

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники

А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель, Д.В. Окунев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ КОГЕРЕНТНОГО СВЕТА
НА ЩЕЛИ И ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКЕ**

Методические указания к лабораторной работе
для студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск
2025

УДК 535:530.145

ББК 22.343

Б–39

Рецензент:

Хатьков Н.Д., доцент кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
ТУСУР, канд. техн. наук

Авторы:

А. Д. Безпальный, А. Е. Мандель, Д. В. Окунев

Безпальный, Александр Дмитриевич

Б-39 Исследование дифракции когерентного света на щели и дифракционной решетке: методические указания к лабораторной работе для студентов технических направлений подготовки и специальностей / А.Д. Безпальный, А.Е. Мандель, Д.В. Окунев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 18 с.

В работе представлена краткая теория дифракции когерентного света на щели и дифракционной решетке. Описана экспериментальная установка и методика проведения лабораторной работы. В ходе выполнения работы студенты осваивают методы экспериментального наблюдения дифракционных картин на прямоугольной щели и на дифракционных решетках

Методические указания предназначены для студентов технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР протокол № 6 от 14.02.2025 г.

УДК 535:530.145

ББК 22.343

© Безпальный А. Д., Мандель А. Е., Окунев Д. В., 2025

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1 Дифракция света на щели.....	5
1.2 Дифракция света на дифракционной решетке	6
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	9
3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	11
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	12
5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	16
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	17
Список литературы	18

Введение

Дифракция — фундаментальное волновое явление, проявляющееся в отклонении света от прямолинейного распространения при взаимодействии с препятствиями или отверстиями. Это явление невозможно объяснить в рамках геометрической оптики и требует учета волновой природы света. Особый интерес представляет дифракция когерентного света, характеризующегося постоянной разностью фаз между волнами, что необходимо для наблюдения устойчивой интерференционной картины. Теория дифракции развивалась в работах О. Френеля и Й. Фраунгофера, заложивших основы современной оптики. Дифракционная решетка, изобретенная Фраунгофером, стала ключевым инструментом в изучении оптических спектров.

Дифракционные задачи относятся к наиболее сложным, их строгое теоретическое решение может быть получено лишь для ряда частных случаев. При анализе явлений дифракции в большинстве случаев используются приближенные методы, в частности — теория Гюйгенса-Френеля. Важными частными случаями являются дифракция плоской световой волны на прямоугольной щели и периодической структуре — амплитудной дифракционной решетке [1-3]. Согласно положению Гюйгенса, каждая точка волнового фронта световой волны играет роль источника вторичных сферических волн. Волновой фронт является огибающей волновых фронтов всех вторичных волн. Френель объяснил эффекты дифракции, используя положение Гюйгенса, дополненное утверждением об интерференции вторичных волн. Вторичные волны интерферируют между собой, создавая чередующиеся максимумы и минимумы интенсивности. Сочетание положения Гюйгенса с дополнением Френеля называется принципом Гюйгенса-Френеля [1-3].

При дифракции на щели и состоящей из набора щелей периодической структуре рассматривают, как правило, случай дифракции в параллельных лучах, или дифракцию Фраунгофера.

Целью данной работы является изучение дифракции когерентного света на прямоугольной щели и периодической структуре, состоящей из набора прямоугольных щелей — амплитудной дифракционной решетке.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Дифракция света на щели

Рассмотрим дифракцию лазерного излучения на одномерной щели. Щель называется одномерной в случае, когда ее ширина значительно меньше длины.

