

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

А.Д. Безпальный, А.Е. Мандель

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ**

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

Томск
2023

УДК 535:530.145

ББК 22.343

Рецензент:

Шарангович С.Н., профессор кафедры сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
ТУСУР, канд. физ.-мат. наук

Авторы:

А. Д. Безпалый, А. Е. Мандель

Безпалый, Александр Дмитриевич,

Исследование дифракции когерентного излучения на периодической структуре / А.Д. Безпалый, А.Е. Мандель. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 10 с.

В работе представлена краткая теория дифракции света, описана экспериментальная установка и методика проведения лабораторной работы. В ходе выполнения работы студенты закрепляют теоретические знания о дифракции и экспериментально исследуют явление дифракции лазерного излучения на периодической структуре.

Методические указания предназначены для студентов технических направлений подготовки и специальностей.

Одобрено на заседании каф. СВЧиКР протокол №2 от 28.09.2023 г.

УДК 531.1

ББК 22.3

© Безпалый А.Д., 2023

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2023

Оглавление

Введение	4
1 ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ	4
1.1 Дифракция света на щели и периодических структурах	4
2 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	5
3 ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	6
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	7
5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	9
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	10

Введение

Целью работы является исследование дифракции когерентного излучения на периодической структуре. Расчет и измерение интенсивности дифракционных полей на периодических структурах. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов.

1 ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

1.1 Дифракция света на щели и периодических структурах

В явлениях дифракции проявляются волновые свойства световых полей, а под самим термином “дифракция” понимается отклонение свойств световых волн от идеализированных геометрической оптикой. В приближении геометрической оптики при наличии в световом поле, создаваемом точечным излучателем, некоторого непрозрачного препятствия, за ним должна наблюдаться резкая граница между областью «света» и «тени». Реально в предполагаемой области «тени» обнаруживается электромагнитное поле, что объясняется с позиций волновой теории огибанием волной препятствий. Дифракционные задачи относятся к наиболее сложным, их строгое 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 волны любой природы играет роль источника вторичных сферических волн. Волновой фронт в некоторый более поздний момент времени является огибающей волновых фронтов всех вторичных волн. Френель объяснил эффекты дифракции, используя положение Гюйгенса, дополненное утверждением об интерференции вторичных волн между собой. Сочетание положения Гюйгенса с дополнением Френеля называется принципом Гюйгенса – Френеля [1-3].

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

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

$$S(\theta) = A_0 \frac{\sin\left(\frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{\frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)}, \quad (1.1)$$

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)\right)}{\frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)} \right)^2, \quad (1.2)$$

где θ – угол наблюдения; $A_0 I_0$ – амплитуда поля и интенсивность поля в плоскости щели.

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 имеет вид [1]:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(U)}{U} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin(N\delta)}{\sin(\delta)} \right)^2, \quad (1.3)$$

где $U = \frac{b\pi}{\lambda} \sin(\theta)$ – множитель, который описывает дифракцию света на каждой щели; $\delta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin(\theta)$ – множитель, который учитывает интерференцию световых полей, излучаемых всеми щелями; N – количество штрихов решетки; b – ширина «светлой» области, d – период решетки; λ – длина волны излучения, прошедшего через периодическую структуру.

Условие главных дифракционных максимумов (для решетки):

$$d \cdot \sin\varphi = \pm m_{max} \lambda, \quad m_{max} = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1.4)$$

Условие главных дифракционных минимумов (для решетки):

$$b \cdot \sin\varphi = \pm m_{min} \lambda, \quad m_{min} = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1.5)$$

Период решетки d также может быть вычислен как:

$$d = a + b, \quad (1.6)$$

где b – ширина прозрачной («светлой») области решетки, a – ширина непрозрачной («темной») области решетки.

Дифракционная эффективность η рассчитывается по формуле [4]:

$$\eta = \frac{I_{дn}}{I_{пр} + I_{д}}, \quad (1.7)$$

где $I_{дn}$ – интенсивность n -го дифракционного максимума; $I_{пр}$ – интенсивность основного прошедшего максимума; $I_{д}$ – 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).

