



6-7

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Иркутский государственный университет»
(ФГБОУ ВПО «ИГУ»)

Лабораторная работа № 6-7
Оценка длины световой волны с помощью
дифракционной решётки

ИГУ, 2012

Печатаются по решению научно-методического совета
Иркутского государственного университета

Студентам предлагается экспериментально по известной длине волны определить период дифракционной решётки и решить обратную задачу: оценить длины волн видимого диапазона с помощью дифракционной решётки с известным периодом.

Предназначены для студентов 1 и 2 курсов геологического факультета.

Составители: к.ф.-м.н. Сотникова Р.Т.,
к.ф.-м.н. Черных А.А.

ОЦЕНКА ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

Краткая теория

1. Развитие представлений о природе света

Большую часть информации об окружающем мире дает человеку зрение. В этом – одна из причин того, что в истории физики исследования природы света занимают одно из ведущих мест. Падающий на тело свет вызывает в нем различного рода изменения: тепловые (нагревания), химические (например, выгорание красок) и т.д. Все примеры показывают, что свет переносит энергию. Поскольку энергию могут переносить либо движущиеся тела, либо волны, то и природу света можно рассматривать с этих двух точек зрения. К началу XVIII в. существовало два противоположных подхода к объяснению природы света: корпускулярная теория Ньютона и волновая теория Гюйгенса

Согласно *корпускулярной теории*, свет представляет собой поток частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами и летящих по прямолинейным траекториям. *Волновая теория* Гюйгенса, исходя из аналогии оптических и звуковых явлений, предполагала, что световое излучение представляет собой упругие волны.

Важнейшую роль в выяснении природы света сыграло *опытное определение скорости света*. Астрономические наблюдения над спутниками Юпитера, выполненные О Рёмером еще в конце XVII в., а затем и опыты А. Физо (1849 г.) и, независимо от него, Л. Фуко (1862 г.) показали, что свет распространяется со скоростью примерно в 10^6 раз большей, чем звук. Огромная скорость распространения выделила оптические явления из всех других, известных в начале XIX в.

2. Электромагнитная природа света

До середины XIX в. вопрос о природе света оставался практически нерешенным. Ответ на него был найден английским физиком *Максвеллом* в 1865 г., из *теории* которого следовало, что свет - это *электромагнитная волна*. Через некоторое время (1887-1888 г.г.) *Г. Герц* в своих *опытах* экспериментально обнаружил и исследовал электромагнитные волны, скорость распространения которых действительно оказалась равной скорости света. Таким образом, к началу XX в. теоретические исследования и эксперименты подтвердили электромагнитную природу света.

Электромагнитные волны отличаются друг от друга частотой колебаний. Классификация электромагнитных волн по частотам называется *спектром* электромагнитных волн. Опыт показал, что далеко не все электромагнитные волны могут создавать у человека световые ощущения. Электромагнитное излучение в диапазоне частот $\nu = 4,3 \cdot 10^{14} - 7 \cdot 10^{14}$ гц лежит в области чувствительности человеческого глаза; это видимый свет. Наиболее низкие частоты этого диапазона соответствуют красному свету, наиболее высокие – фиолетовому.

Более точно скорость света начали измерять после 1960 г., когда заработал первый лазер. Использование принципиально другой идеи – независимого измерения частоты и длины электромагнитной волны – и новых технических устройств позволило существенно повысить точность измерения скорости света. В наиболее точном на сегодняшний день эксперименте получено значение скорости света (в вакууме)

$$c = (299\,792\,456,2 \pm 0,2) \text{ м/с} \approx 300\,000 \text{ км/ч}$$

Из соотношения $\lambda = c/\nu$ можно найти длину волны светового излучения. Так, длина волны красного света (в вакууме) $\lambda_{кр.} \approx 780 \text{ нм}$, а фиолетового $\lambda_{ф.} \approx 400 \text{ нм}$.

Скорость распространения электромагнитных волн зависит от среды, т.е. границы светового интервала для каждой среды различны. Следует подчеркнуть, что цвет излучения определяется частотой колебаний, которая остается неизменной при переходе излучения из одной среды в другую, в то время, как длина волны при этом изменяется.

