

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДВУМЕРНОЙ СТРУКТУРЕ

Руководство к лабораторной работе по физике
для студентов всех специальностей

2019

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Томский государственный
университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. каф физики

_____ Е.М.Окс
17 января 2019 г.

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДВУМЕРНОЙ СТРУКТУРЕ

Руководство к лабораторной работе по физике
для студентов всех специальностей

Разработчики:
Доцент каф. физики
_____ Л.В. Орловская

Ст. преподаватель каф. физики
_____ А.В. Орловская
17 января 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является изучение дифракции параллельного пучка света на двумерной структуре и определение размеров ячейки сетки дифракционным методом.

1 КРАТКАЯ ТЕОРИЯ ДИФРАКЦИИ

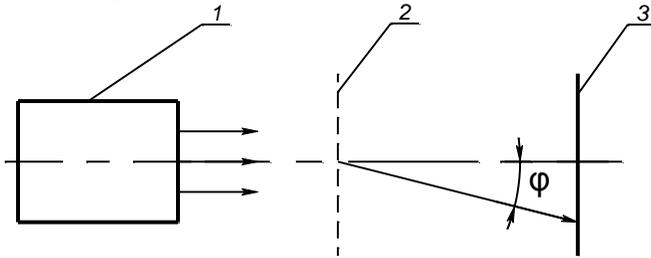
Известно, что свет в однородной среде распространяется прямолинейно и поэтому непрозрачное тело, находящееся на пути распространения света, обычно даёт геометрическую тень. Однако, если размеры преграды соизмеримы с длиной световой волны, то свет обходит эту преграду. Отклонение световых лучей от прямолинейного направления распространения называется дифракцией света. Дифракция света обусловлена интерференцией волн и объясняется волновой теорией Гюйгенса – Френеля.

Рассмотрим два частных случая дифракции – дифракцию от одномерной и двумерной решёток.

1.1 Дифракция на прозрачной одномерной решётке

Дифракционной решёткой называется периодическая структура, состоящая из элементов, соизмеримых (в пределах нескольких порядков) с длиной волны. Прозрачные дифракционные решётки представляют собой стеклянные пластинки, на которых с помощью алмазного резца нанесены одинаковые равноотстоящие друг от друга штрихи. Штрихи прозрачного промежутка (a) и непрозрачного штриха (b) в сумме дают величину $d = a + b$, называемую постоянной решётки (или её периодом).

Схема наблюдения дифракции на прозрачной решётке представлена на рис. 1.1.



1 – источник света, 2 – дифракционная решётка,
3 – экран,
 φ – угол отклонения (дифракции).

Рисунок 1.1 – Схема наблюдения дифракции на прозрачной решётке

На дифракционную решётку 2 перпендикулярно её плоскости падает пучок параллельных когерентных лучей от источника 1. Если в качестве источника используется лазер, то в силу направленности и пространственной когерентности его излучения можно обойтись без предварительной коллимации пучка. На экране 3 получим дифракционное изображение источника 1 (или щели, если между 1 и 2 расположена щель).

Каждая щель решётки даёт свою дифракционную картину, но дифракция на решётке не представляет собой простого наложения этих картин. Явление усложняется многолучевой интерференцией пучков, приходящих в данную точку экрана от всех щелей.

Пусть на дифракционную решётку падает пучок параллельных монохроматических световых лучей (рис.1.2). Рассмотрим два луча S_1A и S_2B , которые проходят

симметрично через смежные щели. Согласно принципу Гюйгенса, точки А и В можно рассматривать как новые центры световых волн, распространяющихся во всех направлениях, поэтому их лучи можно наблюдать, в частности, под некоторым углом φ к падающему лучу. Проведём перпендикуляр АС к выбранному направлению лучей. Тогда отрезок ВС будет оптической разностью хода рассматриваемых лучей. Из треугольника АВС находим (см. рис. 1.2)

$$\Delta = BC = AB \cdot \sin \varphi = d \cdot \sin \varphi . \quad (1.1)$$

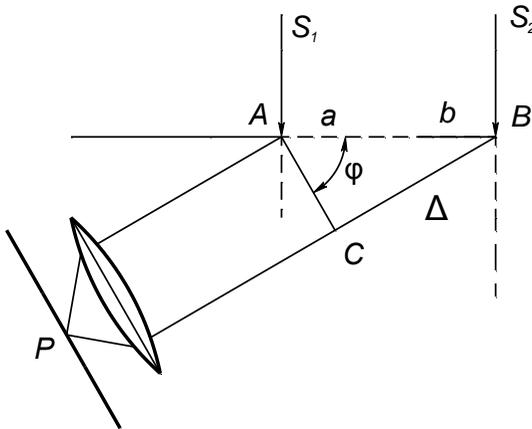


Рисунок 1.2 – К расчёту оптической разности хода

Если оптическая разность хода Δ равна чётному числу полуволн, то в точке Р будет дифракционный максимум. Условие:

$$d \cdot \sin \varphi = \pm k \lambda \quad (1.2)$$

определяет главные максимумы дифракционной картины. Следовательно, главные максимумы наблюдаются при значениях угла φ , удовлетворяющих условию:

$$\sin \varphi = \pm k\lambda/d, \quad (1.3)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$.

Целое число k называется порядком дифракционного максимума (в случае монохроматического источника).

В центре дифракционной картины наблюдается нулевой дифракционный максимум ($k = 0$). По обе стороны центрального максимума расположены максимумы первого, второго и т.д. порядков.

Формула (1.3) позволяет определить длину волны, если известна постоянная решётки и порядок максимума k .

1.2 Дифракция на двумерных структурах

Рассмотрим двумерную решётку, представляющую собой скрещенные перпендикулярные решётки с периодами d_1 и d_2 . Узкий пучок монохроматического света, пройдя через первую решётку с вертикальными штрихами, должен дать совокупность максимумов (нулевой и максимумы высших порядков) вдоль горизонтальной линии.

Световой пучок, соответствующий каждому максимуму, проходя через вторую решётку, распадается на новую совокупность световых пучков, дающих максимумы вдоль вертикальной линии.

Положение главных максимумов, даваемых первой решёткой (с вертикальными штрихами), определяются условием:

$$d_1 \sin \varphi_{x_{mi}} = \pm m\lambda, \quad (1.4)$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Решётка с горизонтальными штрихами даёт главные максимумы в направлениях, определяемых условием:

$$d_2 \sin \varphi_{y_{mi}} = \pm i \lambda, \quad (1.5)$$

где $i = 0, 1, 2, 3, \dots$.

В итоге дифракционная картина будет иметь вид правильно расположенных пятен, каждому из которых соответствуют два целочисленных индекса m, i (рис. 1.3). Цифры 0,0; 0,1; 1,2 и т.д. показывают порядок спектра в первой и второй решётках. Главные максимумы будут очень резкие, и в них сосредоточится почти вся световая энергия дифрагированных волн.

Такая же дифракционная картина получится, если вместо двух отдельных решёток взять одну прозрачную решётку с нанесёнными на неё двумя системами взаимно перпендикулярных штрихов.

Измерив углы φ_x и φ_y , определяющие положения максимумов, и зная длину волны λ , можно по формулам (1.4) и (1.5) определить структурные параметры d_1 и d_2 .

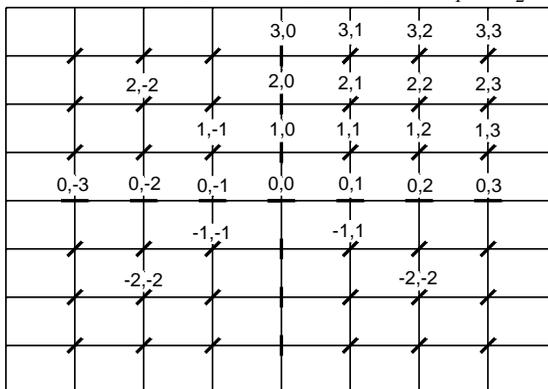
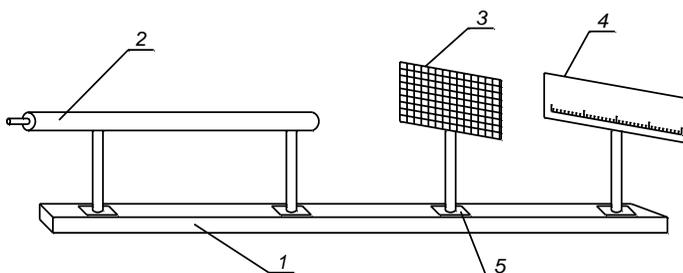


Рисунок 1.3 – Дифракционная картина от двумерной решётки

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки изображена на рисунке 2.1. Все детали установки расположены на оптической скамье 1. Газовый лазер 2 неподвижно закреплён на скамье 1 и отъюстирован относительно оптической оси установки. Установка включает, кроме того, прозрачную дифракционную решётку или металлическую сетку (двумерную прозрачную решётку) 3 и экран 4 с миллиметровой шкалой для наблюдения дифракционных картин.