Пусть плоская волна падает по нормали к плоскости щели шириной b (рисунок 1.1). Фаза и амплитуда поля во всех точках в плоскости щели одинаковы. На основании принципа Гюйгенса-Френеля, каждая точка волнового фронта является источником вторичных сферических волн, интерферирующих между собой. Часть лучей дифрагирует на краях щели, т.е. отклоняется от своего первоначального направления. Если за щелью расположить линзу, то падающие на нее параллельные лучи соберутся в одной точке, в которой будет наблюдаться интерференция вторичных волн. Результат интерференции зависит от числа полуволн, которое укладывается в разности хода Δ между соответствующими лучами. Если число полуволн n нечетное, то результатом интерференции в точке фокусировки будет усиление света, если n четное, то будет происходить ослабление света. Таким образом, в плоскости наблюдения будет формироваться дифракционная картина, которая представляет собой чередование ярких и темных областей.

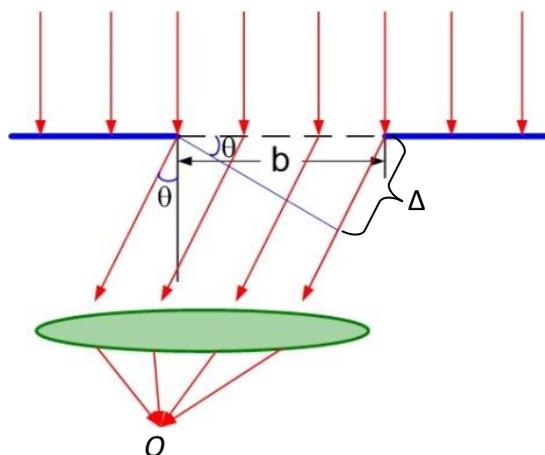


Рисунок 1.1 – Падение плоской волны на одномерную щель

Рассмотрим лучи, которые идут под некоторым углом θ к направлению падающей световой волны (рисунок 1.1). Расстояние $\Delta = b \sin\theta$ – разность хода между крайними лучами, проходящими через щель. Если в Δ уложится четное число полуволн, то в точке O будет ослабление света – минимум. Если нечетное, то усиление света – максимум. Эти условия можно записать в следующем виде:

$$b \cdot \sin(\theta) = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \rightarrow \min, \quad (1.1)$$

$$b \cdot \sin(\theta) = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \rightarrow \max. \quad (1.2)$$

где $m = \pm 1, 2, 3 \dots$

Для одномерной щели шириной b , при нормальном падении на нее плоской световой волны, распределение амплитуды поля и интенсивности света в дальней зоне описываются выражениями [1]:

$$E(\theta) = E_0 \frac{\sin\left(\frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{\frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)}, \quad (1.3)$$

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{\frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)} \right)^2, \quad (1.4)$$

где θ – угол наблюдения; E_0 , I_0 – амплитуда поля и интенсивность поля в плоскости щели.

Распределения интенсивности света в дальней зоне дифракции на одномерной щели при нормальном падении на нее плоской световой волны представлено на рисунке 1.2.

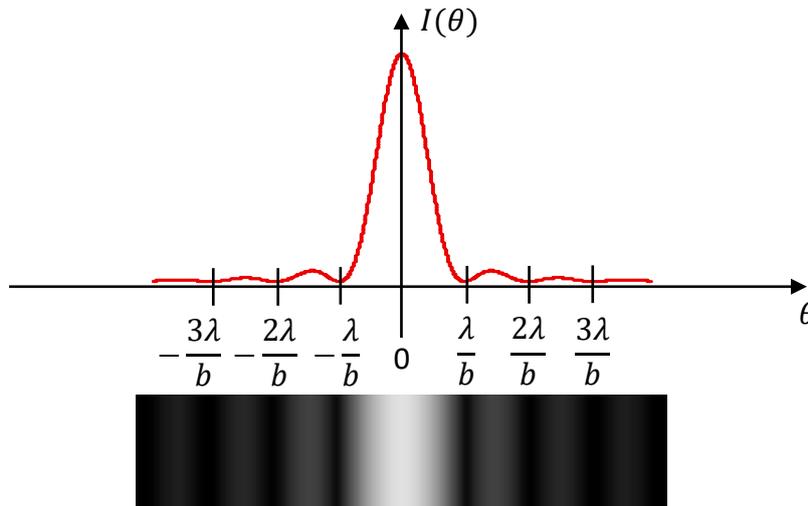


Рисунок 1.2 – Дифракционная картина на одномерной щели (снизу) и распределение интенсивности света (сверху)

При $\sin(\theta) = 0$ имеем главный максимум. При этом интенсивность света $I(0) = I_0$.