3. Интерференция света

Принцип суперпозиции является общим свойством любого волнового движения. Так, например, в среде могут распространяться волны, исходящие от разных источников. Если в некоторой точке пространства эти волны перекрываются, а затем снова расходятся, то каждая из них распространяется независимо друг от друга. В каждой точке пространства, в которую пришли волны от разных источников, амплитуда колебаний, вызванных действием нескольких волн, в любой момент времени равна векторной сумме амплитуд каждой волны в отдельности. В этом состоит принцип суперпозиции.

В области перекрытия волн колебания накладываются друг на друга, и происходит **интерференция волн.** Интерференцией волн называется явление увеличения или уменьшения амплитуды результирующей волны при сложении двух или нескольких волн с одинаковыми частотами (периодами) колебаний (рис.1).

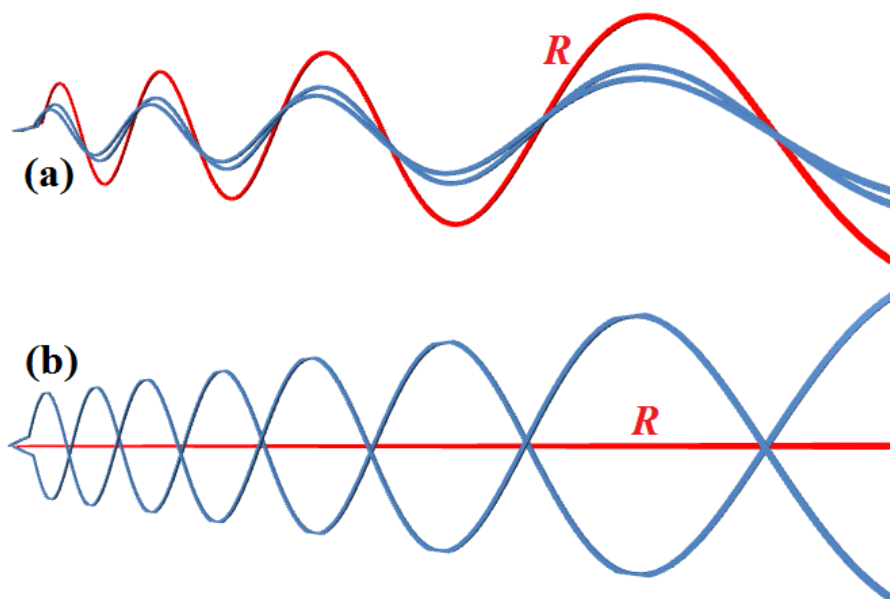


Рис. 1. Интерференционные явления. Усиление (а) и ослабление (б) волн в результате интерференции

Рассмотрим случай, когда в некоторую точку пространства пришли две волны от двух источников, и пусть эти источники находятся от нашей точки на разном расстоянии: l_1 и l_2 . Разность расстояний источников от точки обозначим Δ . Величина $\Delta = l_1 - l_2$ называется *разностью хода* интерферирующих волн, а условие

$$\Delta = k\lambda, \text{ где } k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

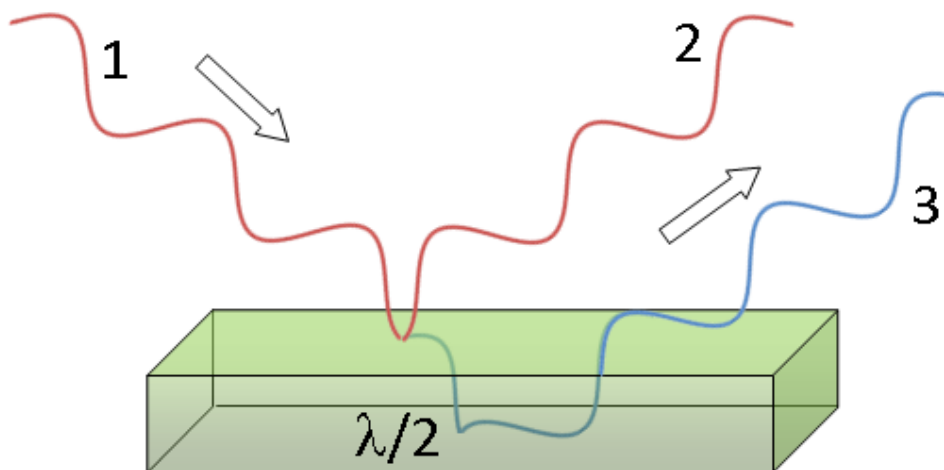


Рис. 2. Ослабление отраженного луча 2 в результате интерференции с преломленным лучом 3.

