

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Е.В. Журавкевич, П.Г. Кужир, В.Н. Кушнир, Е.Л. Федорова

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА В ВЕЩЕСТВЕ

Методические указания к лабораторной работе по физике

Учебное электронное издание

Минск БНТУ 2012

УДК. 530.1 (075.8)

Авторы:

Е.В. Журавкевич, П.Г. Кужир, В.Н. Кушнир, Е.Л. Федорова

Рецензенты:

В.И. Кудин, доцент кафедры «Техническая физика» БНТУ,
кандидат физ.-мат. наук

П.В. Кузовков, доцент кафедры общей физики БГУ,
кандидат физ.-мат. наук

Методические указания имеют целью ознакомить студентов с элементарными понятиями эмпирической теории и дать представление о некоторых основных понятиях квантовой теории поглощения света веществом. Описана простейшая экспериментальная методика определения характеристик поглощения света.

Издание предназначено для студентов инженерно-технических специальностей всех видов обучения.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел (017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37
Регистрационный № БНТУ/ФЭС 57 –46. 2012

Оглавление

Введение.....	4
Основной закон поглощения света (закон Бугера – Ламберта – Бэра)	4
Понятия о молекулярных спектрах поглощения.....	8
Измерение коэффициентов пропускания калориметром	9
Измерение коэффициента поглощения света в оконном стекле с помощью калориметра	9
Вопросы к зачету.....	10
<i>Л и т е р а т у р а, рекомендуемая к изучению.....</i>	<i>10</i>
<i>Список использованных источников.....</i>	<i>10</i>

Цель работы:

1. Изучить исходные понятия феноменологической теории поглощения света веществом.
2. Освоить простейшую экспериментальную методику определения характеристик поглощения света веществом.

Задача работы: измерить коэффициенты пропускания и поглощения для оконного стекла с помощью калориметра.

Указания: использовать литературу, рекомендуемую к изучению.

Приборы и принадлежности: лабораторный стенд, набор стекол.

Введение

Поглощение света, при его распространении в веществе, сопряжено с уменьшением энергии световых волн вследствие ее преобразования во внутреннюю энергию вещества, или в энергию вторичного излучения, имеющего иной спектральный состав и иные направления распространения. В результате поглощения света могут происходить: нагревание вещества, ионизация атомов или молекул, фотохимические реакции, фотолюминесценция и т.д. Поглощение света не следует смешивать с явлением уменьшения интенсивности проходящей световой волны в оптически неоднородной среде вследствие рассеяния света (оптически однородной называется среда, в которой показатель преломления является постоянным по всему объему вещества).

Современная теория поглощения света основывается на общих положениях молекулярной оптики, квантовой механики, статистической физики, физической кинетики. Результаты этой теории используются в различных областях науки и техники. В частности, они лежат в основе многих особо чувствительных методов количественного и качественного химического анализа. По виду спектра поглощения можно исследовать состав вещества, выяснить природу химических связей, зонную структуру полупроводников и многое другое.

Основной закон поглощения света (закон Бугера – Ламберта – Бэра)

Основной закон поглощения света в однородном поглощающем материале может быть получен, независимо от представлений о деталях взаимодействия света с веществом, на основе энергетических соображений.

Пусть параллельный пучок монохроматического света с частотой ν и начальной интенсивностью I_0 нормально падает на плоский слой однородного изотропного вещества толщиной l (рис. 1, а). Мысленно разделим весь слой вещества на

элементарные слои бесконечно малой толщины dx , так что изменение интенсивности световой волны $dI(x)$ за счет поглощения в тонком слое мало по сравнению с самой интенсивностью $I(x)$ (рис. 1, б).

