

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 48(2)

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКЕ

Цель работы – изучение дифракции света на одномерной дифракционной решетке, определение длины волны излучения полупроводникового лазера.

1. Теоретические основы работы

Дифракцией называется совокупность явлений, связанных с распространением света в среде с резкими оптическими неоднородностями (препятствиями), и проявляющихся в нарушении законов геометрической оптики. Так, при отражении от оптически неоднородной среды нарушается закон отражения света, а при прохождении света через узкую щель или дифракционную решетку нарушается закон прямолинейного распространения света – свет огибает препятствия и проникает в область геометрической тени.

Дифракция существенна в тех случаях, когда длина волны λ излучения соизмерима с линейными размерами b оптической неоднородности ($b \approx \lambda$). Более строго условия возникновения дифракции определяются соотношением расстояния l от оптической неоднородности до плоскости наблюдения дифракции и длины дифракции l_d .

Длиной дифракции называется расстояние от оптической неоднородности, на котором расширение (в оптике говорят – уширение) светового пучка за счет дифракции равно линейному размеру неоднородности. Длина дифракции

$$l_d = \frac{b^2}{\lambda}.$$

При условии $l \ll l_d$ дифракция себя почти не проявляет, и выполняются законы геометрической оптики. При $l \sim l_d$ имеет место **дифракция Френеля** (дифракция в сходящихся лучах), при этом наблюдаемая на экране картина является дифракционным изображением объекта, на котором происходит

дифракция. При $l \gg l_d$ имеет место **дифракция Фраунгофера** (дифракция в параллельных лучах), при этом наблюдаемая на экране картина является дифракционным изображением удаленного источника света.

В разнообразных оптических устройствах широко используются дифракционные решётки. Дифракционные решетки могут быть прозрачными и отражательными. В первом случае прозрачные участки разделены непрозрачными участками. Во втором случае отражающие узкие участки поверхности разделены не отражающими участками.

Оптическая прозрачная дифракционная решетка, используемая в лабораторной работе, представляет собой стеклянную пластинку, на которую с помощью специальной делительной машины нанесен ряд параллельных штрихов.

Типичные дифракционные решетки, которые используют в видимой части спектра ($\lambda = 390 \div 780$ нм), имеют от 50 до 1600 штрихов на один миллиметр.

Рассмотрим дифракционную решетку, состоящую из N равноотстоящих прозрачных узких полос, на которую нормально падает плоская квазимонохроматическая световая волна с длиной волны λ (рис. 1). Пусть ширина непрозрачных участков решетки равна a , ширина прозрачных участков (щелей) – b . Величина $d = a + b$ называется **периодом** или постоянной решетки.

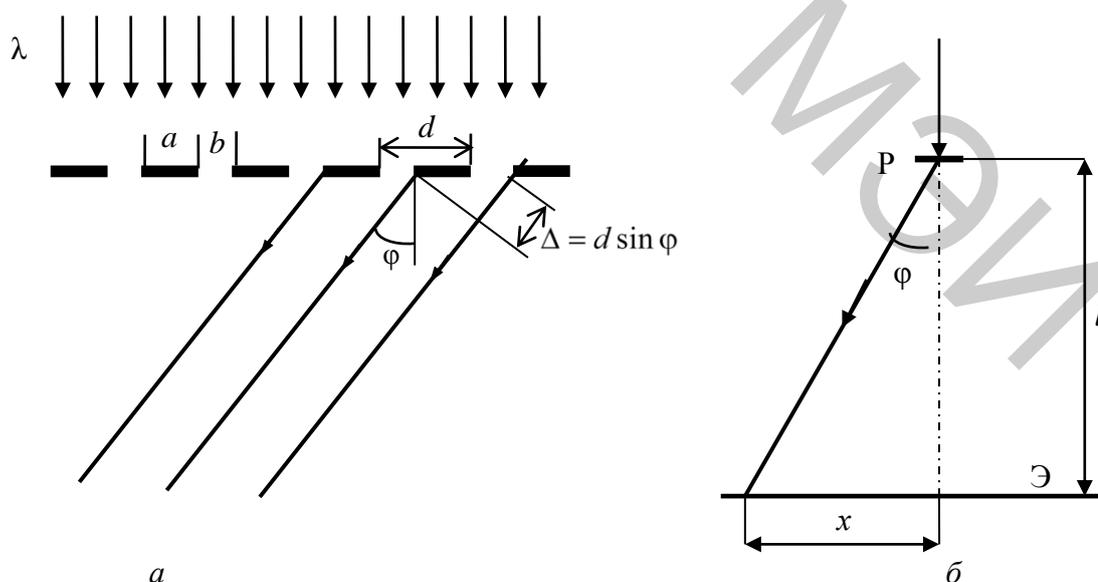


Рис. 1. Схема наблюдения дифракционной картины по методу Фраунгофера (дифракция в параллельных лучах).

