света	25
2.2. Классическая электронная теория дисперсии света	27
2.3. Ход лучей в призме.....	34
2.4. Оптические приборы. Оптический диапазон электромагнитных волн.....	36
2.5. Дисперсионные и дифракционные спектры.....	37
2.6. Вывод рабочей формулы.....	38
2.7. Измерение угла наименьшего отклонения луча с помощью гониометра.....	40
2.8. Порядок выполнения лабораторной работы	41
2.9. Контрольные вопросы	47

Список литературы.....	48
------------------------	----

Лабораторная работа 1 (№ 36)

1. ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ОКОННЫМ СТЕКЛОМ

Цель работы: изучить основные закономерности поглощения света веществом, ознакомиться с методиками измерения коэффициентов пропускания и поглощения вещества с помощью фотоколориметра, измерить коэффициенты пропускания и поглощения оконного стекла с помощью фотоколориметра.

Приборы и материалы: фотоколориметр КФК-2-УХЛ 4.2, стекло толщиной d_1 , блок из оконного стекла толщиной d_2 .

1.1. Введение

Стекла представляют собой аморфный материал, полученный в промышленных условиях путем резкого охлаждения расплавленной массы. В состав стекла входит песок, известняк, сода и другие вещества.

К **оптическим свойствам стекла** относятся: *светопропускание (поглощение), отражение, светопреломление, рассеивание* и др.

Источником света и тепла на Земле является Солнце. Температура Солнца составляет порядка 6000 К, от Солнца исходят электромагнитные волны – солнечное излучение. Диапазон длин волн солнечного излучения, проходящего через атмосферу и оказывающего воздействие на земную поверхность, составляет 300–2500 нм, при этом интервал 300–380 нм соответствует ультрафиолетовому излучению (УФ), интервал 380–760 нм – видимому свету и интервал 760–2500 нм – инфракрасному (ИК) излучению.

В спектральном анализе (метод определения химического состава вещества по его спектру) длину волны спектральной линии принято выражать в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) или в микрометрах ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$). Для аналитических целей ча-

ше используют ультрафиолетовую, видимую и ближнюю инфракрасную части спектра. Ультрафиолетовая область спектра условно разделяется на вакуумную (10–185 нм), дальнюю (185–230 нм) и ближнюю (230–380 нм).

Ультрафиолетовое излучение Солнца с длинами волн (10–300 нм) поглощается озоновым слоем и не доходит до поверхности Земли.

Видимая часть (380–760 нм), в отличие от других областей спектра, воспринимается глазом человека в виде семи основных цветов: фиолетового (390–420 нм), синего (424–455 нм), голубого (455–494 нм), зеленого (494–565 нм), желтого (565–595 нм), оранжевого (595–640 нм), красного (640–723 нм) и их оттенков. За видимой красной частью спектра расположена инфракрасная область, которая подразделяется на ближнюю (0,75–25 мкм) и дальнюю (> 25 мкм).

Солнечное излучение, попадающее на стекло, частично проходит сквозь него (85–90 %), частично отражается от его поверхности (около 8 %) и частично поглощается (2–7 % – в зависимости от марки стекла).

Оконное стекло почти полностью задерживает дальний (100–280 нм), средний (280–300 нм), а также ближний (300–380 нм) ультрафиолет. При этом хорошо пропускает длинноволновую часть ближнего ультрафиолета (380–400 нм).

Обычные стекла пропускают до 70 % вредных УФ-лучей, которые вызывают выцветание ковров, занавесок, картин и мебели. Даже лучшие из стекол пропускают большую часть этого излучения. Защита от ультрафиолетовых лучей особенно важна для витрин магазинов с одеждой, мебелью и другими подверженными выцветанию изделиями, а также в остеклении библиотек, художественных галерей и музеев и т. д.

Оконные блоки, пропуская солнечное излучение в помещение, способствуют его нагреванию. При этом свет видимого диапазона дает больше 50 % тепловой энергии, коротковолновое инфракрасное – больше 40 %, а ультрафиолетовое излучение – 1–3 %.

Способность стекла пропускать, отражать или поглощать свет оценивается коэффициентами: *пропускания* T , *отражения* R и *поглощения* k , сумма которых равна единице, то есть

$$T + R + k = 1.$$

При проектировании и строительстве зданий и сооружений, в зависимости от условий эксплуатации и назначения строения, необходимо сделать правильный выбор оконных стекол с максимально подходящими оптическими свойствами.

1.2. Процесс поглощения света стеклом

Оптические свойства стекол и других прозрачных материалов (оптических ситаллов, прозрачной керамики) обусловлены взаимодействием электромагнитного излучения с веществом.

При распространении электромагнитных волн, в том числе и световых, в веществе уменьшение их интенсивности наблюдается в результате процессов, происходящих при взаимодействии электрического и магнитного полей волны с атомами и молекулами среды. К таким процессам относятся рассеяние, люминесценция, фотохимическое разложение вещества и др.

Если прохождение света через некоторую среду не вызывает необратимых изменений, то есть не происходят фотохимические реакции и вещество достаточно однородно, так что можно пренебречь рассеянием, то изменение интенсивности света обусловлено превращением энергии электромагнитного поля волны в другие виды энергии (чаще всего в энергию хаотического теплового движения атомов и молекул вещества). Именно так происходит *процесс поглощения света стеклом*.

Поглощенное излучение впоследствии возвращается стеклом во внешнее и внутреннее окружающее пространство путем конвекции и в виде вторичного теплового излучения.

Конвекция – вид теплообмена, при котором внутренняя энергия передается струями и потоками.

Современная теория поглощения света стеклом основывается на положениях молекулярной оптики и квантовой механики. Электромагнитная теория Максвелла, которую развил Лоренц, связала между собой оптические и электрические свойства тел. Она объяснила, в частности, почему стекла прозрачны, а металлы не пропускают свет.

В диэлектриках (стекла являются неорганическими диэлектриками) практически нет свободных электронов. Поэтому проходящая через них световая волна возбуждает колебания связанных в атомах электронов. При этом волна расходует очень мало своей энергии. Большая часть интенсивности света проходит через диэлектрики, поэтому стекла прозрачны для света.

Взаимодействие световой волны со стеклом сводится к возбуждению колебаний электронов, входящих в состав атомов и молекул. Для простоты можно предположить, что вещество состоит из одинаковых атомов, и в каждом из них под действием поля волны может смещаться только один электрон. В обычном состоянии, когда свет не проходит через вещество, электрон находится в состоянии равновесия. Когда же в веществе распространяется электромагнитная световая волна, то ее поле действует на электроны в атомах. На покоящийся или медленно движущийся электрон магнитная составляющая поля световой волны оказывает очень малое влияние, и практически во всех случаях можно учитывать только действие электрического поля волны. Сила, действующая со стороны электрического поля световой волны на электрон, заставит его совершать вынужденные колебания. Поле, возбуждающее колебания электрона, расходует определенную часть своей энергии, и эти потери будут тем больше, чем ближе частота электрического поля волны к собственной частоте колебаний электрона. Интенсивность световой волны уменьшится, следовательно, свет будет поглощаться веществом.

В металлах, которые в отличие от стекол являются проводниками, валентные электроны находятся в свободном состоя-

нии и не связаны жестко с атомами вещества, поэтому могут свободно перемещаться по проводнику. Электрическое поле световой волны приводит свободные электроны металла в упорядоченное направленное движение, создавая быстро протекающий по металлу ток. Энергия проходящей световой волны практически полностью расходуется на создание тока, поэтому металлы поглощают свет.

В результате поглощения металл нагревается, так как энергия световой волны превращается, согласно закону Джоуля-Ленца, в тепловую энергию.

1.3. Поглощение света в веществе. Закон Бугера

Поглощением света называют явление уменьшения интенсивности светового потока при распространении его в веществе.

При распространении света в веществе уменьшение энергии световых волн происходит вследствие ее преобразования во внутреннюю энергию вещества или в энергию вторичного излучения, имеющего иной спектральный состав и другие направления распространения.

В результате поглощения света могут происходить нагревание вещества, ионизация атомов или молекул, фотохимические реакции, фотолюминесценция и т. д. Поглощение света не связано с явлением уменьшения интенсивности проходящей световой волны в оптически неоднородной среде вследствие рассеяния света.

Оптически однородной называется среда, в которой показатель преломления является постоянной величиной по всему объему вещества. Если показатель преломления изменяется от одной точки в объеме вещества к другой, то среда – **оптически неоднородная**.

Показатель преломления среды (n) – физическая величина, показывающая во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в среде.

Рассмотрим закономерности прохождения света в *однородной поглощающей среде*.

При распространении волны в поглощающей однородной среде изменяется как фаза волны, так и ее амплитуда.