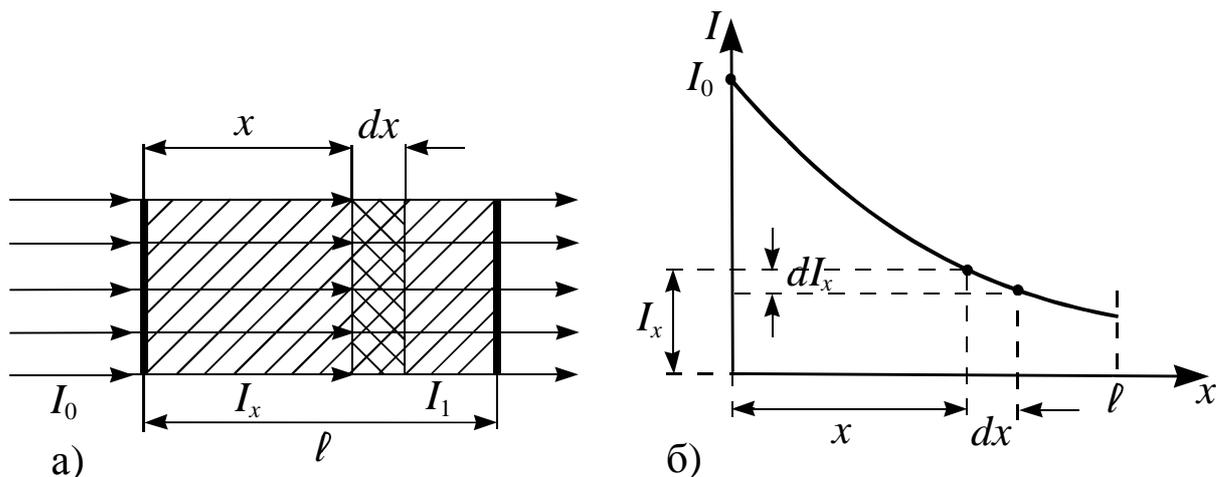


Рис. 1. Изменение интенсивности параллельного пучка света в плоском слое изотропного однородного вещества

В 1729 году французский физик Пьер Бугер установил, что относительное изменение интенсивности света $\frac{dI(x)}{I(x)}$ в каждом таком слое dx не зависит от интенсивности и пропорционально толщине этого слоя.

$$\frac{dI(x)}{I(x)} = -kdx. \quad (1)$$

Здесь $k = k_\nu$ – коэффициент пропорциональности, а знак минус соответствует уменьшению интенсивности. Для вычисления полного поглощения света в слое вещества конечной толщины l проинтегрируем левую и правую части выражения (1) в пределах I_0 , $I(l)$, и 0 , l соответственно. В результате получаем:

$$I(l) = I_0 \cdot e^{-kl}. \quad (2)$$

Формула (2) выражает **закон Бугера**. Величину k в (2) называют **коэффициентом поглощения** вещества. Коэффициент поглощения имеет размерность м^{-1} в системе СИ (см^{-1}) и равен по величине обратной толщине слоя, при которой интенсивность монохроматического света, проходящего через толщины l слой ослабляется в e раз. Данная величина характеризуется существенной и специфической для каждого вещества зависимостью от **частоты света**. **Зависимость коэффициента поглощения от частоты определяет спектр поглощения вещества** и часто имеет очень сложный вид. Отметим, что закон Бугера выполняется

для большого диапазона интенсивностей падающего света: от порога зрительного ощущения человеческого глаза (порядка 10^{-14} Вт/м²) до величины в 10^{19} раз большей. Хотя этот закон был экспериментально установлен Бугером для поглощения видимого света, им описывается поглощение потока энергии однородного излучения любого вида.

Начальная I_0 и конечная $I(l)$ интенсивности в выражении (2) должны быть измерены с учетом отражения света от границ слоя вещества. Так как величина отраженной части энергии не зависит от толщины слоя, то при достаточно толстых слоях часто бывает возможным пренебречь отражением по сравнению с поглощением излучения. (Здесь не учитывается эффект интерференции световых волн, отраженных от первой и второй границ слоя, который в зависимости от их разности фаз может приводить или к увеличению, или к уменьшению отраженной от слоя энергии).

Исследуя экспериментально поглощение света молекулами газов или молекулами вещества в практически непоглощающем растворителе Бугер установил, что коэффициент поглощения k пропорционален числу поглощающих молекул на единицу длины световой волны, т.е. пропорционален концентрации c :

$$k = \chi \cdot c, \quad (3)$$

Коэффициент пропорциональности χ не зависит от концентрации, а зависит от свойств молекул растворенного вещества. Это утверждение именуется **законом Бэра**. Закон Бэра имеет гораздо более узкие границы применимости, чем закон Бугера, так как наблюдаются многочисленные отступления от него, особенно при больших концентрациях, а кроме того, часто коэффициент поглощения зависит от природы растворителя. Для растворов, подчиняющихся закону Бэра, закон Бугера принимает вид

$$I(l) = I_0 \cdot e^{-\chi c l}. \quad (4)$$

Таким образом, имеется возможность определения концентрации поглощающего вещества с помощью измерения поглощения света в растворе. Этот прием нередко используется в лабораторной и производственной практике для быстрого измерения концентрации веществ, химический анализ которых оказывается очень сложным или требует много времени. Выражение (4) часто называют законом Бугера – Ламберта – Бэра (Ламберт в 1760 году в результате независимых исследований получил закон поглощения света).