1 – оптическая скамья, 2 – лазер, 3 – решётка,
4 – экран с миллиметровой шкалой, 5 – рейтер.

Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки

3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1 Задание 1

Измерить длину волны лазерного излучения с помощью одномерной дифракционной решётки.

3.1.1 Включить лазер. Для этого производится включение тумблера СЕТЬ на панели блока питания.

3.1.2 На расстоянии приблизительно одного метра от выходного окна лазера поместить дифракционную решётку, поставив её плоскость перпендикулярно к оси светового пучка, выходящего из лазера. Для этого путём более точной установки решётки привести световой блик, отражённый назад к лазеру от плоскости решётки, точно на середину выходного окна лазера, т.е. добиться совпадения выходящего из лазера пучка с его отражением от плоскости решётки.

3.1.3 Установить экран перпендикулярно пучку света, порядки спектров должны располагаться симметрично относительно нуля шкалы экрана.

3.1.4 Измерить расстояние x_k между левым и правым дифракционными максимумами k порядка (не менее четырёх измерений). Под расстоянием между дифракционными максимумами следует понимать расстояние между серединами наблюдаемых спектров – полосок.

3.1.5 Измерить расстояние от плоскости дифракционной решётки до плоскости экрана L по шкале оптической скамьи.

3.1.6 Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1– Данные для определения длины волны лазерного излучения

m	$x_m, мм$	φ_m	$\lambda, м$	$\langle \lambda \rangle, м$	Примечание
1					L= $d = 0,01мм$
2					
3					
·					
·					

3.2 Задание 2

Определить параметры двумерной решётки.

3.2.1 Не отключая лазера, заменить в установке одномерную дифракционную решётку на оправу с натянутой металлической сеткой.

3.2.2 Измерить расстояние x_{mi} между левым и правым дифракционными максимумами m порядка (i - нумерует порядок максимума по вертикальной оси, например, x_{01} - расстояние от центрального (0,0) максимума до расположенного рядом с ним на одной с ним горизонтали (0,1) максимума; x_{11} - расстояние от (1,0) максимума до расположенного рядом с ним на одной горизонтали максимума (1,1) (см. рис. 3.3.). Провести по три измерения x_{mi} для $m=0,1,2$.

3.2.3 Аналогично измерить расстояние y_{im} между верхним нижним дифракционными максимумами i порядка (m - нумерует порядок максимума по горизонтальной оси). Провести по три измерения y_{im} для $m=0,1,2$.

3.2.4 Определить расстояние от плоскости металлической сетки до плоскости экрана L по шкале оптической скамьи.

3.2.5 Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Данные для определения параметров двумерной решётки

i	m	$x_{mi}, \text{ мм}$	φ_{mi}	$d_1, \text{ мм}$	$\langle d_1 \rangle, \text{ мм}$
0	1				
	2				
	3				
1	1				
	2				
	3				
2	1				
	2				
	3				

m	i	$y_{im}, \text{ мм}$	φ_{im}	$d_2, \text{ мм}$	$\langle d_2 \rangle, \text{ мм}$
0	1				
	2				
	3				
1	1				
	2				
	3				
2	1				
	2				
	3				

4 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

4.1 Задание 1

4.1.1 Используя данные таблицы 3.1, вычислить углы дифракции φ_m по формуле, полученной из рисунка 4.1:

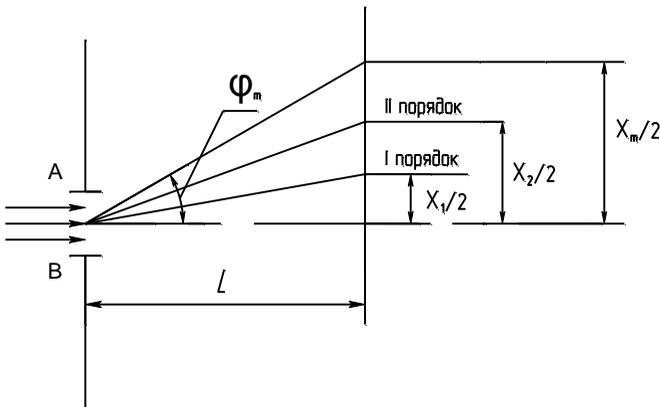
$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{x_m}{2L}, \quad (4.1)$$

где x_m - расстояние между серединами светлых полосок;

L - расстояние от решётки до экрана.