1.2 Дифракция света на дифракционной решетке

Одномерная дифракционная решетка представляет собой систему из большого количества одинаковых по ширине и параллельных друг другу щелей, разделенных одинаковыми по ширине штрихами. Щели и штрихи также называют «светлыми» и «темными» областями. Ширина «светлой» области b и «темной» области a в сумме образуют пространственный период или постоянную дифракционной решетки $d = a + b$. Падение плоской волны на дифракционную решетку схематически показано на рисунке 1.3.

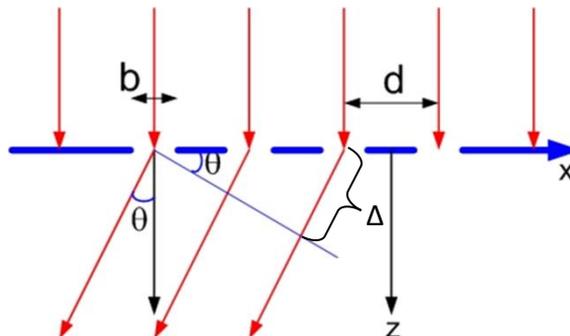


Рисунок 1.3 – Падение плоской волны на дифракционную решетку

Дифракционная картина на решетке определяется как результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей, т.е. в дифракционной решетке

осуществляется многолучевая интерференция когерентных дифрагированных пучков света. В результате интерференции N когерентных вторичных волн происходит перераспределение светового потока по направлениям.

При дифракции плоской волны на системе из N щелей шириной b , расположенных с пространственным периодом d в непрозрачном экране, распределение интенсивности света в дальней зоне описывается выражением [1]:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(U)}{U} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{N\delta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)} \right)^2, \quad (1.5)$$

где $U = \frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)$.

При нормальном падении световой волны на плоскость решетки (рисунок 1.2) разность хода соседних пучков $\Delta = d \sin(\theta)$. Отсюда набег фазы равен

$$\delta = k\Delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta).$$

В формуле (1.5) первый множитель описывает дифракцию света на каждой отдельной щели. Второй множитель учитывает интерференцию световых полей, излучаемых всеми щелями.

Результат совместного действия интерференции N пучков и дифракции на отдельной щели приведен на рисунке 1.4.