Каждая точка прозрачных промежутков решетки, до которой дойдет волна, согласно *принципу Гюйгенса*, становится источником вторичных волн. За решеткой эти волны распространяются по всем направлениям, в том числе и по изображенному на рисунке направлению. Угол отклонения света от нормали к решетке φ называется углом дифракции.

Рассмотрим вторичные волны, идущие под одним и тем же углом дифракции φ (рис. 1, *a*). Так как расстояние l от решетки Р до экрана Э (рис. 1, *b*) много больше d , лучи, проходящие в точку экрана с координатой x можно считать практически параллельными. Для того чтобы все эти волны усиливали друг друга необходимо, чтобы оптическая разность хода волн, выходящих из соседних щелей $\Delta = d \sin \varphi$ была кратна целому числу длин волн λ .

Таким образом, условие, определяющее угловые направления φ_k на главные максимумы (*условие главных максимумов*), имеет вид:

$$d \sin \varphi_k = \pm k \lambda, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где знаки « \pm » отражают симметрию дифракционной картины относительно максимума нулевого порядка ($k = 0$).

На экране, в направлениях углов дифракции φ_k , определяемых условием (1), возникают узкие максимумы, интенсивность которых, как это можно показать, в N^2 раз превосходит интенсивность света, приходящего от каждой щели в том же направлении (N – число освещенных щелей). Эти максимумы называют *главными максимумами* k -го порядка, а уравнение (1) – условием главных максимумов. Именно главные максимумы и представляют особый практический интерес. Они получаются тем более узкими, чем большее число N штрихов содержит решетка (при условии освещения всей решетки).

Главные максимумы образуются в результате интерференции волн, выходящих из каждой отдельной щели; угловые направления дифракционных минимумов от любой из щелей определяются условием чётности числа зон Френеля:

$$b \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (2),$$

где b – ширина одной щели. Таким образом, условие минимума для одной щели является также условием минимума для решетки.

Поэтому главные максимумы некоторых порядков могут отсутствовать. Это имеет место для тех углов дифракции, в направлении которых ни одна из щелей решетки не посылает свет, т.е. когда одновременно выполняются условия минимума от одной щели и максимума от решетки. Учитывая, что для этой ситуации углы дифракции в (1) и (2) равны, получим:

$$\frac{d}{b} = \frac{m}{k}$$

т.е. часть главных максимумов исчезают в случае, когда отношение периода решетки к ширине щели целочисленное.

Кроме главных минимумов, определяемых условием (2) в результате интерференции волн, выходящих из соответствующих точек всех щелей, образуются дополнительные минимумы.

Угловые направления дополнительных минимумов, определяются условием

$$d \sin \varphi_p = \pm \frac{p}{N} \lambda, \quad (p = 1, 2, \dots, N-1, N+1, \dots) \quad (3)$$

где p – порядок дополнительных минимумов, N – число щелей. При $p = N$, $p = 2N$ и т.д. выполняются условия главных максимумов, поэтому между двумя соседними главными максимумами лежат $N - 1$ дополнительных минимумов и $N - 2$ слабых по интенсивности добавочных максимумов. При достаточно большом числе штрихов наблюдаемая на экране дифракционная картина представляет собой узкие яркие полосы, соответствующие главным максимумам, разделенные темным пространством. По этой причине для дифракционной решетки существенное значение имеет только формула (1), определяющая условия главных максимумов.

На рис. 2 изображен примерный график распределения интенсивности монохроматического света в дифракционной картине с числом щелей $N = 3$ и $d/b = 4$. Штриховая огибающая кривая соответствует интенсивности от одной

щели, умноженной на N^2 . Главный максимум четвертого порядка отсутствует (в направлении φ , для которого ни одна из щелей не посылает света).

Величина φ_k угловых направлений на главные максимумы пропорциональна длине λ световой волны. Поэтому при освещении решетки белым светом максимумы, соответствующие разным длинам волн, для всех порядков (кроме центрального), смещаются друг относительно друга, т.е. происходит разложение белого света в *спектр*. Фиолетовая (коротковолновая) граница этого спектра обращена к центру дифракционной картины, красная (длинноволновая) – к периферии.