называется условием *интерференционного максимума*. Интерференционный максимум получается в тех точках, для которых разность хода равна 0 или целому числу длин волн. В этом случае волны приходят с одинаковой фазой колебаний и, в итоге – усиливают друг друга.

Если волны приходят в противофазе, с разностью хода

$$\Delta = (2k+1)\lambda/2, \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots$$

то наблюдается *интерференционный минимум*, т.е. волны гасят друг друга. Интерференционный минимум получается в тех точках, для которых разность хода равна нечетному числу полуволн.

Интерференция – одно из наиболее убедительных доказательств волновых свойств. Значит, если можно осуществить интерференцию света, то тем самым можно доказать, что свет обладает волновыми свойствами. Для осуществления интерференции света применяются различные методы: опыт Юнга, зеркала и бипризма Френеля и др. Все они позволяют наблюдать интерференционную картину и тем самым убедиться в волновом характере световых явлений. В природе часто можно наблюдать радужное окрашивание тонких пленок (масляные пленки на воде, мыльные пузыри), возникающие в результате интерференции света, отраженного двумя поверхностями пленки (рис.2).

4. Дифракция света

Дифракцией называется огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути.

Явление дифракции характерно для волновых процессов. Поэтому, если свет является волновым процессом, то для него должна наблюдаться дифракция,

т.е. световая волна, падающая на границу какого-либо непрозрачного тела, должна огибать его и проникать в область геометрической тени (рис.3).