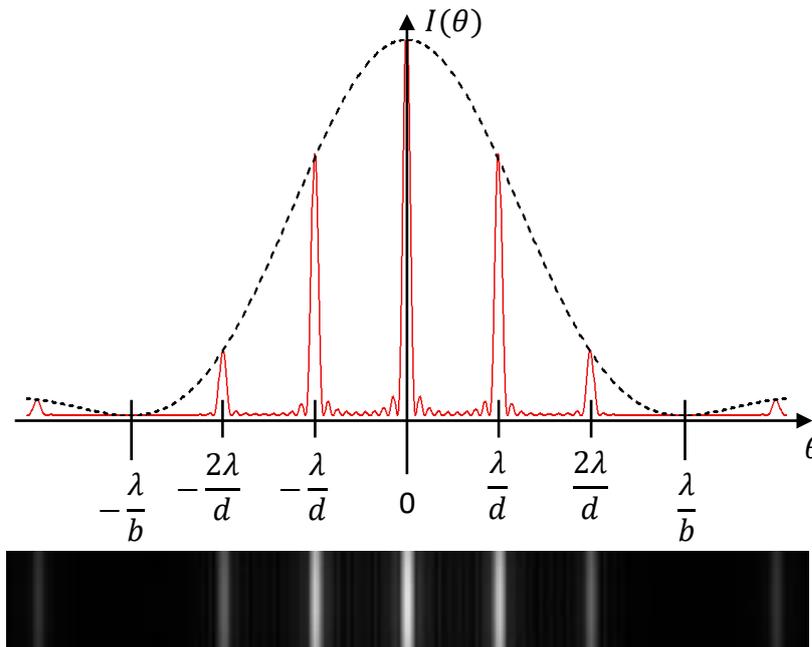


Рисунок 1.4 – Дифракционная картина на решетке (снизу) и распределение интенсивности света (сверху)

Условие дифракционных максимумов для решетки:

$$d \cdot \sin\theta = \pm m\lambda, \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1.6)$$

Максимумы, соответствующие этому условию, называются главными максимумами. Значение величины m , соответствующее тому или иному максимуму, называется порядком дифракционного максимума.

Между главными максимумами возникают N минимумов, когда $\sin(N\delta/2) = 0$, но $\sin(\delta/2) \neq 0$.

Между минимумами есть дополнительные максимумы, в которых интенсивность света мала по сравнению с интенсивностью главных максимумов.

Период решетки d равен:

$$d = b + a , \quad (1.7)$$

где b – ширина «светлой» области; a – ширина «темной» области.

Количество главных максимумов в интерференционной картине зависит от соотношения ширины щели b к периоду решетки d . При $b = d/2$ число главных максимумов равно трем (центральный и два дифракционных максимума).

Дифракционная эффективность решетки η рассчитывается по формуле [4]:

$$\eta = \frac{I_{dm}}{I_{пр} + I_d} , \quad (1.8)$$

где I_{dm} – интенсивность m -го дифракционного максимума; $I_{пр}$ – интенсивность основного прошедшего максимума; I_d – суммарная интенсивность дифракционных максимумов.

2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Когерентное излучение с узкой шириной спектра могут генерировать такие устройства, как газовые и твердотельные лазеры (рисунок 2.1).

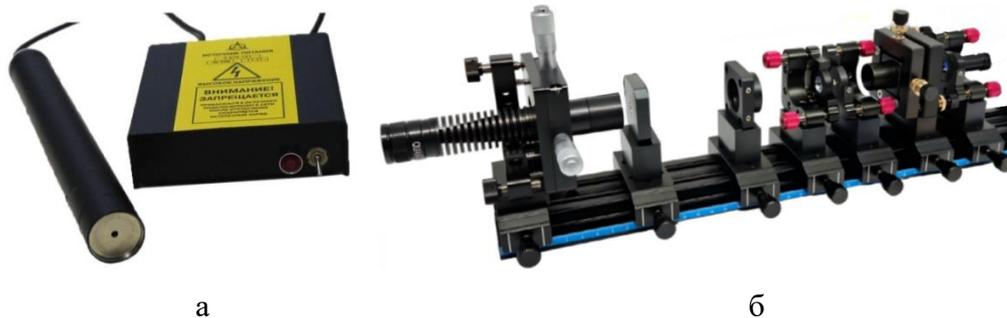


Рисунок 2.1 – Источники когерентного излучения:
а – He-Ne лазер; б – YAG:Nd³⁺ лазер с генерацией второй гармоники

Схема экспериментальной установки для исследования дифракции когерентного излучения на щели и периодической структуре изображена на рисунке 2.2.