Уменьшение амплитуды волны приводит к уменьшению интенсивности светового потока, что и является поглощением света.

Французским физиком Пьером Бугером в 1729 г. экспериментально было установлено, что при прохождении через слой вещества толщиной dx (рис. 1.1) интенсивность светового потока I уменьшается на определенную долю $\frac{dI}{I_0}$, зависящую только от коэффициента поглощения k и толщины слоя вещества dx :

$$\frac{dI}{I_0} = -kdx,$$

где k – коэффициент пропорциональности, характеризует поглощающую способность данной среды и называется **коэффициентом поглощения**.

Знак « $-$ » в формуле означает, что после прохождения вещества интенсивность света уменьшается.

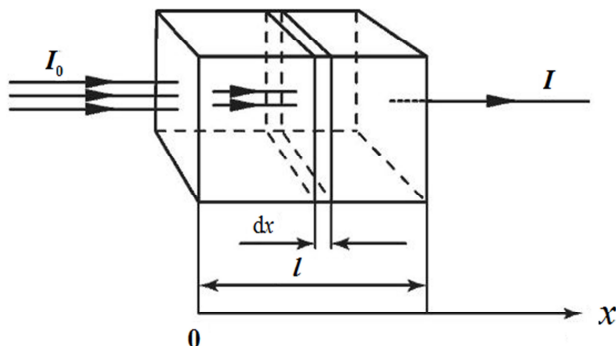


Рис. 1.1. К выводу закона Бугера

Проинтегрируем полученное выражение

$$\int_0^l \frac{dI}{I_0} = -\int_0^l k dx,$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -kl,$$

или

$$I = I_0 e^{-kl},$$

где I_0 – интенсивность светового потока, входящего в слой поглощающего вещества;

I – интенсивность светового потока, прошедшего через слой вещества толщиной l ;

k – коэффициент поглощения, зависящий от величины длины волны.

Закон Бугера: интенсивность светового потока, распространяющегося в однородной поглощающей среде, в зависимости от пройденного в веществе пути, убывает по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-kl}.$$

Из графиков (рис. 1.2) видно, что поглощение быстро растет при увеличении толщины вещества, при этом для вещества с большим коэффициентом поглощения наблюдается более интенсивный рост.

Определим физический смысл коэффициента поглощения. Пусть

$$k = \frac{1}{l},$$

тогда

$$I = \frac{I_0}{e}.$$

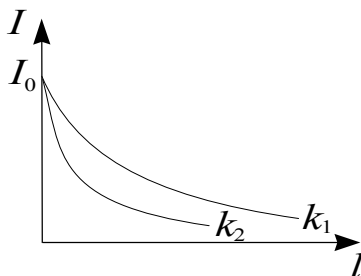


Рис. 1.2. Вид зависимости интенсивности светового потока от толщины вещества ($k_2 > k_1$)

Таким образом, **физический смысл коэффициента поглощения** состоит в следующем: *коэффициент поглощения есть величина обратная толщине слоя вещества, при прохождении которой интенсивность излучения убывает в e ($\approx 2,72$) раз.*

Единица измерения коэффициента поглощения k в системе СИ – м^{-1} .

При больших интенсивностях излучения коэффициент поглощения k зависит от интенсивности и закон Бугера нарушается.

Коэффициент поглощения зависит от длины волны света, химической природы и состояния вещества, т. е. поглощение селективно. Например, одноатомные газы и пары металлов, т. е. вещества, в которых атомы расположены на значительных расстояниях друг от друга, обладают близким к нулю коэффициентом поглощения, и лишь для узких спектральных областей (примерно 10^{-12} – 10^{-7} м) наблюдаются резкие максимумы. Коэффициент поглощения для диэлектриков невелик (примерно 10^{-3} – 10^{-5} см^{-1}), однако у них наблюдается селективное поглощение света в определенных интервалах длин волн. Коэффициент поглощения для металлов имеет большие значения (примерно 10^3 – 10^5 см^{-1}). Поэтому металлы являются непрозрачными для света. Чем выше проводимость металла, тем сильнее в нем поглощение света.

Таким образом, все вещества обладают избирательным поглощением. Например, кожа человека поглощает длину волны 300 нм, для оконного стекла такая длина волны попадает в область поглощения стеклом.

У прозрачных тел полосы поглощения приходятся на невидимые глазом области спектра (инфракрасную или ультрафиолетовую). У окрашенных тел полосы поглощения находятся в соответственных участках видимой области спектра. Например, «красным» является стекло, слабо поглощающее красные и оранжевые лучи и хорошо поглощающее синие, зеленые и фиолетовые.

1.4. Спектры поглощения

Зависимость коэффициента поглощения k от длины волны света λ называется **спектром поглощения вещества**.

Каждая спектральная линия характеризуется длиной волны или частотой.

Зависимость $k(\lambda)$ обычно изображается в виде графика.

Различают несколько видов спектров поглощения: линейчатый, полосатый, сплошной.

Линейчатый спектр поглощения характерен для атомов, расположенных на значительном расстоянии друг от друга (разреженные газы, пары), и имеет вид узких линий (рис. 1.3, спектр поглощения атома водорода). Т. е. коэффициент k отличен от нуля только в определенных узких диапазонах длин волн (сотые, тысячные доли нанометра).

Полосатый спектр поглощения характерен для газов, молекулы которых построены из нескольких атомов. Для них наблюдаются собственные частоты, соответствующие колебаниям электронов, колебаниям атомов внутри молекулы и вращению молекулы как целого вокруг оси. Эти три вида движения квантованы, причем между соседними электронными уровнями расположен набор колебательных уровней, а между соседними колебательными уровнями – набор вращательных

уровней. Частоты электронных переходов соответствуют ультрафиолетовой и видимой областям спектра, частоты же колебательных и вращательных – ближней и дальней инфракрасной области.

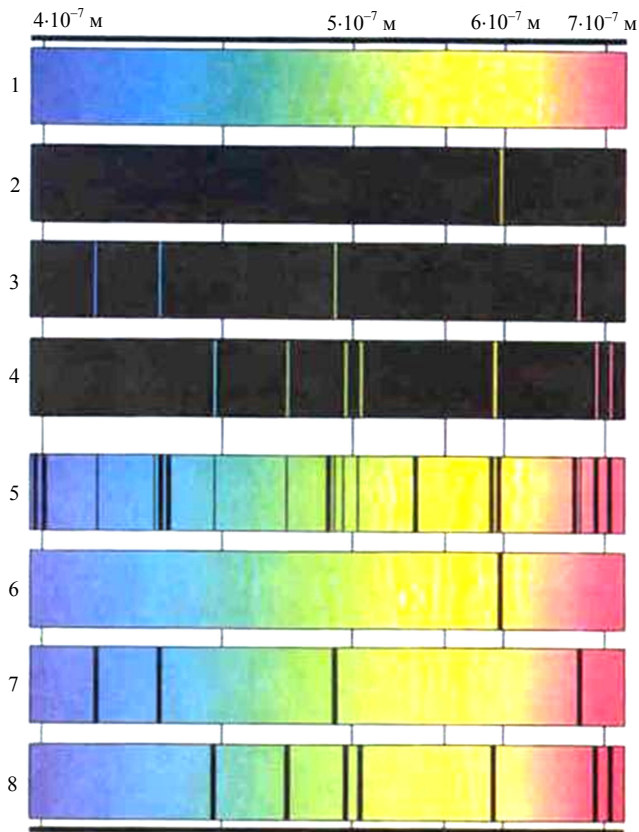


Рис. 1.3. Вид спектров испускания:
 1 – сплошной; 2 – натрия; 3 – водорода; 4 – гелия;
 поглощения:
 5 – солнечный; 6 – натрия; 7 – водорода; 8 – гелия

Спектр поглощения многоатомной молекулы (рис. 1.4) состоит из отдельных полос, ширина которых изменяется от единиц до сотен нанометров.

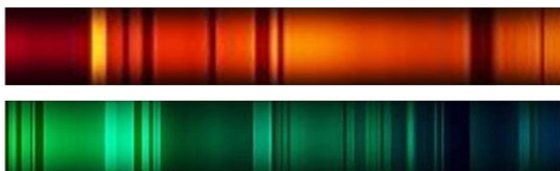


Рис. 1.4. Вид полосатых спектров поглощения

Полосатые спектры поглощения характерны для жидкостей и твердых тел, у которых, как правило, очень широкие области спектра (сотни – тысячи нанометров) с большими значениями коэффициентов поглощения k . Качественно это объясняется тем, что в концентрированных средах сильное взаимодействие между частицами приводит к быстрой передаче световой энергии, переданной светом от одной частицы всему коллективу частиц. Например, чем выше давление, т. е. сильнее взаимодействие частиц у молекулярных газов, тем шире их полосы поглощения, которые при высоких давлениях становятся сходными со спектрами поглощения света жидкостями.