Основными характеристиками дифракционных решеток, определяющими область их применения в качестве спектральных приборов, являются *дисперсия* и *разрешающая способность*.

Угловая дисперсия D определяется угловым расстоянием между двумя спектральными линиями, отнесенным к разности их длин волн,

$$D = \frac{\delta\varphi}{\delta\lambda}.$$

Угловую дисперсию для решетки получаем, дифференцируя формулу (1) по φ_k :

$$D = \frac{k}{d \cos \varphi_k}. \quad (4)$$

Для небольших углов дифракции дисперсия решетки постоянна; $\delta\varphi$ пропорционально $\delta\lambda$. В лабораторной работе определяется угловая дисперсия для желтого дублета.

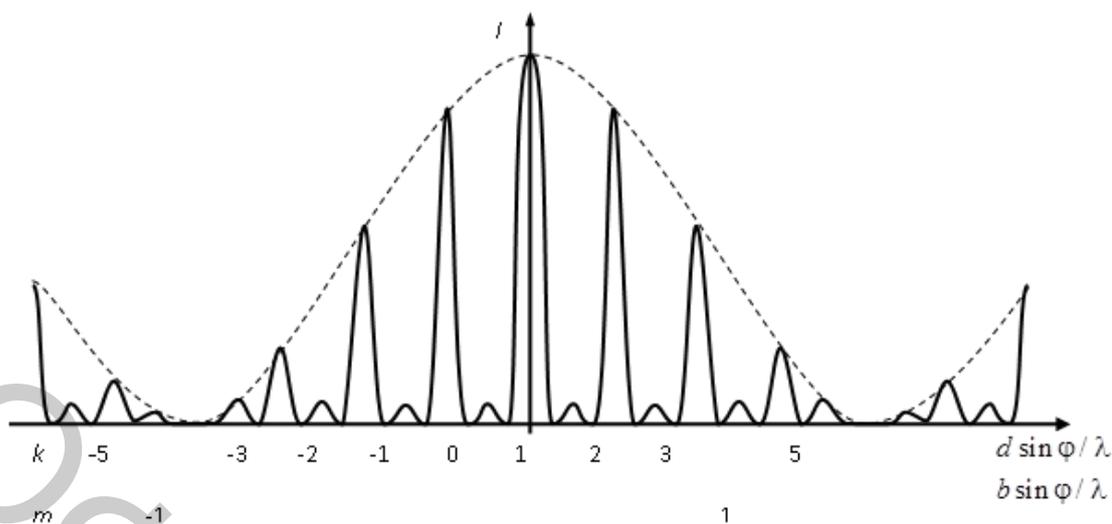


Рис. 2. График распределения интенсивности монохроматического света в дифракционной картине с числом щелей $N = 3$ и $d/b = 4$. Штриховая кривая представляет собой интенсивность света от одной щели, умноженную на N^2

Разрешающая способность R дифракционной решетки характеризует ее способность разделять (разрешать) спектральные линии, мало отличающиеся по длинам волн, и по определению

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda},$$

где λ – длина волны, вблизи которой производится измерение; $\delta\lambda$ – минимальная разность длин волн двух спектральных линий, воспринимаемых в спектре отдельно.

Разрешающую способность решетки можно рассчитать, пользуясь **критерием Рэлея**, по которому две монохроматические спектральные линии еще разрешаются (видны отдельно) в том случае, когда главный максимум одной линии попадает на место дополнительного минимума второй, ближайшего к её главному максимуму. Из этого условия следует, что разрешающая способность решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN, \tag{5}$$

где N – число освещенных штрихов решетки, k – номер максимума. Откуда следует, в частности, что разрешающая способность для данного максимума тем больше, чем больше освещено штрихов решетки.

2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 3, состоит из полупроводникового лазера 1 с источником питания 2, дифракционной решетки 3 и экрана 4.