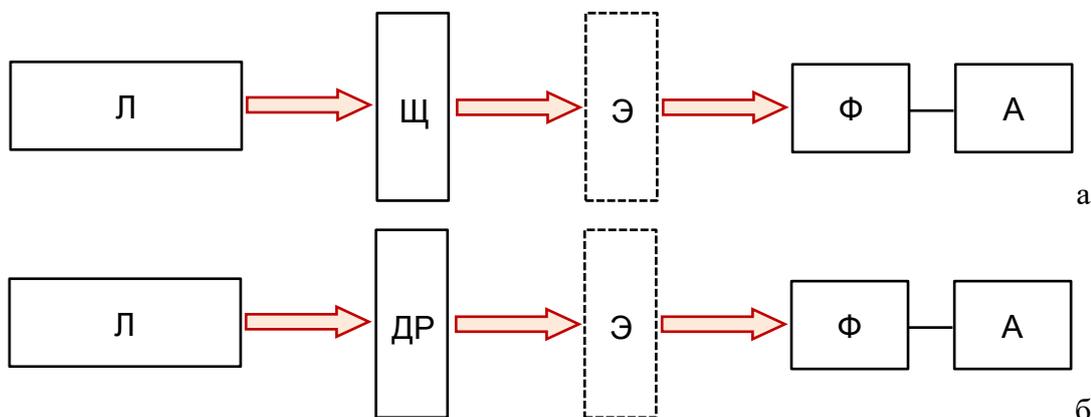


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки для исследования дифракции:
а – на прямоугольной щели; б – на периодической структуре;
Л – источник излучения; ДР – дифракционная решетка; Э – экран; Щ – одномерная щель;
Ф – фотодиод; А – амперметр

В качестве источника излучения в лабораторной установке используется He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм и выходной мощностью $P \approx 1$ мВт (рисунок 2.1а), либо твердотельный YAG:Nd³⁺ лазер с генерацией второй гармоники ($\lambda = 532$ нм) (рисунок 2.1б).

Для исследования дифракции в работе используются прямоугольная щель (Щ) и дифракционная решетка (ДР), которая является периодической структурой (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Элементы, используемые для исследования дифракции когерентного света:
а – шаблон с прямоугольными щелями; б – дифракционная решетка

При прохождении света через прямоугольную щели или дифракционную решетку на экране (Э) наблюдается дифракционная картина. Экран необходим для измерения расстояния l между центральным и дифракционными максимумами. После измерения расстояния l экран смещается и излучение поступает на фотодиод (Ф). Фотодиодом измеряется фототок I_{ϕ} каждого максимума. Показания фототока регистрируются амперметром (А).

3 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

3.1 Экспериментальное исследование дифракции когерентного света на прямоугольной щели и дифракционной решетке.

3.2 Определение параметров решетки a и b – ширины «светлой» и «темной» областей.

3.3 Расчет и построение теоретических зависимостей $I(\theta)$ в дальней зоне дифракции когерентного света на прямоугольной щели и дифракционной решетке.

3.4 Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с целью работы, теоретическим материалом, описанием экспериментальной установки и пройти инструктаж по технике безопасности.

Лабораторную работу необходимо выполнять в защитных очках!

Задание к лабораторной работе.

Перед выполнением работы необходимо:

- изучить теоретический материал (раздел 1);
- ознакомиться со схемой экспериментальной установки (рисунок 2.1);
- собрать экспериментальную установку в соответствии с описанием в разделе 2;
- ознакомиться с порядком выполнения работы;
- получить вариант и допуск у преподавателя.

Номера вариантов и исходные данные представлены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 – Варианты заданий и исходные данные для исследования дифракции когерентного света на щели

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7
Ширина щели b , мм	0.05	0.1	0.2	0.05	0.05	0.1	0.2
Расстояние между щелью и экраном L , см	50	60	70	80	40	50	60
Длина волны λ , нм	633	633	633	633	532	532	633

Таблица 4.2 – Варианты заданий и исходные данные для исследования дифракции когерентного света на решетке

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7
Период решетки d , мкм	20	20	10	10	10	20	20
Расстояние между решеткой и экраном L , см	30	50	70	90	30	40	50
Длина волны λ , нм	633	633	633	633	532	532	532
Ширина «светлой» области b , мкм	Вычислить из условий минимумов для дифракции на периодической структуре						
Ширина «темной» области a , мкм	Определить из параметров d и b						

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки (рисунок 2.2).
2. Включить лазер.
3. Убедиться в наличии генерации.
4. Необходимо включить источник излучения и убедиться в его исправной работе.