У окрашенных тел полосы поглощения находятся в соответствующих участках видимой области спектра. Зависимостью коэффициента поглощения от длины волны объясняется окрашенность поглощающих тел.

Например, стекло, слабо поглощающее красные и оранжевые лучи и сильно поглощающее зеленые и синие, при освещении белым светом будет казаться красным. Если на такое стекло направить зеленый и синий свет, то из-за сильного поглощения света этих длин волн стекло будет казаться черным. Это явление используется для изготовления светофильтров, которые в соответствии с химическим составом (стекла с присадками различных солей, пленки из пластмасс, содержащие красители, растворы красителей и др.) пропускают свет только определенных длин волн, поглощая остальные.

Поглощение света используется в различных областях науки и техники. Изучение электронных спектров поглощения (абсорбционная спектроскопия) широко используется при ре-

шении многих задач аналитической химии (качественный и количественный анализы), при исследовании различных физических и химических процессов, в том числе межмолекулярных взаимодействий, в медицинских и биологических исследованиях. Для анализа электронных спектров поглощения используются спектрофотометры.

В квантовой теории процесс поглощения света связан с переходом электронов в поглощающих атомах, парах, молекулах, или в твердом теле с более низких уровней энергии на более высокие. Обратный переход в основное или нижнее возбужденное состояние может совершаться с излучением или без излучения фотона. При этом способ перехода в обратном направлении определяется тем, в какой вид энергии переходит энергия поглощенного света.

В световых пучках большой интенсивности поглощение света не подчиняется закону Бугера, т. е. k становится функцией интенсивности света – **нелинейное поглощение**. Этот эффект может быть обусловлен тем, что очень большая доля поглощающих частиц перейдет в возбужденное состояние и, оставаясь в нем сравнительно долго, теряет способность поглощать свет, что заметно изменяет характер поглощения света веществом.

По виду спектра поглощения можно исследовать состав вещества, выяснить природу химических связей, зонную структуру полупроводников и многое другое.

Если в поглощающей среде искусственно создана инверсия населенности, т. е. число частиц на верхнем уровне превосходит число частиц на нижнем, то при распространении света в такой среде каждый фотон имеет большую вероятность индуцировать испускание точно такого же фотона, чем быть поглощенным самому. В этом случае световой поток, проходящий через вещество с инверсной населенностью, не ослабляется, а усиливается. На этом явлении основано действие лазеров и квантовых усилителей света.

1.5. Определение коэффициента пропускания с помощью фотоколориметра

Пусть на тело падает поток излучения Φ . Часть потока $\Phi_{\text{отр}}$ отражается поверхностью тела, часть потока $\Phi_{\text{пог}}$ поглощается телом и часть потока $\Phi_{\text{пр}}$ проходит через данное тело.

Коэффициент отражения R тела – это отношение потока, отраженного телом, к потоку, падающему на данное тело

$$R = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi}.$$

Коэффициент пропускания тела T – это отношение потока излучения, прошедшего через тело, к потоку, падающему на данное тело

$$T = \frac{\Phi_{\text{пр}}}{\Phi}.$$

Принцип измерения коэффициента пропускания тела состоит в том, что на фотоприемник направляют поочередно световые потоки: полный Φ и прошедший $\Phi_{\text{пр}}$ через исследуемое тело, и определяют отношение этих потоков. Результат получают или в виде десятичной дроби, или в процентах.

$$T = \frac{\Phi_{\text{пр}}}{\Phi} 100 \text{ \%}.$$

Определение коэффициента пропускания на фотоколориметре производится на примере определения коэффициента пропускания оконного стекла. Когда световой поток проходит от источника непосредственно к приемнику, изменением чувствительности приемника добиваются, чтобы отсчет по шкале

коэффициентов пропускания был равен 100 %. Затем на пути светового пучка помещают кусок оконного стекла таким образом, чтобы его поверхность была перпендикулярна световому пучку. Полученный отсчет по шкале коэффициентов пропускания фотоколориметра соответствует коэффициенту пропускания данного стекла в процентах.

1.6. Измерение коэффициента поглощения света в оконном стекле с помощью фотоколориметра

Прибор, используемый для измерения поглощения света, состоит из нескольких узлов, соединенных в определенной последовательности. Прибор должен выполнять две основные задачи:

- 1) разложить полихроматический свет по длинам волн и выделить нужный интервал длин волн;
- 2) оценить поглощение света веществом при выбранной длине волны.

Прибор включает источник излучения, устройство для выделения нужного интервала длин волн (монокроматор или светофильтр), кюветное отделение, детектор, преобразователь сигнала, индикатор сигнала (шкалу или цифровой счетчик). Порядок расположения узлов может быть разным (например, монокроматор может стоять до кюветы или после нее). Типичными источниками излучения являются лампа накаливания с вольфрамовой нитью, а также могут использоваться дейтериевая (водородная) лампа или галогенная и кварцевая лампы.

Рассмотрим как устроен фотоколориметр. Фотоколориметр (рис. 1.5) состоит из блока питания и оптического блока.

В оптический блок входят осветитель 8, представляющий собой лампу накаливания, светофильтры 7, кюветное отделение 2 с кюветодержателем, фотометрическое устройство с усилителем постоянного тока и элементами регулирования, регистрирующий прибор 1. Конструкция осветителя 8 обеспечивает перемещение лампы в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

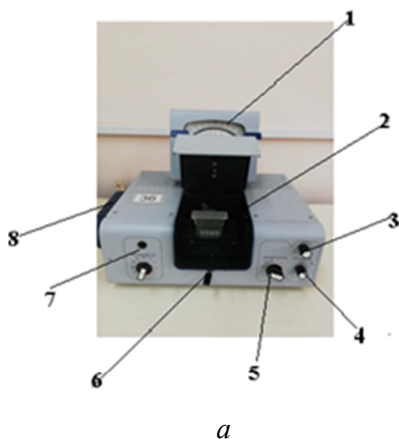


Рис. 1.5. Фотоколориметр КФК-2-УХЛ 4.2:

а – внешний вид;

1 – микроамперметр; *2* – кюветное отделение; *3* – ручка «установка “100” ПЛАВНО»; *4* – ручка «установка “100” ГРУБО»; *5* – ручка установки чувствительности прибора; *б* – ручка перемещения кювет со стеклами;

7 – светофильтры; *8* – осветитель;

б – ручка переключения светофильтров

Светофильтры *7* вмонтированы в диск и вводятся в световой пучок с помощью ручки (рис. 1.5, *б*). Рабочее положение каждого светофильтра фиксируется.

Кюветодержатель расположен под крышкой в кюветном отделении *2* (рис. 1.5, *а*). При работе в кюветном отделении одновременно могут находиться два образца: стекло толщиной d_1 и стекло толщиной d_2 . Перестановку кювет в световом пучке осуществляют поворотом ручки *б* до упора.

Спектральный диапазон работы разбит на определенные интервалы с помощью светофильтров (ручка *7*, рис. 1.5, *а*). Диапазон длин волн 315–450 нм отмечен черным цветом, диапазон 590–980 нм – красным цветом (рис. 1.5, *б*).

При измерении коэффициента поглощения света надо учитывать, что часть света отражается на границе исследуемого вещества, и потому вносить соответствующие поправки. В пер-

вом приближении можно исключить влияние отражения, если измерять интенсивности света I_1 и I_2 , прошедшего сквозь два слоя толщинами d_1 и d_2 соответственно:

$$I_1 = I_0 e^{-kd_1}; \quad I_2 = I_0 e^{-kd_2};$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{e^{-kd_2}}{e^{-kd_1}} = e^{-k(d_2-d_1)};$$

$$k = -\frac{\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}{d_2 - d_1}.$$

На фотоколориметре отношение I_2/I_1 определяется следующим образом. Когда на пути светового потока помещают стекло толщиной d_1 , изменением чувствительности приемника добиваются, чтобы отсчет по шкале коэффициентов пропускания был равен 100 %. Затем на место стекла толщиной d_1 устанавливают стекло толщиной $d_2 > d_1$. Полученный отсчет по шкале коэффициентов пропускания соответствует I_2/I_1 , выраженному в процентах. Зная толщины используемых стекол и значение I_2/I_1 , по формуле вычисляется коэффициент поглощения света k .

1.7. Порядок выполнения лабораторной работы

Задание 1. Измерить коэффициент пропускания оконного стекла толщиной d_1 .