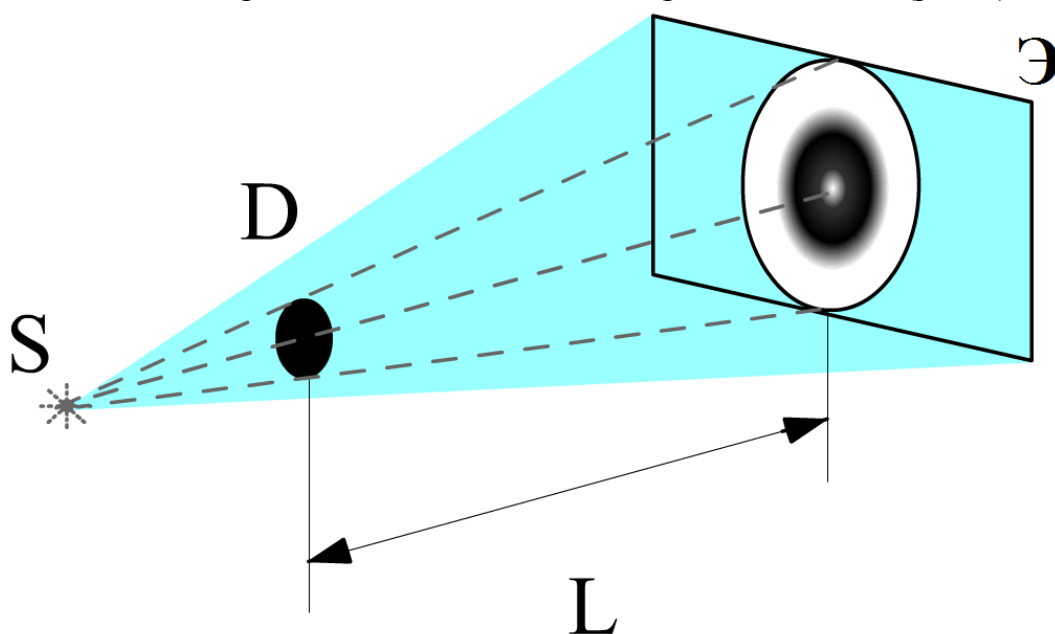


Рис. 3. Дифракция света на круглом непрозрачном диске

Для наблюдения дифракции световых волн необходимо создание специальных условий, так как явление дифракции зависит от соотношения размеров препятствия и длины волны. Если длина волны *сравнима* с размерами препятствия, дифракция выражена сильно. Длина световой волны мала, и поэтому для наблюдения дифракции света используется специальное дифракционное устройство – **дифракционная решетка**. Дифракционной решеткой называется система параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками. Решетка характеризуется *периодом* или *постоянной решетки* d . Эта величина равна расстоянию от начала одной из щелей до начала следующей. Дифракционные решетки бывают двух типов. Решетка первого типа – это прозрачная пластинка, например стеклянная, на которую алмазом наносятся параллельные царапины, рассеивающие падающий на них свет. Промежутки между царапинами свободно пропускают свет и служат щелями, пройдя сквозь которые световые лучи дают интерференционную картину на экране. Решетки второго типа – это металлические зеркала, на поверхности которых также наносятся параллельные царапины. Свет, отраженный от промежутков между царапинами, дает интерференционную картину. Такие решетки называются отражательными. Современная техника позволяет изготовить решетки, которые имеют более 6000 штрихов на один миллиметр поверхности. При этом общая длина решетки составляет 100 – 150 мм.

Пусть на решетку падает параллельный пучок света перпендикулярно ее поверхности. Большая часть света пройдет прямо вперед, и с помощью собирающей линзы все эти лучи можно собрать в одну центральную яркую полосу на экране (максимум нулевого порядка). Эта полоса является суммарным изображением всех щелей. Но непрозрачные промежутки между щелями решетки служат препятствием для света. При взаимодействии с ними часть световых волн

будет испытывать дифракцию на краях щелей, т.е. отклоняться от своего первоначального направления и «поворачивать» за щель на некоторый угол. При этом волны разного цвета отклоняются на разные углы.

Рассмотрим монохроматический свет какого-то одного определенного цвета, например красного. Пусть для него угол «поворота» за щель равен φ . Например, на рис. 4 – это направление волн H_1 , которые распространяются под углом φ к первоначальному направлению H . Соответственно, угол между первоначальным фронтом волны (AB) и «повернутым» (AF) тоже равен φ . Как видно из рисунка, все волны, которые выходят из точек B, C, D , должны отставать от волны, вышедшей из точки A . Пусть угол φ выбран так, что в разности хода двух лучей от соседних щелей

укладывается одна длина волны, т.е. расстояние

$$BL = \lambda, CN - BL = DM - CN = \lambda \text{ и т.д. Из чертежа видно, что}$$

$$BL = AB \cdot \sin \varphi.$$

Но BL является разностью хода Δ , а AB – это расстояние от начала одной из щелей до начала следующей, т.е. это постоянная решетки d . Соответственно запишем

$$\Delta = d \sin \varphi.$$

Дифракционная картина на решетке определяется результатом взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей. Интерференционные максимумы в этом случае наблюдаются, если в разности хода интерферирующих волн укладывается целое число длин волн. Таким образом, полное условие максимумов дифракционной картины запишется, как

$$d \sin \varphi = k\lambda, \text{ где } k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Здесь k – порядковый номер максимума. По направлениям, удовлетворяющим уравнению (1), на экране будут наблюдаться яркие линии исходного цвета. В нашем примере, это – красные. Так, для $d \sin \varphi = \lambda$, будет находиться максимум первого порядка ($k = 1$), для $k = 2$ – максимум второго порядка и т.д. Выражение (1) называется **формулой дифракционной решетки**.

На экране все максимумы будут располагаться симметрично относительно нулевого, т.е. слева и справа от него. Ближайшие два – это максимумы первого порядка, следующие два – это максимумы второго порядка и т.д.