В случае неисправной работы устройства сообщить преподавателю!

5. Исследование дифракции лазерного излучения на прямоугольной щели.

5.1 Выбрать необходимую щель, параметры которой соответствуют номеру варианта.

5.2 Установить щель так, чтобы излучение лазера проходило через ее центр.

5.3 Установить экран на расстоянии L от щели, пронаблюдать и зафиксировать дифракционную картину.

5.4 Измерить расстояния между центральным и дифракционными максимумами l_{\max} , а также расстояния между центральным максимумом и дифракционными минимумами l_{\min} . Результаты измерений занести в таблицу 4.3.

5.5 Включить питание амперметра и убедиться в исправности прибора. Далее необходимо установить диапазон измеряемых значений на «мкА».

В случае неисправной работы прибора сообщить преподавателю!

5.6 Провести измерения фототока I_{ϕ} амперметром для каждого максимума. Нормировать значения I_{ϕ} . Данные занести в таблицу 4.3. Поскольку фототок I_{ϕ} прямо пропорционален интенсивности света I , то допустимо использовать нормированные значения I_{ϕ} для I в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты измерений

Номер максимума	-3	-2	-1	0	1	2	3
Расстояние между центральным и дифракционными максимумами l_{\max} , мкм							
Расстояние между центральным и дифракционными минимумами l_{\min} , мкм							
Фототок I_{ϕ} , мкА							
Интенсивность I , норм. знач.							

5.7 Построить экспериментальную зависимость интенсивности $I(\theta)$ в дальней зоне дифракции света на щели.

5.8 Построить теоретическую зависимость интенсивности $I(\theta)$ в дальней зоне дифракции света на щели, используя выражение (1.4).

6. Исследование дифракции лазерного излучения на дифракционной решетке.

6.1 Выбрать необходимую дифракционную решетку, параметры которой соответствуют номеру варианта.

6.2 Установить дифракционную решетку так, чтобы излучение лазера проходило через ее центр.

6.3 Установить экран на расстоянии L от ДР, пронаблюдать и зафиксировать дифракционную картину.

6.4 Измерить расстояния между центральным и дифракционными максимумами l_{\max} , а также расстояния между центральным максимумом и дифракционными минимумами l_{\min} . Результаты измерений занести в таблицу 4.4.

6.5 Включить питание амперметра и убедиться в исправности прибора. Далее необходимо установить диапазон измеряемых значений на «мкА».

В случае неисправной работы прибора сообщить преподавателю!

6.6 Провести измерения фототока I_{ϕ} амперметром для каждого максимума. Нормировать значения I_{ϕ} . Данные занести в таблицу 4.4.

Поскольку фототок I_{ϕ} прямо пропорционален интенсивности света I , то допустимо использовать нормированные значения I_{ϕ} для I в таблице 4.4.

6.7 Определить период решетки d , ширину «светлой» области b и ширину темной области a , используя формулы (1.1), (1.6) и (1.7).

Таблица 4.4 – Результаты измерений

Номер максимума	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Расстояние между центральным и дифракционными максимумами l_{\max} , мкм											
Расстояние между центральным максимумом и дифракционными минимумами l_{\min} , мкм											
Фототок I_{ϕ} , мкА											
Интенсивность I , норм. знач.											

7. Расчет и построение теоретических зависимостей $I(\theta)$ в дальней зоне дифракции когерентного света на прямоугольной щели и дифракционной решетке.

7.1 Построить теоретическую зависимость интенсивности $I(\theta)$ в дальней зоне дифракции света на прямоугольной щели и решетке, используя выражения (1.4) и (1.5).

7.2 Сопоставить построенные зависимости и результаты измерений на одном графике. На графиках перевести угловые координаты в линейные. Примеры сопоставления теоретических и экспериментальных результатов изображены на рисунках 4.1-4.4.