1. Изучите экспериментальную установку (рис. 1.5, *a*), определите цену деления на шкале пропускания T (рис. 1.6, *a*) и изучите расположение ручек «Установка “100” ГРУБО» и «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ» (рис. 1.6, *б*).



a



б

Рис. 1.6. Фотоколориметр КФК:

a – вид шкалы амперметра;

б – расположение ручек «Установка “100” ГРУБО»,
«Установка “100” ТОЧНО», установка «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ»

2. До начала измерений внимательно прочитайте настоящие указания и строго выполняйте их в процессе измерений.

3. Подготовьте табл. 1.1 и 1.2 для занесения экспериментальных результатов.

Таблица 1.1

Чувствительность	Шкала								
	Черная						Красная		
	2	2	2	1	2	3	2	1	1
λ , нм	315	364	400	440	490	540	590	670	750
T , %									

Таблица 1.2

Чувствительность	Шкала								
	Черная						Красная		
	3	2	2	2	2	3	2	2	2
λ , нм	315	364	400	440	490	540	590	670	750
I_2/I_1 , %									
κ , см ⁻¹									

4. Установите ручки «ГРУБО» и «ТОЧНО» панели «Установка “100”» в крайнее левое положение.

5. Включите прибор тумблером «Сеть», расположенным на задней панели.

6. Откройте крышку кюветодержателя и установите стекло толщиной d_1 ($d_1 = 0,3$ см) в дальнюю позицию держателя. Закройте крышку.

7. Установите черную ручку b кюветодержателя, расположенную внизу под крышкой, в положение 2. При этом световой поток будет проходить через воздух.

8. Установите ручкой «Светофильтры» значение длины волны согласно данным табл. 1.1. Первое значение длины волны – 315 нм по черной шкале.

9. Установите ручкой «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ» значение 2 по черной шкале.

10. Ручкой «ГРУБО» установите 100 % по шкале коэффициента пропускания стекла T (верхняя шкала рис. 1.6, a).

11. Поставьте стекло толщиной d_1 на пути светового пучка, переведя ручки b кюветодержателя в положение 1.

12. Запишите показание для коэффициента поглощения T в % в табл. 1.1.

13. Переведите ручку b кюветодержателя в положение 2.

14. Снова установите ручки «ГРУБО» и «ТОЧНО» панели «Установка “100”» в крайнее левое положение. **Это необходимо выполнять перед каждым новым измерением.**

15. Проведите измерения для других длин волн из табл. 1.1, повторив пункты 8–14. Значения длин волн 364–540 нм и интервалы чувствительности для них устанавливаются по черным шкалам «Светофильтры» и «Чувствительность». Значения длин волн 590–750 нм и интервалы чувствительности для них устанавливаются по красным шкалам «Светофильтры» и «Чувствительность».

16. По данным табл. 1.1 постройте график зависимости коэффициента пропускания T (по оси OY) от длины волны λ (по оси OX).

17. Проанализируйте полученные результаты и сделайте вывод.

Задание 2. Измерить коэффициент поглощения оконного стекла.

1. Откройте крышку кюветодержателя. Поместите стеклянный блок толщиной d_2 ($d_2 = 4,8$ см) в кюветодержатель в свободную позицию.

2. Установить ручки «ГРУБО» и «ТОЧНО» панели «Установка “100”» в крайнее левое положение.

3. Установите черную ручку b кюветодержателя, расположенную внизу под крышкой, в положение 1 . При этом световой поток будет проходить через стекло толщиной d_1 .

4. Установите ручкой «Светофильтры» значение длины волны согласно данным табл. 1.2. Первое значение длины волны – 315 нм по черной шкале.

5. Установите ручкой «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ» значение 3 по черной шкале.

6. Ручкой «ГРУБО» установите 100 % по шкале коэффициента пропускания стекла T (верхняя шкала).

7. Поставьте блок со стеклом толщиной d_2 на пути светового пучка, переведя ручки b кюветодержателя в положение 2.

8. Запишите показание для отношения I_2/I_1 в % в табл. 1.2.

9. Переведите ручку b кюветодержателя в положение 1 .

10. Снова установите ручки «ГРУБО» и «ТОЧНО» панели «Установка “100”» в крайнее левое положение. **Это необходимо выполнять перед каждым новым измерением.**

11. Проведите измерения для других длин волн из табл. 1.2, повторив пункты 2–10. Значения длин волн 364–540 нм и интервалы чувствительности для них устанавливаются по черным шкалам «Светофильтры» и «Чувствительность». Значения длин волн 590–750 нм и интервалы чувствительности для них устанавливаются по красным шкалам «Светофильтры» и «Чувствительность».

12. По данным табл. 1.2 вычислите коэффициент поглощения стекла по формуле

$$k = -\frac{\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}{d_2 - d_1},$$

где $d_1 = 0,3$ см, $d_2 = 4,8$ см.

13. Полученные значения запишите в табл. 1.2.

14. По данным табл. 1.2 постройте график зависимости коэффициента поглощения оконного стекла k (по оси OY) от длины волны света λ (по оси OX).

15. Проанализируйте полученные результаты и сделайте вывод.

1.7. Контрольные вопросы

1. Какая среда называется оптически однородной?
2. Что называется поглощением света?
3. Объясните, почему стекло является прозрачным для света.
4. Назовите оптические свойства стекла.
5. Получите и сформулируйте закон Бугера.
6. В чем состоит физический смысл коэффициента поглощения? От чего зависит коэффициент поглощения?

7. На каких предположениях основан вывод закона Бугера?
8. Что собой представляет спектр поглощения? Какие бывают спектры поглощения?
9. Чем отличаются спектры поглощения газов, жидкостей и металлов.
10. Дайте определение коэффициентов пропускания и отражения.
11. Как объясняется процесс поглощения в квантовой теории?
12. На чем основано действие лазеров?
13. Как определяется коэффициент пропускания с помощью фотоколориметра?
14. Как определяется коэффициент поглощения света в стекле с помощью фотоколориметра?

Лабораторная работа 2 (№ 45)

2. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИСПЕРСИИ СВЕТА

Цель работы: изучить явление дисперсии, ознакомиться с методом измерения углов с помощью гониометра, определить значения показателя преломления для различных длин волн экспериментально полученного дисперсионного спектра.

Оборудование и материалы: трехгранная призма, гониометр, ртутная лампа.

2.1. Сущность явления дисперсии света

Дисперсия света – это явление зависимости абсолютного показателя преломления вещества от длины волны (или частоты) света, или, что то же самое, зависимость фазовой скорости распространения света в веществе от его длины волны (или частоты).

Хотя экспериментально дисперсия света была открыта Исааком Ньютоном еще в 1672 г., теоретическое объяснение этого явления было дано значительно позднее.

Абсолютный показатель преломления вещества (n) – безразмерная физическая величина, характеризующая отношение скорости света c в вакууме к фазовой скорости v распространения света (как электромагнитной волны) в веществе:

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

Фазовая скорость совпадает со скоростью движения фазового фронта. **Фазовый (или волновой) фронт** представляет собой поверхность, до которой дошел волновой процесс к данному моменту времени t . Например, волновой фронт волны, вызванной колебаниями точечного источника в упругой одно-

родной среде и распространяющейся со скоростью v , представляет собой сферу радиусом $R = vt$.

Для всех прозрачных веществ показатель преломления n в *видимом диапазоне* (длина световой волны $\lambda \approx 380\text{--}740$ нм) увеличивается с уменьшением длины волны:

$$\frac{dn}{d\lambda} < 0.$$

То есть для оптически прозрачных сред красный свет имеет минимальный показатель преломления (максимальную скорость распространения), а фиолетовый – максимальный показатель преломления (минимальную скорость распространения). Таковую дисперсию света называют **нормальной**.

Дисперсия света называется **аномальной**, если показатель преломления n уменьшается с уменьшением длины волны λ света:

$$\frac{dn}{d\lambda} > 0.$$

Аномальная дисперсия наблюдается практически у всех газов вблизи линии поглощения. Для оптически прозрачных стекол аномальная дисперсия наблюдается в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра. Вдали от линии поглощения дисперсия того же вещества носит нормальный характер (рис. 2.1).

Область длин волн, в которой наблюдается аномальная дисперсия, соответствует ширине линии (полосы) поглощения данного вещества. Если вещество имеет несколько линий (полос) поглощения, то аномальная дисперсия наблюдается вблизи каждой из них.