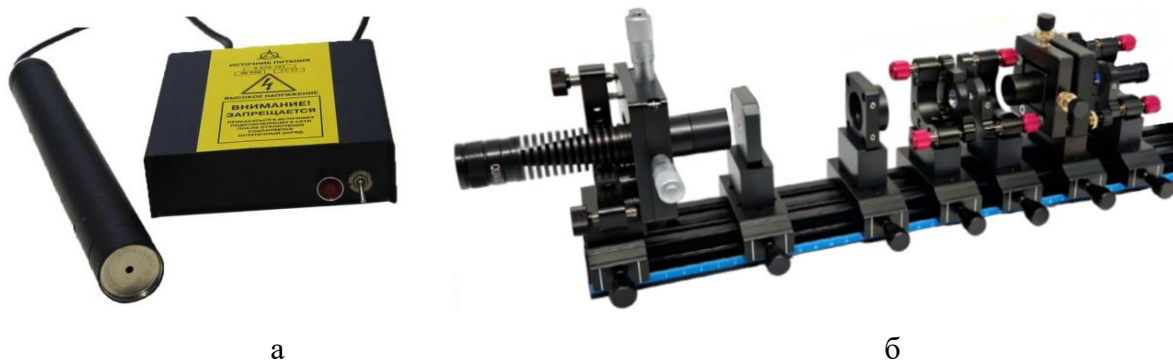


Рисунок 2.1 – Источники когерентного излучения: а – He-Ne лазер;
б – YAG:Nd³⁺ лазер с генерацией второй гармоники

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

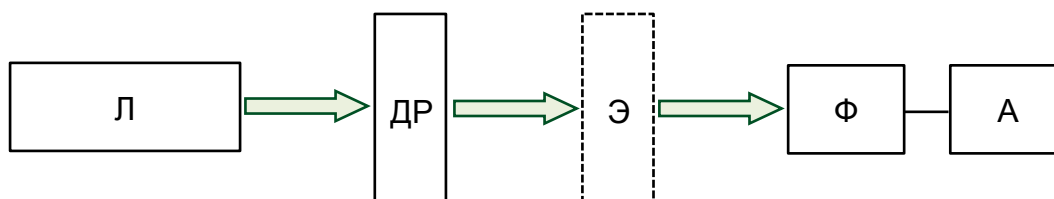


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки: Л– источник излучения;
ДР – дифракционная решетка 1; Э – экран; Ф – фотодиод; А – амперметр

В качестве источника излучения 1 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). Дифракционная решетка (ДР) является периодической структурой, при прохождении через которую на экране (Э) наблюдается дифракционная картина. Экран необходим для измерения расстояния l между центральным и дифракционными максимумами. После измерения расстояния l экран смещается для подачи излучения на фотодиод (Ф). Фотодиодом измеряется фототок $I_{\text{ф}}$ каждого максимума. Показания фототока отображаются на дисплее амперметра (А).

3 ЗАДАНИЕ ДЛЯ 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!**

Варианты заданий для подгруппы и исходные данные, соответствующие варианту, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Варианты заданий и исходные данные

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7
Период решетки d , мкм	18	16	15	13	12	10	8
Расстояние между решеткой и экраном L , см	30	33	40	50	20	25	45
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						

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Необходимо включить источник излучения и убедиться в его исправной работе. В случае неисправной работы устройства сообщить преподавателю!

2. В соответствии с номером варианта необходимо установить периодическую структуру так, чтобы излучение лазера проходило через центр штрихов.

3. Установить экран на расстоянии L от решетки, пронаблюдать и зафиксировать дифракционную картину.

4. Измерить расстояния между основным и дифракционными максимумами l_{\max} , а также расстояния между основным и дифракционными минимумами l_{\min} . Измеренные данные занести в таблицу 4.2.

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. Провести измерения фототока I_{ϕ} , выдаваемых амперметром, для каждого максимума. Нормировать значения фототока. Данные занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Измеренные данные

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

7. Построить экспериментальную зависимость изменения интенсивности дифракционных полей $I(\theta)$.

8. Построить теоретическую зависимость изменения интенсивности дифракционных полей $I(\theta)$ в соответствии с выражением (1.3).

9. Сопоставить зависимости на одном графике и сравнить экспериментальные результаты с теоретическими. Перевести угловое отклонение дифракционных максимумов от основного прошедшего в линейное отклонение. Примеры сопоставления теоретических и экспериментальных результатов изображены на рисунках 4.1 и 4.2.