Дифракционные минимумы будут наблюдаться в тех направлениях, которым соответствует разность хода $\lambda/2, 3\lambda/2, \dots$. В этом случае волны будут гасить друг друга, и на экране будут видны темные полосы. Полное условие минимумов дифракционной картины запишется, как

$$d \sin \varphi = (2k+1)\lambda/2, \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

При освещении решетки немонохроматическим, например, белым светом, (включающим в себя все цвета от красного до фиолетового), только максимум нулевого порядка имеет белый цвет, так как из условия (1) следует, что при $k = 0$, угол $\varphi = 0$ для всех длин волн. Длина волны синего цвета меньше длины волны красного цвета, поэтому, в соответствии с формулой (1) $\sin \varphi = k\lambda/d$ получается, что дифракционный угол φ для синего цвета меньше, чем для красного. В этом

случае на экране получается ряд широких полос, окрашенных всеми цветами радуги и симметрично расположенных по обе стороны от центральной белой полосы. Каждая из них называется дифракционным спектром, в котором синие линии расположены ближе к центру, чем красные.

Дифракционная решетка разлагает некогерентный свет в дифракционный спектр и используется, как спектральный прибор. Ее можно использовать для измерения длины волны.

Практическая часть

1. Описание установки

Прибор для определения световой волны состоит из деревянного бруска (1) прямоугольного сечения, на верхней стороне которого нанесена шкала с миллиметровыми делениями. К одному концу бруска прикреплена рамка (2), в которую вставляется дифракционная решетка (3). На бруске находится ползунок (4), который можно передвигать по всей длине бруска. К ползунку прикреплена черная экран-линейка с делениями. Вдоль нулевого деления сделана прорезь-щель (5). Источником света служит осветитель-лампочка (6).

2. Методика определения длины волны на данной установке

На демонстрационном столе установите осветитель и включите его в сеть. Дифракционную решетку поместите в рамку. Деревянный брусок надо повернуть свободным концом к осветителю так, чтобы свет от лампочки проходил через щель и попадал на дифракционную решетку. Рассматривая щель через дифракционную решетку (приблизив глаз к решетке), добейтесь изменением взаимного положения экрана, линейки и лампы, наилучших условий видимости спектра. Вы должны увидеть симметрично расположенные по обе стороны от прорези-щели разноцветные полосы – дифракционные спектры. Возникновение этих спектров объясняется явлением дифракции на щели. При таком способе наблюдения спектра роль линзы, собирающей в одну точку пучок световых лучей, идущих под углом φ от дифракционной решетки, выполняет хрусталик глаза, а роль экрана, на котором получается спектр – его сетчатка. А поскольку, сквозь решетку вы одновременно видите и экран-линейку, то дифракционные максимумы кажутся спроектированными на ее шкалу и будут видны симметрично по обе стороны от щели.

В соответствии с формулой (1) $\sin \varphi = k\lambda/d$. Здесь φ – угол отклонения света от первоначального направления («поворота» за угол). На рис. 5 изображена схема установки этой лабораторной работы, где S – источник света, SD – направление света, падающего на решетку D , а угол φ – угол отклонения («поворота» за угол). Из рисунка видно, что $\operatorname{tg} \varphi = OM/OD$. Вследствие малости угла φ его тангенс можно приравнять синусу, т.е. $\operatorname{tg} \varphi = \sin \varphi$. Расстояние OM является расстоянием до первого дифракционного максимума, обозначим его через l . Расстояние OD – это расстояние от щели O до дифракционной решетки D , обозначим его через L . Оба эти расстояния можно измерить по миллиметровым делениям обеих шкал.

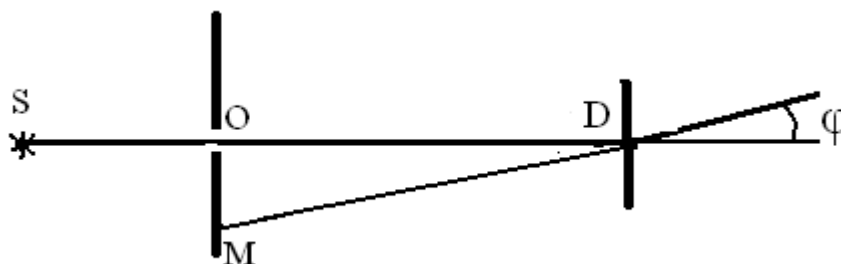


Рис.5. Общая схема эксперимента

Получим рабочую формулу. Из формулы (1) выразим длину волны, как $\lambda = d \cdot \sin \varphi / k$. Заменяем $\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi = OM/OD = l/L$ и в итоге получим:

$$\lambda = d l / kL. \quad (3)$$

2. Порядок выполнения работы

Вся работа состоит из шести опытов. Передвигая ползунок (4) вдоль бруска, выберитерасстояние L_1 между щелью и дифракционной решеткой таким, чтобы вы могли увидеть по два дифракционных спектра симметрично в обе стороны от щели. По миллиметровой шкале экран-линейки измерьте расстояние l_{KP} до красной линии в первом спектре ($k = 1$) и запишите значение в третий столбец таблицы. Затем измерьте расстояние до красной линии во втором спектре ($k = 2$) и запишите значение в третий столбец таблицы, строкой ниже. Такие же измерения выполните для зеленой линии и синей. Соответственно занесите их в таблицу, в пятый и седьмой столбцы, для $k = 1$ и $k = 2$.

Измените положение линейки со щелью, т.е. передвиньте её на другое расстояние L_2 так, чтобы вы могли видеть как минимум по два дифракционных спектра симметрично в обе стороны от щели, но расстояние их от щели будет другим. Повторите все измерения, как в предыдущем случае и занесите их в таблицу.

Еще раз измените положение ползунка на другое L_3 и повторите все измерения.

L , мм	k	l_{KP} , мм	d	$l_{ЗЕЛ}$, мм	$\lambda_{ЗЕЛ}$	$l_{СИН}$, мм	$\lambda_{СИН}$
$L_1 =$	1						
	2						
$L_2 =$	1						
	2						
$L_3 =$	1						
	2						
			$d_{CP} =$		$\lambda_{ЗЕЛ, CP}$		$\lambda_{СИН, CP}$

3. Оформление результатов

Задание 1. Определите постоянную d дифракционной решетки, которая используется в данной работе. Считайте, что длина волны красных лучей вам известна; она равна $\lambda_{KP} = 610$ нм. Переведите ее значение в миллиметры и запишите под таблицей слева. Из формулы (3) выразите d и запишите, как

рабочую формулу ниже таблицы. Результаты покажите преподавателю! По этой формуле рассчитайте d для каждого из шести опытов. Расчеты представьте в отчете и запишите в таблицу. Из результатов найдите среднее значение постоянной d_{CP} и запишите его в таблицу. Результаты покажите преподавателю!

Задание 2. Определите длину волны зеленых лучей. Расчеты выполните по формуле (3). Все данные возьмите из таблицы, а значение постоянной d_{CP} – из предыдущего задания. Из шести результатов найдите среднее значение $\lambda_{ЗЕЛ, CP}$ и запишите его в таблицу.

Задание 3. Определите длину волны синих лучей. Все расчеты выполните, как в предыдущем задании и оформите их в таблицу.

Контрольные вопросы

- 1) Что представляет собой свет с точки зрения корпускулярной и волновой теорий? Какую роль в выяснении природы света сыграло опытное определение скорости света?
- 2) Какова роль Максвелла и Герца в выяснении природы света?
- 3) Чему равна скорость света?
- 4) Как вы понимаете слово «спектр»?
- 5) В каком диапазоне длин волн находится область видимого света?
- 6) Сформулируйте принцип суперпозиции волн.
- 7) В чем заключается явление интерференции волн?
- 8) Как вы понимаете разность хода волн?
- 9) Запишите условие интерференционного максимума и минимума.
- 10) Приведите примеры, доказывающие явление интерференции для света.
- 11) В чем заключается явление дифракции? Какие свойства света оно подтверждает?
- 12) Какое устройство позволяет наблюдать дифракцию света?
- 13) Что называется периодом дифракционной решетки?
- 14) Какие типы решеток вы знаете?
- 15) Запишите формулу дифракционной решетки. Выведите ее.
- 16) Почему дифракционный максимум нулевого порядка остается белым?
- 17) Объясните порядок следования цветов в дифракционном спектре.