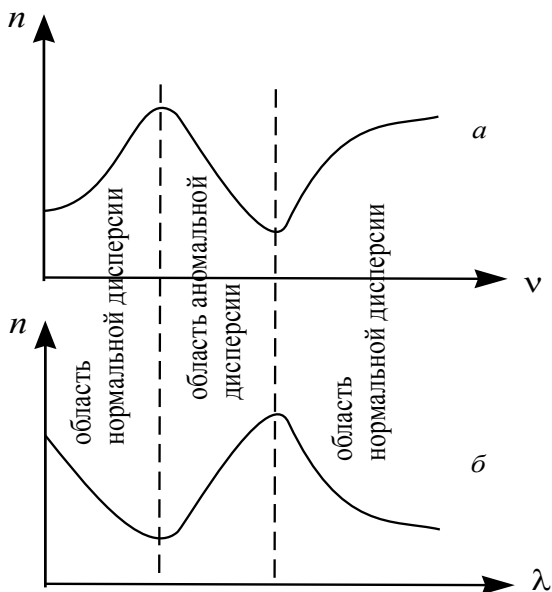


Рис. 2.1. Зависимость показателя преломления n вещества в областях нормальной и аномальной дисперсии:
 a – от частоты ν ; $б$ – от длины волны λ

2.2. Классическая электронная теория дисперсии света

Для объяснения дисперсии света необходимо рассмотреть теорию взаимодействия света с веществом, которая может быть построена в рамках как классической, так и квантовой физики.

Максвелл показал, что свет представляет собой электромагнитную волну. В рамках классической теории электромагнитных волн Максвелла соотношение между фазовыми скоростями распространения света в вакууме c и в веществе v зависит от диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей вещества.

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}.$$

Для **немагнитных сред** $\mu = 1$. Оптически прозрачные для света среды являются немагнитными. Тогда для прозрачных сред

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon}. \quad (2.1)$$

Учитывая, что показатель преломления $n = \frac{c}{v}$, получим

$$n = \sqrt{\varepsilon} \quad (2.2)$$

или

$$n^2 = \varepsilon. \quad (2.3)$$

На первый взгляд кажется, что формулы (2.2) и (2.3) противоречат опыту. Так, для воды в постоянном электрическом поле и в переменных полях малой частоты $\varepsilon = 81$. Тогда, согласно формуле (2.3), $n = 9$. Однако из опыта известно, что для видимой области спектра $n = 1,33$. Данное кажущееся противоречие связано с тем, что явление дисперсии возникает в результате воздействия на вещество переменного электрического поля высокой частоты. Действительно, в постоянном электрическом поле и в переменных электрических полях малой частоты происходит сильная ориентационная поляризация полярных молекул, что и обуславливает высокое значение ε . Однако в переменных электрических полях высокой частоты, к которым относится и поле световой волны, полярные молекулы уже не успевают ориентироваться, и ориентационная поляризация практически не происходит. Это приводит к сильному уменьшению значений как ε , так и n .

Диэлектрическая проницаемость вещества определяется выражением

$$\varepsilon = 1 + \varkappa, \quad (2.4)$$

где \varkappa – диэлектрическая восприимчивость, определяющая способность молекул среды к поляризации, то есть к приобре-

тению молекулами вещества отличного от нуля дипольного момента под действием внешнего электрического поля.

Для диэлектриков в первом приближении явление поляризации в электрическом поле высокой частоты можно рассматривать как смещение электронов под действием поля на некоторое расстояние x относительно положения равновесия в направлении против поля. Ядра атомов при этом можно считать неподвижными, поскольку их масса значительно больше массы электрона.

Количественной характеристикой поляризации вещества является **поляризованность** (P), величина которой пропорциональна напряженности электрического поля E :

$$P = \alpha \epsilon_0 E, \quad (2.5)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная.

Равенство (2.3) с учетом (2.4) принимает вид

$$n^2 = 1 + \alpha.$$

Выразив из формулы (2.5) величину α и подставив ее в последнее равенство, имеем

$$n^2 = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E}. \quad (2.6)$$

Из выражения (2.6) следует, что экспериментально наблюдаемые различия в значениях показателей преломления для различных веществ и длин волн определяются особенностями поляризации атомов вещества при его взаимодействии с электромагнитной волной.

Движение электронов в атоме описывается законами квантовой механики. Однако еще до ее создания Лоренц показал, что для качественного объяснения дисперсии достаточно ограничиться гипотезой о существовании внутри атомов электронов, связанных с атомными ядрами квазиупругими силами. Квазиупругие силы можно представить в виде

$$F = -kx,$$

где x – смещение электрона от положения равновесия;

k – коэффициент пропорциональности.

Если электрон вывести из положения равновесия, то под действием квазиупругой силы он будет совершать свободные незатухающие гармонические колебания с собственной частотой колебаний ω_0 ($\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, m – масса электрона).

При прохождении электромагнитной волны через вещество электрон в атоме оказывается под действием переменного электрического и магнитного полей. Сила, действующая со стороны электрического поля, значительно больше, чем сила, действующая со стороны магнитного поля, так что магнитное поле электромагнитной волны практически не влияет на движение электрона.

Напряженность E электрического поля в электромагнитной волне изменяется по закону

$$E = E_0 \cos \omega t, \quad (2.7)$$

где E_0 – амплитуда напряженности электрического поля волны;

$\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота;

ν – частота световой волны.

Поэтому, при прохождении через вещество электромагнитной волны на электрон действует сила

$$F_1 = eE = -eE_0 \cos \omega t.$$

Под действием данной силы электрон совершает вынужденные колебания. Вынужденные колебания совершают только внешние (оптические) электроны.

Для простоты рассмотрим колебания только одного оптического электрона. Для упрощения пренебрегаем затуханием колебаний электрона. Затухание происходит по двум причинам. Во-первых, при ускоренном движении электрона излуча-

ются электромагнитные волны. Во-вторых, имеет место диссипация энергии электромагнитного поля, т. е. превращение ее в другие формы (в теплоту) в результате взаимодействия и соударения с другими атомами. Пренебрегая затуханием, на основании второго закона Ньютона, имеем

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F + F_1 = -kx - eE_0 \cos \omega t.$$

Разделив на m и учитывая, что $k/m = \omega_0^2$, получим

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = -\frac{e}{m} E_0 \cos \omega t. \quad (2.8)$$

Уравнение (2.8) описывает вынужденные колебания электрона под действием переменного электрического поля световой волны. Решение этого уравнения имеет вид

$$x(t) = -\frac{e E_0 \cos \omega t}{m (\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

Из последнего равенства видно, что вынужденные колебания электронов происходят с частотой ω , равной частоте колебаний напряженности электрического поля световой волны. Величина

$$A(\omega) = \frac{e \cdot E_0}{m (\omega_0^2 - \omega^2)}$$

имеет размерность длины и представляет собой амплитуду вынужденных колебаний, которая зависит от частоты световой волны ω . Зависимость амплитуды вынужденных колебаний от ω и является причиной дисперсии:

$$x(t) = A(\omega) \cdot \cos \omega t.$$

Для одного одноэлектронного атома величина электрического дипольного момента, индуцируемого в результате вынужденных колебаний, составляет

$$p(t) = -e \cdot x(t) = -\frac{e^2 E_0 \cos \omega t}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

Тогда дипольный момент, индуцируемый в единице объема вещества, содержащего N таких атомов, будет равен

$$P(t) = N \cdot p(t) = -\frac{N \cdot e^2 E_0 \cos \omega t}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) представляет собой поляризованность вещества P . Подставляя выражения (2.9) и (2.7) в (2.6), получаем

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2)}. \quad (2.10)$$

Из формулы (2.10) видно, что показатель преломления n зависит от частоты световой волны ω . Согласно выражению (2.10), при частотах электромагнитной волны $\omega \gg \omega_0$ (далеких от резонанса), $n^2 \approx 1$. Зависимость n^2 от ω , соответствующая уравнению (2.10), показана на рис. 2.2, *a*. При стремлении ω к ω_0 слева имеем, что $n^2 \rightarrow \infty$, а при $\omega \rightarrow \omega_0$ справа $n^2 \rightarrow -\infty$.

Таким образом, n^2 как функция ω , терпит разрыв при частоте, равной собственной частоте колебаний электрона в атоме.

Подобное поведение функции (2.10) обусловлено тем, что в уравнении (2.8) мы пренебрегаем членом, учитывающим затухание колебаний электрона. В результате при совпадении ω и ω_0 (т. е. резонансе) амплитуда колебаний возрастает безгра-

нично (рис. 2.2, *a*). При учете затухания колебаний электрона амплитуда его вынужденных колебаний при резонансе возрастает до конечного значения, а зависимость n^2 от ω в области частот, близких к резонансной, становится более плавной и разрыв вообще отсутствует (рис. 2.2, *б*).