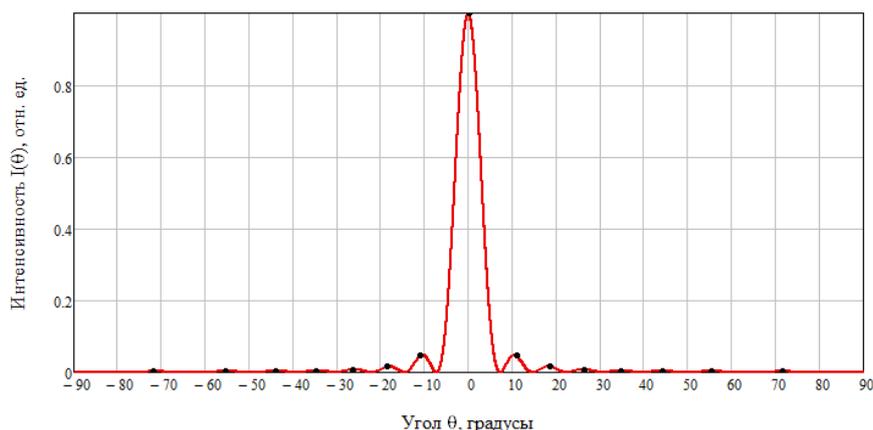


Рисунок 4.1 – Угловое распределение интенсивности $I(\theta)$ в дальней зоне дифракции света на прямоугольной щели с $b = 5$ мкм

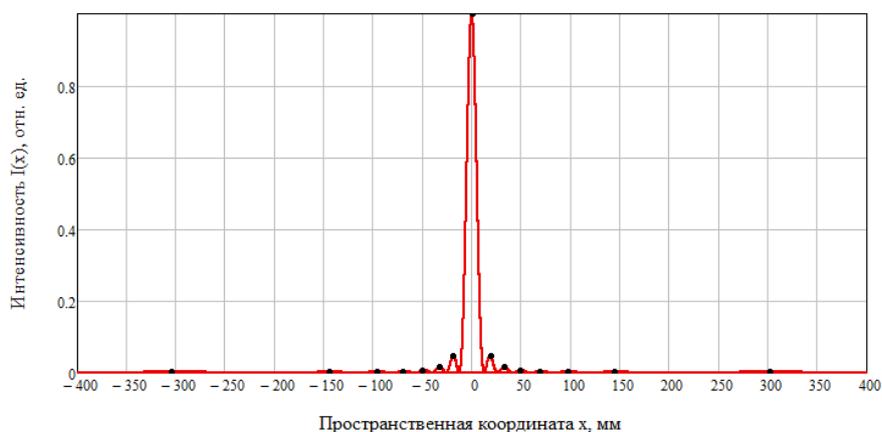


Рисунок 4.2 – Пространственное распределение интенсивности $I(x)$ в дальней зоне дифракции света на прямоугольной щели с $b = 5$ мкм

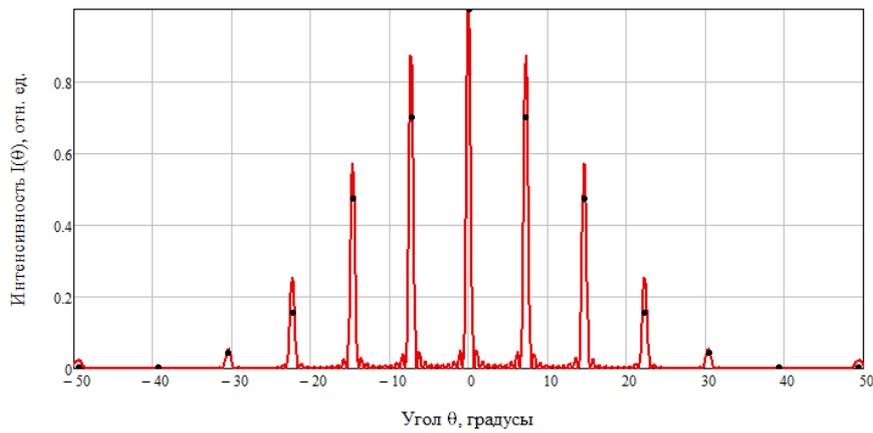


Рисунок 4.3 – Угловое распределение интенсивности $I(\theta)$ в дальней зоне дифракции света на периодической структуре с $d = 5$ мкм