Введем некоторые дополнительные оптические величины, которыми удобно в некоторых случаях характеризовать поглощающие свойства веществ.

Для характеристики прозрачности вещества по отношению к свету вводится коэффициент пропускания (коэффициент прозрачности)

$$\tau = \frac{I_1}{I_0}, \quad (5)$$

где I_0 и I_1 – интенсивности падающего на образец и вышедшего из него луча света, соответственно. Очевидно, величина τ может принимать значения $0 \leq \tau \leq 1$. Идеальной прозрачности вещества соответствует коэффициент пропускания $\tau = 1$, в этом случае проходящий через образец луч не меняет своей интенсивности, то есть поглощение света отсутствует; если образец не прозрачен, то интенсивность вышедшего луча $I_1 = 0$, тогда $\tau = 0$ – в этом случае имеем полное поглощение. Так же как и коэффициент поглощения, коэффициент пропускания существенно зависит от частоты (длины волны). Образец может быть прозрачным для одних длин волн (частот) и непрозрачным для других.

Количественной мерой поглощения света можно принять также величину, обратную коэффициенту пропускания τ

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{1}{\tau}. \quad (6)$$

Отношение I_0/I_1 показывает, во сколько раз образец ослабляет падающий на него световой поток.

Между тем, при сильном поглощении $I_1 \ll I_0$, дробь I_0/I_1 принимает очень большие числовые значения. В этом случае удобнее использовать логарифмическую характеристику

$$D = \ln \frac{I_0}{I_1} = \ln \frac{1}{\tau}. \quad (7)$$

Величина D называется **оптической плотностью** образца. Очевидно, большему поглощению соответствует большая оптическая плотность. Из формул (6), (7) следует, что

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-D}. \quad (8)$$

Поскольку, интенсивность I_1 есть функция толщины образца, $I_1 = I(l)$, или, фактически, функция глубины x проникновения светового потока в вещество, из (2) и (8) имеем связь между оптической плотностью и показателем поглощения вещества

$$D(x) = kx. \quad (9)$$

Принимая в формуле (9) толщину слоя $x = 1$ см, получаем $k = D$, т.е. коэффициент поглощения, выраженный в см^{-1} , численно равен оптической плотности слоя поглощающего вещества толщиной 1 см.

Понятия о молекулярных спектрах поглощения

При просвечивании вещества монохроматическим светом с различными длинами волн было обнаружено, что плавное изменение коэффициента пропускания T с изменением частоты ν сменяется в очень узких окрестностях некоторых значений ν его резким падением. Это связано с тем, что коэффициент поглощения вещества k зависит от частоты света. Такая зависимость k от частоты характеризует **спектр поглощения света** в среде. Спектр поглощения обусловлен явлением резонанса при вынужденных колебаниях электронов в атомах и атомах в молекулах вещества.

Диэлектрики поглощают свет селективно, т.е. поглощение велико лишь областях частот, близких к частотам собственных колебаний электронов в атомах и атомах в молекулах. Наиболее четко **явление резонансного поглощения** света обнаруживаются у разреженных одноатомных газов (например, у паров большинства металлов), для которых характерен **линейчатый спектр поглощения** света. Дискретные частоты интенсивного поглощения света совпадают с частотами излучения квантов возбужденных атомов этих газов.

Для газов с многоатомными молекулами наблюдаются системы тесно расположенных линий, которые образуют **полосы поглощения**. Структура полос поглощения определяется составом и строением молекул. Жидкие и твердые диэлектрики имеют **сплошные спектры поглощения**, состоящие из достаточно широких полос поглощения, в пределах которых коэффициент поглощения достигает значительной величины и плавно изменяется в зависимости от частоты. Такой ход зависимости коэффициента поглощения от частоты у конденсированных сред можно объяснить сильным взаимодействием между частицами среды. При больших значениях интенсивности закон Бугера нарушается: коэффициент поглощения среды начинает зависеть от интенсивности света, уменьшаясь с ростом интенсивности. Такое поведение коэффициента поглощения невозможно объяснить в рамках классической теории поглощения света, но оно легко объясняется в квантовой теории взаимодействия света с веществом. При поглощении света часть молекул вещества переходит в возбужденное состояние. Возбужденные молекулы не могут участвовать в дальнейшем поглощении света до тех пор, пока они не вернуться в невозбужденное состояние. Доля возбужденных молекул в веществе тем больше, чем больше интенсивность света и чем больше время жизни молекул в возбужденном состоянии. Если доля молекул в возбужденном состоянии незначительна, то поглощение света подчиняется закону Бугера. В противном случае коэффициент поглощения k уменьшается с ростом интенсивности света. Оказывается, что можно осуществить такое состояние среды, при котором доля возбужденных молекул будет столь велика, что коэффициент поглощения среды станет отрицательным. Это явление используется в лазерах.