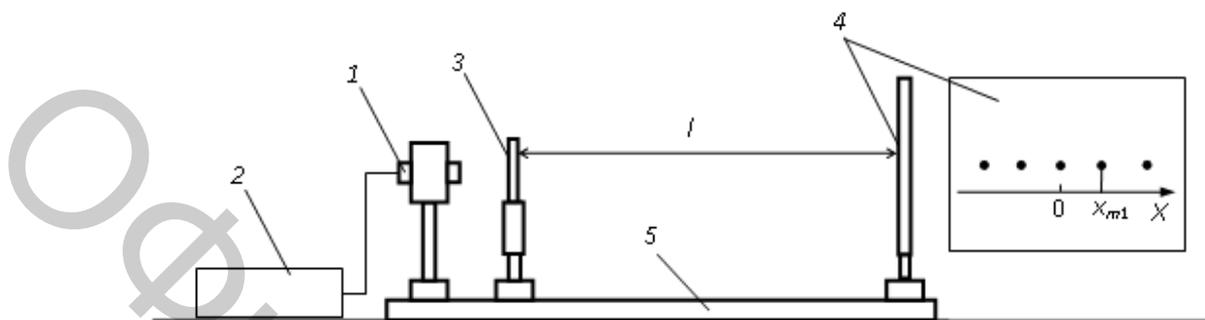


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Лазер, дифракционная решетка и экран закреплены в рейтерах, установленных на оптической скамье 5. Поскольку расстояние от дифракционной решетки до экрана l много больше длины дифракции l_d , мы имеем дело с дифракцией Фраунгофера. Дифракционная решетка имеет 50 штрихов на один миллиметр, а период решетки $d = 0,020$ мм. При включении лазера на экране 4 наблюдается дифракционная картина в виде ярких пятен, соответствующих главным максимумам. Интенсивность света между главными максимумами практически равна нулю.

Угловые направления на главные максимумы определяются формулой (1)

$$d \sin \varphi_k = \pm k\lambda, \quad k = 1, 2, \dots,$$

которая, с учетом того, что $\sin \varphi_k \approx x_k/l$ принимает вид:

$$\frac{x_k d}{l} = k\lambda. \quad (6)$$

Формула (6) предполагает что рассчитывается местоположение максимумов только в одну сторону от максимума нулевого порядка. Построив график зависимости $dx_k/l = f(k)$, которая является линейной, можно определить длину волны λ , как угловой коэффициент в уравнении прямой линии.

3. Порядок выполнения работы

Заполните табл. 1 спецификации измерительных приборов и запишите данные установки.

Таблица 1. Спецификация измерительных приборов

Название прибора и его тип	Пределы измерения	Цена деления	Инструментальная погрешность

Период дифракционной решетки $d = 0,020$ мм.

Расстояние от решетки до экрана $l =$ мм.

1. С помощью магнитов закрепите на экране лист бумаги формата А4, предварительно нанеся карандашом на бумаге две взаимно перпендикулярные оси вдоль и поперек листа, проходящие через центр листа.

2. Включите источник питания лазера. Совместите горизонтальную ось, нанесенную на лист бумаги с центрами световых пятен, так, чтобы вертикальная ось проходила через середину центрального пятна (центральный максимум).

3. Обведите карандашом контуры световых пятен, наблюдаемых на листе бумаги. Снимите лист бумаги с экрана. С помощью линейки и прямоугольного треугольника проведите карандашом через середины контуров световых пятен штрихи, перпендикулярные линии, их соединяющей. Обозначьте порядки главных максимумов.

4. Измерьте расстояние $2x_k$ между максимумами k первого, второго, третьего и четвертого порядков, находящимися по разные стороны от центрального максимума. Результаты измерений запишите в табл. 2.

Таблица 2. Измерение расстояния между главными максимумами.

k	$2 \cdot x_k$, мм	x_k , мм	$\frac{x_k d}{l}$, мм
1			
2			
3			
4			

4. Обработка результатов измерений

1. Рассчитайте расстояние x_k от центрального максимума до максимумов первого, второго, третьего и четвертого порядков. Для каждого порядка рассчитайте величину dx_k/l . Результаты запишите в табл. 2.

2. Постройте график зависимости dx_k/l от k (по оси ординат отложите значения dx_k/l , а по оси абсцисс значение k). Аппроксимируйте полученную экспериментальную зависимость уравнением прямой линии $y = Bx$.

Угловой коэффициент в уравнении прямой и есть длина волны $\lambda = B$.

3. Определите абсолютную погрешность длины волны и запишите окончательный результат в стандартном виде.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое дифракционная решетка? Для каких целей она используется?
2. Нарисуйте ход лучей для случая прохождения нормально падающего света сквозь дифракционную решетку. Поясните, как образуются главные максимумы.
3. Какая величина называется периодом дифракционной решетки? Что такое порядок спектра?
4. Что такое угловая дисперсия дифракционной решетки? От чего она зависит?
5. Разрешающая способность дифракционной решетки. Критерий Релея.
6. Что определяет наибольший порядок главного максимума, который можно наблюдать на дифракционной решетке?