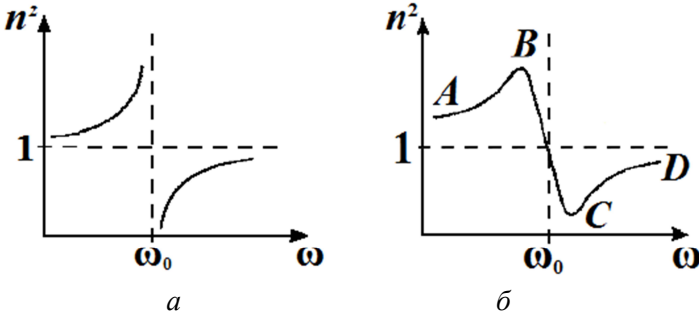


Рис. 2.2. Поведение функции, описывающей зависимость показателя преломления от частоты электромагнитной волны, проходящей через среду:
a – без учета затухания колебаний электронов;
б – с учетом затухания колебаний электронов

Учитывая, что $\omega = 2\pi c/\lambda$ и

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{dn}{d\omega} \cdot \frac{d\omega}{d\lambda} = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \frac{dn}{d\omega},$$

находим, что на участках *AB* и *CD* (рис. 2.2, *б*), где $\frac{dn}{d\lambda} < 0$, имеет место нормальная дисперсия, а участок *BC*, где $\frac{dn}{d\lambda} > 0$, относится к области аномальной дисперсии.

При совпадении ω и ω_0 (т. е. резонансе) резко возрастает амплитуда колебаний электрона. Интенсивно колеблющийся электрон вызывает усиление колебания атома, что приводит

к нагреванию вещества. Это является дополнительной причиной затухания колебаний электрона.

Таким образом, в области резонанса имеет место явление сильного поглощения, т. е. переход энергии световой волны во внутреннюю энергию вещества.

2.3. Ход луча в призме

Рассмотрим ход монохроматического луча сквозь трехгранную призму, когда падающий луч лежит в плоскости, перпендикулярной к граням призмы. Двухгранный угол, заключенный между двумя боковыми гранями призмы, на которых луч преломляется, называется **преломляющим углом**, а ребро этого угла – **преломляющим ребром** призмы.

Если показатель преломления среды n_1 , окружающей призму (рис. 2.3), меньше показателя преломления стекла n_2 , из которого изготовлена призма, то, согласно закону преломления света $\sin i / \sin r = n_2 / n_1$, на первой грани AB при входе света в призму отношение $n_2 / n_1 > 1$, поэтому $\sin i / \sin r > 1$ и угол падения $i > r$. На второй грани BC , через которую луч света выходит из призмы, $n_1 / n_2 < 1$, следовательно, $i < r$, а это значит, что луч света при выходе из призмы будет отклоняться к основанию призмы (рис. 2.3).

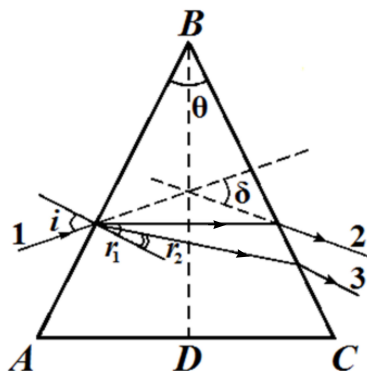


Рис. 2.3. Ход лучей в призме

От положения призмы относительно направления падающего луча зависит, какой ее угол оказывается преломляющим. Так, для луча 2 на рис. 2.3 преломляющим будет угол θ .

Угол между продолжениями падающего и выходящего лучей δ называется **углом отклонения луча призмой** (рис. 2.3). Можно доказать, что его величина зависит при заданном угле падения луча на первую грань AB от величины преломляющего угла призмы θ и от показателя преломления n материала, из которого изготовлена призма:

$$\delta = \theta(n - 1).$$

Если преломленный луч проходит внутри призмы перпендикулярно биссектрисе BD преломляющего угла θ , то угол δ будет иметь наименьшее значение (угол наименьшего отклонения). В этом случае луч проходит через призму симметрично биссектрисе преломляющего угла.

Теперь рассмотрим прохождение белого луча через призму. **Белый луч** состоит из множества монохроматических лучей, каждому из которых в **дисперсионной среде** соответствует определенная величина показателя преломления n . Так как угол отклонения лучей призмой δ зависит от показателя преломления n , а n – в свою очередь в дисперсионной среде является функцией длины волны λ , поэтому лучи разных длин волн после прохождения призмы будут отклоненными на разные углы. Вследствие этого белый свет за призмой разлагается на составляющие его монохроматические лучи (рис. 2.3), т. е. **в спектр**.

Спектры, полученные с помощью призмы, **называются призмными или дисперсионными**.

Больше других из видимых лучей преломляется фиолетовый (рис. 2.3 – луч 3), меньше – красный (рис. 2.3 – луч 2). Наблюдается нормальная дисперсия.

2.4. Спектральные приборы. Оптический диапазон электромагнитных волн

На основании результатов предыдущего параграфа можно сделать вывод, что призма является одним из спектральных приборов. **Спектральными** называются оптические приборы, в которых осуществляется разложение электромагнитного излучения оптического диапазона на монохроматические составляющие.

Такие приборы используются для качественного и количественного исследования спектрального состава света, излучаемого, поглощаемого, отражаемого или рассеиваемого веществом. Эти исследования позволяют судить о свойствах вещества, его химическом составе и характере физических процессов, связанных с излучением или взаимодействием света с веществом. Спектральные приборы применяются также для получения излучения заданного спектрального состава.

Электромагнитные волны видимого спектрального диапазона вызывают у человека зрительные ощущения, которые воспринимаются в виде различных цветовых окрасок.

В табл. 2.1 представлены воспринимаемые зрением основные цветовые окраски и соответствующие им длины волн.

Таблица 2.1

Цвет окраски	Интервал длин волн, нм (1 нм = $1 \cdot 10^{-9}$ м)
красный	620–780
оранжевый	600–620
желтый	570–600
зеленый	500–570
сине-зеленый (голубой)	450–500
синий	430–450
фиолетовый	380–430

Распространение света часто удобно рассматривать в рамках геометрической (лучевой) оптики. Световой луч определяется направлением, вдоль которого распространяется энергия электромагнитной волны. Связку световых лучей близкого направления, выходящих, например, из одного источника, называют **световым пучком**. *Монохроматический* световой пучок содержит электромагнитные волны определенной длины. Пучок, несущий в себе волны разных длин, называют *полихроматическим*, значения этих длин (или частот) образуют спектр светового пучка.

Полихроматический пучок, содержащий волны всего видимого спектрального диапазона, зрением воспринимается как имеющий белую окраску.

2.5. Дисперсионные и дифракционные спектры

В выражениях (2.3) и (2.4) было показано, что с помощью стеклянной призмы можно белый свет разложить в дисперсионный спектр. Разложение света в призме происходит по значениям показателя преломления. В данном случае для определения длины волны с помощью призмы нужно знать зависимость показателя преломления от длины волны ($n = f(\lambda)$).

Еще одним спектральным прибором, действующим на совершенно ином физическом принципе, является **дифракционная решетка**, представляющая собой периодическую систему одинаковых, расположенных на одном и том же расстоянии друг от друга щелей. Белый свет, проходящий сквозь дифракционную решетку, в результате интерференции вторичных световых волн, возникающих на краях щелей, разлагается в спектр по длинам волн. Определить длины волн с помощью дифракционной решетки можно по дифракционным углам, значения которых также могут быть измерены при помощи гониометра.

Как и в случае дисперсии, дифракционные спектры представляют собой набор узких линий определенного цвета. Од-

нако, главное отличие дифракционного спектра от дисперсионного заключается в том, что первый образуется в результате разложения белого света по длинам волн, а второй – по показателю преломления.

Также между рассматриваемыми спектрами наблюдаются различия с точки зрения отклонения красных и фиолетовых лучей, а также степени растяжения спектра относительно красных и фиолетовых лучей. *Самые отклоняющиеся лучи в дифракционном спектре – длинноволновые красные, а самые отклоняющиеся лучи в дисперсионном спектре – коротковолновые фиолетовые.*

В дифракционной решетке синус угла отклонения пропорционален длине волны, поэтому красные лучи с наибольшей длиной волны отклоняются на самый большой угол.

Призма же разлагает свет по значениям показателя преломления. Для всех прозрачных тел при нормальной дисперсии показатель преломления уменьшается при увеличении длины волны. Поэтому красные лучи отклоняются меньше, чем фиолетовые.

Промежутки между одними и теми же спектральными линиями в дифракционном спектре больше в области длинных волн (красно-желтые оттенки), а в дисперсионном – в области коротких волн (сине-фиолетовые оттенки).

2.6. Вывод рабочей формулы

Найдем соотношение между показателем преломления призмы n , преломляющим углом θ и углом наименьшего отклонения δ . Пусть на рис. 2.4 i – угол падения, r – угол преломления луча на гранях AB и AC ; MN и $M'N'$ – нормали к этим граням в точках падения и выхода луча; O_1 – точка пересечения продолжений падающего и выходящего лучей; EF – перпендикуляр к биссектрисе AD преломляющего угла θ .