Измерение коэффициентов пропускания калориметром

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

$$\tau = \frac{\Phi_{\text{пр}}}{\Phi}; \quad \tau = \frac{\Phi_{\text{пр}}}{\Phi} \cdot 100\% . \quad (10)$$

Определение коэффициента пропускания с помощью калориметра рассмотрим на примере определения коэффициента пропускания оконного стекла. Когда световой поток, пропущенный через светофильтр, 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 плоский образец оконного стекла таким образом, чтобы его поверхность была перпендикулярна световому пучку. Полученный отсчет по шкале коэффициентов пропускания калориметра соответствует коэффициенту пропускания данного стекла в процентах.

Измерение коэффициента поглощения света в оконном стекле с помощью калориметра

При измерении коэффициента поглощения света надо учитывать, что часть света отражается на границе исследуемого вещества и вносить соответствующие поправки. В первом приближении можно исключить влияние отражения, если измерять интенсивности света I_1 и I_2 , прошедшего сквозь два слоя толщинами l_1 и l_2 соответственно.

$$I_1 = I_0 e^{-kl_1}; \quad I_2 = I_0 e^{-kl_2} \quad (11)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{-k(l_2-l_1)} \quad (12)$$

$$k = -\frac{\ln(I_2/I_1)}{l_2 - l_1} \quad (13)$$

С помощью калориметра I_2/I_1 определяется следующим образом. Когда на пути светового потока помещают стекло толщиной l_1 , изменением чувствительности приемника добиваются, чтобы отсчет по шкале коэффициентов пропускания был равен 100 %. Затем на место стекла толщиной l_1 устанавливают стекло толщиной $l_2 > l_1$. Полученный отсчет по шкале коэффициентов пропускания соответствует I_2/I_1 , выраженному в процентах.

Вопросы к зачету

1. Сформулируйте закон Бугера.
2. В чем состоит физический смысл коэффициента поглощения? От чего зависит коэффициент поглощения?
3. На каких предположениях основан закон Бугера?
4. Дать определение коэффициента пропускания, оптической плотности?
5. Что представляет собой спектр поглощения вещества?
6. Какие бывают спектры поглощения?
7. Чем обусловлен спектр поглощения вещества?
8. Как определяется коэффициент пропускания с помощью калориметра?
9. Как определить коэффициент поглощения света в стекле с помощью калориметра?

Л и т е р а т у р а, рекомендуемая к изучению

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 т. Т. 4 / И.В. Савельев – М.: Астрель, АСТ, 2003.
2. Ландсберг Г.С. Оптика./ Г.С. Ландсберг – М.: Гостехтеориздат, 1977.
3. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. / Н.И. Калитеевский - М.: Высшая школа, 1978.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. / Т.И. Трофимова М.: Высшая школа, 2003

Список использованных источников

1. Апанасевич П.А., Основы теории взаимодействия света с веществом. Минск: Наука и техника, 1977. – 495с.
2. Ашкрофт Н., Мермин Н., Физика твердого тела, т. 1, М., Мир, 1979. – 400 с.; т.2 – 424 с.
3. Блохинцев Д.И., Основы квантовой механики, М., Наука, 1976. – 664с.
4. Борисоглебский Л. А., Квантовая механика, Минск, изд-во «Университетское», 1988. – 623с.
5. Борн М., Вольф Э., Основы оптики, М., Наука, 1973. – 720 с.
6. Гайтлер В., Квантовая теория излучения, М., ИЛ, 1956. – С. 492
7. Ильинский Ю.А., Келдыш Л.В., Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом, Изд-во МГУ, 1989. – 304 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Теория поля (Серия «Теоретическая физика» т. II), М., Наука, 1973. – 504 с.