Поскольку углы дифракции малы, можно считать верным следующее равенство:

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \sin \varphi_m = \varphi_m. \quad (4.2)$$



φ_m - угол дифракции; $x_m/2$ - расстояние от максимума m

порядка до максимума нулевого порядка;

L - расстояние от решётки до экрана.

Рисунок 4.1 – К расчёту угла дифракции.

4.1.2 Рассчитать длину волны, используя формулу

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi_m}{m} = \frac{d \varphi_m}{m}, \quad (4.3)$$

где d - постоянная решётки (в нашем случае в качестве решётки используется реплика, $d = 0,01\text{мм}$).

Результаты занести в таблицу 3.1.

4.1.3 Вычислить среднее значение λ и найти погрешности измерений длины волны. Окончательный результат записать в виде:

$$\lambda = (\langle \lambda \rangle \pm \sigma(\langle \lambda \rangle))_m. \quad (4.4)$$

Под $\sigma(\langle \lambda \rangle)$ следует понимать суммарную погрешность измерения λ : систематическую и случайную.

4.2 Задание 2

4.2.1 По значениям x_{mi}, y_{im}, L (см. таблицу 3.2)

определить углы дифракции $\varphi_{x_{mi}}, \varphi_{y_{im}}$, воспользовавшись формулами

$$\begin{aligned} \varphi_{x_{mi}} &\approx \text{tg } \varphi_{x_{mi}} = x_{mi} / 2L \\ \varphi_{y_{im}} &\approx \text{tg } \varphi_{y_{im}} = y_{im} / 2L, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $\varphi_{x_{mi}}$ - угол дифракции для решётки с вертикальными штрихами;

$\varphi_{y_{im}}$ - угол дифракции для решётки с горизонтальными штрихами;

L - расстояние от решётки до экрана.

Значения углов φ_x, φ_y занести в таблицы 3.2.

4.2.2 Определить параметры двумерной решётки d_1 и d_2 , используя значения φ_{x_m} и φ_{y_m} , а также значение найденной при выполнении первого задания длины волны $\langle \lambda \rangle$.

Расчёт произвести по формулам

$$d_1 = m\lambda / \varphi_{x_{mi}}, d_2 = i\lambda / \varphi_{y_{im}}. \quad (4.6)$$

4.2.3 Вычислить среднее значение d_1 и d_2 , найти погрешности проделанных измерений. Окончательные результаты представить в виде:

$$d_1 = (\langle d_1 \rangle \pm \sigma(\langle d_1 \rangle)) \text{ мм},$$

$$d_2 = (\langle d_2 \rangle \pm \sigma(\langle d_2 \rangle)) \text{ мм}. \quad (4.7)$$

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1 В чём заключается явление дифракции света?

5.2 Как устроена дифракционная решётка? Что такое постоянная решётки?

5.3 Как изменится дифракционный спектр при увеличении числа освещаемых щелей решётки без изменения её постоянной?

5.4 Почему при уменьшении постоянной решётки возрастает расстояние между дифракционными максимумами?

5.5 Чему равно предельное число спектров, которое можно получить при помощи данной дифракционной решётки?

5.6 Назвать основные характеристики спектрального прибора. На примере дифракционной решётки написать, чему они равны.

5.7 Какой свет – красный или синий – больше отклоняется спектральным прибором (решёткой, призмой)?

5.8 Качественно изобразить распределение интенсивности монохроматического света $I(\sin \theta)$, продифрагировавшего на дифракционной решётке при нормальном его падении на неё.

5.9 Удалённый протяжённый источник испускает две тонкие спектральные линии $\lambda_1 = 500\text{нм}$ и $\lambda_2 = 500,2\text{нм}$ равной интенсивности. Свет от источника непосредственно падает на дифракционную решётку. Оценить угловой размер источника ψ , при котором можно разрешить эти линии.

6 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

6.1 Г.С. Ландсберг. Оптика. – М.: Наука, 1976, - 224 с.

6.2 И.В. Савельев. Курс общей физики. т.2. – М.: Наука, 1978, 372 с.

6.3 В.А. Мухачёв, А.Л. Магазинников. Оценка погрешностей измерений. Методические указания для студентов всех специальностей. – Томск: ТУСУР, 2009.