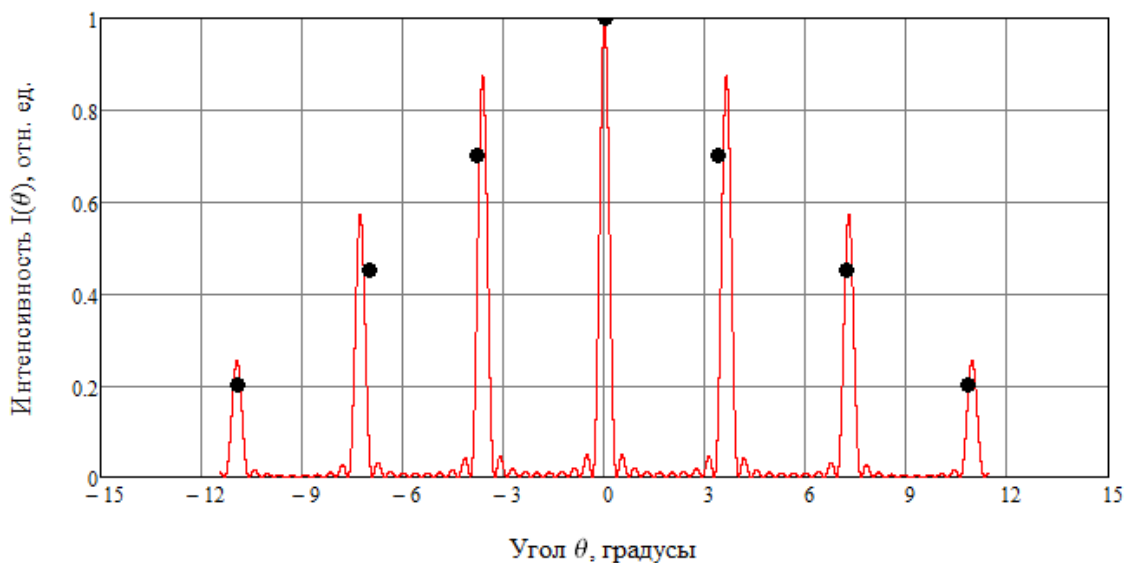


Рисунок 4.1 – Распределение интенсивности дифракционных полей в дальней зоне $I(\theta)$ при угловом максимумов на дифракционной решетке с периодом $d = 10$ мкм

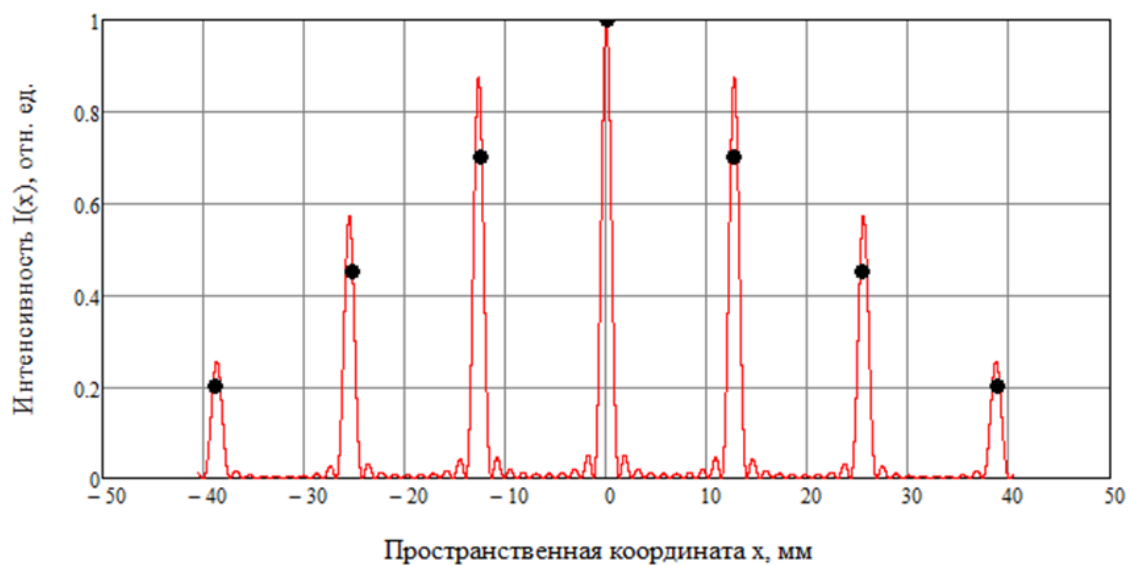


Рисунок 4.2 – Распределение интенсивности дифракционных полей в дальней зоне $I(x)$ при линейном отклонении максимумов на дифракционной решетке с периодом $d = 10$ мкм

10. Рассчитать дифракционную эффективность η для каждого максимума по формуле (1.7) и занести в таблицу 4.2. 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 , %											

11. Оформить отчет по работе и сделать выводы о проделанной работе. В отчет должны входить следующие пункты:

- Введение.
- Элементы теории.
- Описание установки.
- Ход работы.
- Выводы.

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

5 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: 05.09.2023 г.)
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. (30)
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: 05.09.2023 г.)