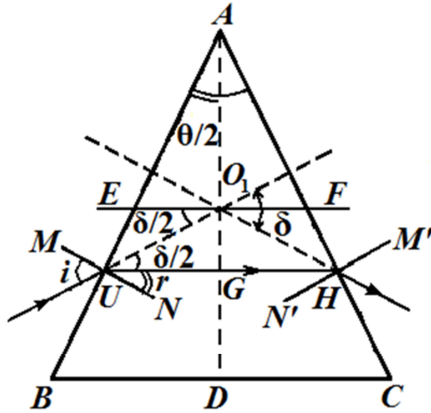


Рис. 2.4. Связь угла наименьшего отклонения луча с углом падения и преломляющим углом призмы

Очевидно, EF вследствие симметрии будет биссектрисой угла наименьшего отклонения δ . Вследствие перпендикулярности сторон ($MN \perp AB$ и $GU \perp AD$) $\angle NUG = \angle BAD$, т. е.

$$r = \frac{\theta}{2}. \quad (2.12)$$

Из рис. 2.4 видно также, что

$$i = r + \frac{\delta}{2}. \quad (2.13)$$

Подставляя в формулу (2.13) выражение (2.12), получаем

$$i = \frac{\theta + \delta}{2}. \quad (2.14)$$

Тогда

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin \frac{\theta + \delta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}}. \quad (2.15)$$

Преломляющий угол призмы задается для каждой конкретной лабораторной установки. Угол наименьшего отклонения измеряется с помощью оптического прибора для измерения углов, называемого **гониометром**.

2.7. Измерение угла наименьшего отклонения луча с помощью гониометра

Для измерения угла наименьшего отклонения светового луча используется равнобедренная стеклянная призма, которая располагается на предметном столике гониометра таким образом, чтобы световой луч от источника И, прошедший через коллиматор К, проходил через вершину призмы перпендикулярно ее основанию (рис. 2.5).

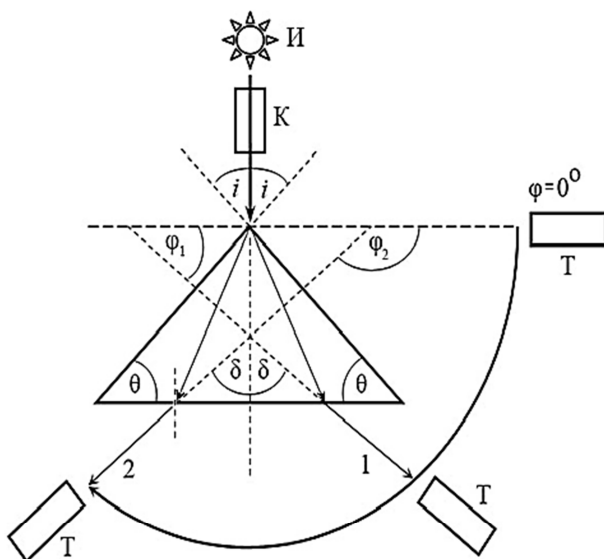


Рис. 2.5. Измерение угла наименьшего отклонения луча, проходящего через призму:

И – источник света (ртутная лампа); К – коллиматор (оптическое устройство, позволяющее получить узкий пучок параллельных световых лучей); Т – зрительная труба гониометра

В этом случае часть светового луча, прошедшего через коллиматор К, преломляется на левой грани призмы и создает луч 1, наблюдаемый через объектив трубы Т гониометра под углом φ_1 , а другая часть преломляется на правой грани призмы и наблюдается под углом φ_2 .

Из геометрии рис. 2.5 очевидно, что сумма углов отклонения лучей 1 и 2 от первоначального направления 2δ равна разности углов φ_2 и φ_1 . В случае использования прямоугольной призмы ее преломляющие углы θ равны 45° . Распространение светового луча внутри призмы при этом происходит по траектории, практически совпадающей с траекторией, соответствующей случаю угла наименьшего отклонения.

Таким образом, угол наименьшего отклонения луча δ может быть найден как

$$\delta = \frac{|\varphi_2 - \varphi_1|}{2}. \quad (2.16)$$

Используя полученное значение δ (формула (2.16)), по формуле (2.15) определяют показатель преломления n для данной спектральной линии, длина волны которой известна.

Таким же методом определяют n_i для других линий λ_i и строят график зависимости $n(\lambda)$.

2.8. Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучите строение гониометра, с помощью которого будут измерены значения углов.

Гониометр – оптический прибор, позволяющий измерять углы с точностью до $1''$. Общий вид лабораторного гониометра Г-5 показан на рис. 2.6.

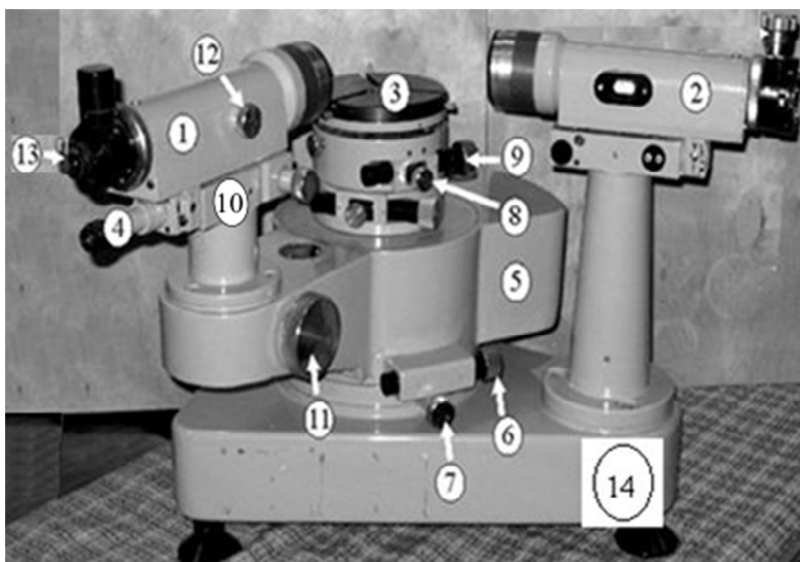
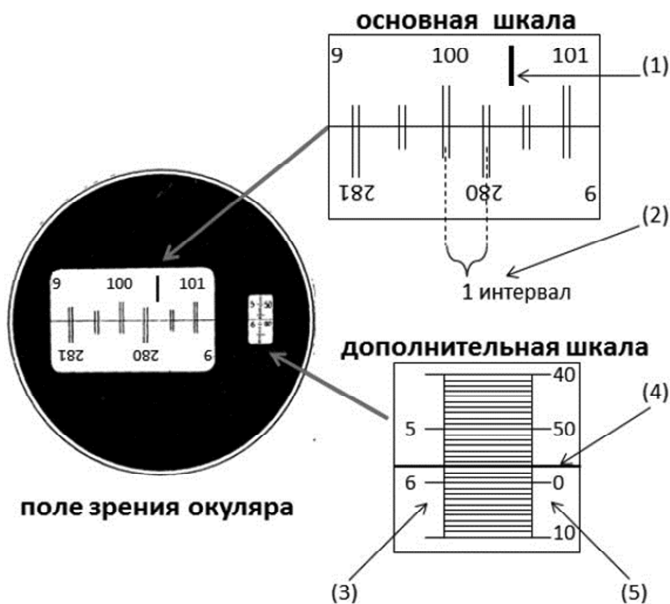


Рис. 2.6. Общий вид и элементы лабораторного гониометра Г-5:
 1 – зрительная труба; 2 – коллиматор; 3 – предметный столик; 4 – окуляр
 отсчетного устройства; 5 – подвижное основание; 6 – микрометрический винт
 для поворота подвижного основания на небольшой угол; 7 – винт-фиксатор
 гониометра, позволяющий закреплять в определенном положении
 подвижное основание; 8 – винт для закрепления предметного столика;
 9 – микрометрический винт для точного поворота предметного столика;
 10 – корпус отсчетного устройства, вмонтированного внутри корпуса;
 11 – винт для совмещения штрихов верхней и нижней частей основной шкалы
 отсчетного устройства; 12 – регулятор фокусировки зрительной трубы;
 13 – окуляр зрительной трубы; 14 – неподвижное основание

Оптическая система гониометра состоит из зрительной тру-
 бы 1, коллиматора 2 и отсчетного устройства 10 (рис. 2.7),
 вмонтированного внутри корпуса. Коллиматор служит для по-
 лучения параллельного пучка лучей и представляет собой не-
 подвижно укрепленную на массивном основании трубу, внут-
 ри которой расположена система собирающих линз. В глав-
 ном фокусе этой системы в другом конце трубы расположена
 щель коллиматора. Ширину щели можно менять с помощью
 микрометрического винта.