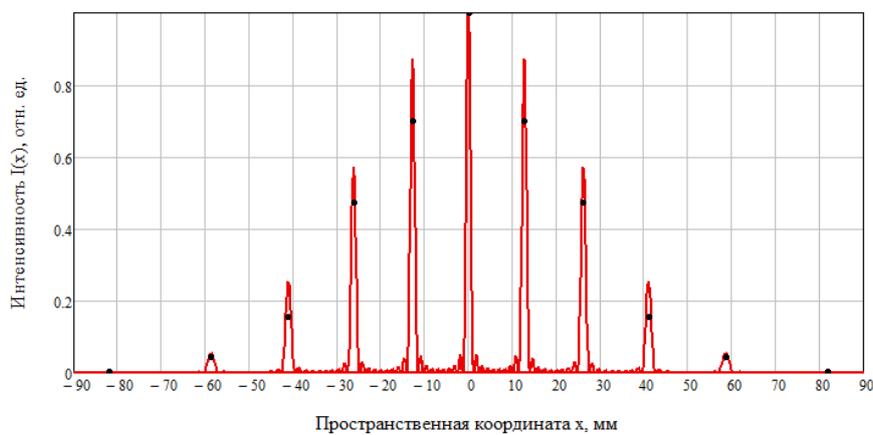


Рисунок 4.4 – Пространственное распределение интенсивности $I(x)$ в дальней зоне дифракции света на периодической структуре с $d = 5$ мкм

8. Рассчитать дифракционную эффективность η для каждого максимума по формуле (1.8) и занести в таблицу 4.5. Построить зависимость η от номера максимума m .

Таблица 4.2 – Дифракционная эффективность η максимумов

Номер максимума	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
η , %											

5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать следующие пункты:

- Цель работы.
- Теоретические сведения.
- Описание установки.
- Ход работы.
- Результаты проделанной работы и выводы.

Требования к оформлению отчета приведены в образовательном стандарте вуза ОС ТУСУР 01-2021 [5].

После оформления отчет сдать на проверку преподавателю и приступить к защите работы. Перед защитой необходимо повторно изучить рекомендуемую литературу.

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие волны называются когерентными?
2. В чём заключается явление дифракции?
3. Какие свойства света подтверждает дифракция света?
4. При каких условиях наблюдается дифракция света?
5. Как образуется дифракционный спектр?
6. Почему максимумы располагаются как слева, так и справа от нулевого максимума?
7. В чем отличие углового отклонения от линейного отклонения дифракционных максимумов на периодической структуре?

Список литературы

1. Шандаров, В. М. Основы физической и квантовой оптики: Учебное пособие [Электронный ресурс] / В. М. Шандаров. – Томск: ТУСУР, 2012. – 197 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/750> (дата обращения: 10.02.2025)
2. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. - 720 с.
3. Н.И. Калитеевский. Волновая оптика. - СПб.: Лань, 2006. - 465 с.
4. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах : Учебное пособие [Электронный ресурс] / В. М. Шандаров [и др.]. — Томск: ТУСУР: 2012. — 244 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1553> (дата обращения: 10.02.2025)
5. Образовательный стандарт вуза ОС ТУСУР 01-2021. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления от 25.11.2021 [Электронный ресурс]. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – 52 с. – Режим доступа: <https://regulations.tusur.ru/#/documents/87> (дата обращения: 10.02.2025)