ТЕКУЩИЙ ОТСЧЕТ $100^{\circ} 15' 57''$

Рис. 2.7. Снятие показаний гониометра:

- 1 – вертикальный индекс; 2 – число интервалов, соответствующее числу десятков минут; 3 – шкала единиц минут; 4 – неподвижная горизонтальная линия; 5 – шкала секунд

Зрительная труба 1 служит для определения направления пучка лучей, выходящих из коллиматора. Ее оптическая система состоит из объектива и окуляра. Фокусировать проходящий через нее луч света можно вращением окуляра 13 зрительной трубы. В центре прибора находится предметный столик 3 для установки призмы. Столик представляет собой круглый диск, помещенный на вертикальной оси, вокруг которой вращается зрительная труба вместе с подвижным основанием 5. Ниже окуляра зрительной трубы 13 находится окуляр отсчетного устройства 4, расположенного внутри корпуса 10. Отсчетное устройство состоит из основной шкалы (лимба) и проецирующего устройства, передающего изображение штрихов

лимба в окуляр 4 отсчетного устройства. Лимб разделен на 1080 делений. Цена деления 20° . Оцифровка делений произведена через 1° . Поле зрения окуляра отсчетного устройства показано на рис. 2.7. Отсчетное устройство состоит из основной и дополнительной шкал. Основная шкала разделена по горизонтали на 2 части. На верхней части цифры изображены прямо, на нижней – перевернутыми. Вертикальный индекс для отсчета градусов находится на верхней части основной шкалы. Дополнительная шкала расположена отдельно, справа от основной шкалы (рис. 2.7). Она служит для определения отсчетов единиц минут и значений секунд.

Чтобы определить величину угла в градусах, минутах и секундах необходимо выполнить следующее:

- ❖ Включить подсветку шкал. Тумблер подсветки находится на неподвижной части основания 14 внизу слева.

- ❖ Посмотреть в окуляр 4 и маховиком 11 совместить верхние и нижние изображения двойных штрихов на основной шкале (рис. 2.7).

- ❖ Когда будут совмещены штрихи основной шкалы, закрепить маховиком 7 станину гониометра.

- ❖ На верхней части основной шкалы найти вертикальный индекс (1). Определить число градусов. Число градусов будет равно ближайшей видимой слева от вертикального индекса цифре.

- ❖ На нижней части основной шкалы найти перевернутое число, отличающееся от числа градусов на 180. Например, если у вас 220° , то перевернутое число будет либо 40, либо 400.

- ❖ Посчитать количество интервалов, заключенных между верхним штрихом, показывающим число градусов, и нижним штрихом, показывающим перевернутое число, отличающееся от числа градусов на 180.

- ❖ Число десятков минут равно числу интервалов, умноженному на 10. Например, 2 интервала соответствуют 20° , 5 интервалов – 50° .

❖ Найти дополнительную шкалу. На дополнительной шкале найти горизонтальную разделительную линию (4) (рис. 2.7). Число единиц минут отсчитывается в окне дополнительной шкалы по левому ряду чисел (3). Число единиц минут равно числу, стоящему слева над горизонтальной разделительной линией.

❖ Прибавить единицы минут к десяткам минут. Например, (рис. 2.7): 1 интервал – 10 минут, число над горизонтальной линией слева 5, итого $10 + 5 = 15$ минут.

❖ Определить число секунд. По той же дополнительной шкале по правому ряду чисел сверху вниз до неподвижной горизонтальной линии посчитать точно, сколько видно цифр. Это и будут ваши секунды.

2. Включите источник света (ртутную лампу). Тумблер включения находится в нижней части лампы. Установите гониометр так, чтобы источник света находился на продолжении оси коллиматора.

3. Проверьте, видны ли отчетливо в поле зрения трубы одновременно визирная линия и щель.

4. Поворачивая зрительную трубу, найдите направление, в котором видно изображение щели коллиматора.

5. В работе используется прямоугольная равнобедренная призма. Установите эту призму на столике 3 гониометра прямым углом в сторону коллиматора по его оси. Основание призмы при этом должно быть перпендикулярно оси коллиматора.

6. Невооруженным глазом найдите направление, в котором видно разложенное в спектр изображение щели коллиматора. Затем поверните зрительную трубу вправо от оси коллиматора до тех пор, пока спектр не окажется в поле зрения трубы.

7. Установите зрительную трубу таким образом, чтобы ее визирная линия совпала с серединой той линии спектра, показатель преломления для которой нужно определить. Зажимным винтом 7 зафиксируйте трубу в этом положении.

8. Включите подсветку шкал. Тумблер находится слева внизу на неподвижной части основания 14 гониометра.

9. Произведите отсчеты значений угла φ_1 для всех линий спектра, указанных в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Линии спектра	φ_1	φ_2	δ	n
$\lambda_1 = 577$ нм (желтая)				
$\lambda_2 = 546$ нм (зеленая)				
$\lambda_3 = 492$ нм (зелено-голубая)				
$\lambda_4 = 434$ нм (синяя)				

10. Полученные результаты измерений занесите в табл. 2.2.

11. Когда углы φ_1 для всех линий спектра справа будут измерены, освободите зажимной винт 7 зрительной трубы и поверните трубу влево, пока спектр не окажется в поле зрения трубы.

12. Произведите отсчеты значений угла φ_2 для всех линий спектра, указанных в табл. 2.2. Результаты измерений запишите в табл. 2.2.

13. Определите по формуле

$$\delta = \frac{|\varphi_2 - \varphi_1|}{2}$$

и запишите в табл. 2.2 значения угла наименьшего отклонения δ луча для всех линий спектра.

14. Рассчитайте по формуле значения показателя преломления для каждой спектральной линии:

$$n = \frac{\sin \frac{\theta + \delta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}},$$

где θ – преломляющий угол призмы.

15. Полученные значения n занесите в табл. 2.2.

16. Постройте график зависимости показателя преломления от длины волны света $n = f(\lambda)$. По оси OX отложите значение длины волны λ , по оси OY – значения показателя преломления n .

17. Сделайте выводы о виде наблюдаемой дисперсии.

2.9. Контрольные вопросы

1. Укажите связь между показателем преломления и скоростью света в среде.

2. Какова зависимость показателя преломления от диэлектрической и магнитной проницаемостей среды?

3. Что такое дисперсия света?

4. Дайте определение нормальной и аномальной дисперсии света?

5. В чем сущность электронной теории дисперсии света?

6. Объясните явление аномальной дисперсии света с точки зрения электронной теории.

7. Изобразите ход монохроматического и белого лучей через призму.

8. В чем состоит предназначение спектральных приборов?

9. Что представляет собой дисперсионный спектр?

10. Что представляет собой дифракционный спектр?

11. Что такое преломляющий угол призмы, угол наименьшего отклонения?

12. Объясните метод исследования нормальной дисперсии света с помощью призмы.

Список литературы

1. Сборник задач по общему курсу физики: в 3 ч. / П. Г. Ку-жир, Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук; кол. авт. Белорусского на-ционального технического университета. – 3-е изд. – Минск: БНТУ, 2014. – Ч. 3: Оптика. Ядерная физика. – 219 с.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: в 5 т. / Д. В. Сиву-хин. – 4-е изд. – Москва: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2005. – Т. 1: Механика. – 560 с.
3. Матвеев, А. Н. Курс общей физики: в 5 т. / А. Н. Мат-веев. – 3-е изд. – Москва: Оникс 21 век, 2003. – Т. 1: Механика и теория относительности. – 432 с.
4. Саржевский, А. М. Оптика. Полный курс / А. М. Саржев-ский. – 2-е изд. – Москва: Едиториал УРСС, 2004. – 608 с.
5. Трофимова, Т. И. Физика: учебник для студентов учреж-дений высшего профессионального образования, обучающихся по техническим направлениям подготовки / Т. И. Трофи-мова. – Москва: Академия, 2012. – 316 с.
6. Детлаф, А. А. Курс общей физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва: Издательский центр «Академия», 2003. – 720 с.

Учебное издание

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Пособие для студентов специальностей

1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»,
1-70 04 02 «Теплогасоснабжение, вентиляция и охрана воздушного
бассейна», 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана
водных ресурсов», 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели
и метрополитены»

В 2 частях

Часть 1

Составители:

ЕСМАН Александр Константинович
ЮРКЕВИЧ Наталья Петровна
САВЧУК Галина Казимировна и др.

Редактор *Е. О. Германович*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 08.04.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,85. Уч.-изд. л. 2,23. Тираж 100. Заказ 85.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.