

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

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

А.С. Перин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР,  
СФОРМИРОВАННЫХ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов направления  
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Томск  
2020

**УДК** 621.391.1.519.8(075.8)  
**ББК** 32.88-01я73  
П274

**Рецензент:**

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

**Перин, Антон Сергеевич**

П274 Исследование характеристик дифракционных структур, сформированных в ниобате лития: методические указания по выполнению лабораторной работы / А.С. Перин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 13 с.

Даны указания по исследованию характеристик одномерных фазовых дифракционных элементов, сформированных в фоторефрактивном кристалле ниобата лития.

Предназначено для студентов всех форм обучения, обучающихся по направлению подготовки магистров 11.04.02 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", профиль "Оптические системы связи и обработки информации" по курсу «Волноводная фотоника и нанооптика».

Одобрено на заседании каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники,  
протокол № 2 от 01.10.2020

УДК 621.391.1.519.8(075.8)  
ББК 32.88-01я73

© Перин А.С., 2020  
© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ .....	4
2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	5
3 РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ .....	8
4 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ .....	9
5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ .....	11
6 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА .....	12
7 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	13

## 1 ВВЕДЕНИЕ

**Цель работы:** исследование характеристик фазовых дифракционных решеток, сформированных в фоторефрактивном кристалле ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), с использованием одномерных амплитудных транспарантов.

Все более быстрого и гибкого управления потоками электромагнитных волн требуют современные датчики, широкополосные системы связи, а также перспективные системы оптической памяти. Дифракция света на периодических структурах наряду с рефракцией, отражением и поглощением позволяет управлять условиями распространения электромагнитного поля.

Модуляция показателя преломления в виде периодических дифракционных структур, созданных в фоторефрактивных кристаллах, обладает рядом уникальных свойств по сравнению с известными дифракционными решетками, созданных стандартными методами. Такая модуляция позволяет обеспечить не только эффективную дифракцию электромагнитного поля, но и дает возможность для управления условиями дифракции оптическими методами.

Таким образом, возможно осуществлять операции управления светом при помощи света. Анализ литературы показывает, что в зависимости от используемого фоторефрактивного кристалла и экспериментальных условий можно изменять направление распространения света, управлять его амплитудой, менять поляризацию, производить спектральное селектирование светового потока как во временной, так и в пространственной областях, т.е. потенциально имеется возможность производить практически все необходимые для современных информационных систем базовые операции. Поэтому исследование оптически индуцированных фоторефрактивных решеток и возможности оптического управления дифракцией света на таких решетках является актуальным.

## 2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрооптический фоторефрактивный кристалл ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) — один из наиболее уникальных и широко применяемых в настоящее время сегнетоэлектрических материалов в пьезотехнике, квантовой, опто- и акустоэлектронике.

Фоторефрактивный эффект (ФРЭ) или эффект фоторефракции заключается в изменении показателя преломления диэлектрических или полупроводниковых материалов под действием света. Фоторефрактивные свойства электрооптических кристаллов существенно зависят от наличия в них различных легирующих примесей. К подобным активным примесям в первую очередь относятся ионы некоторых переходных элементов, склонных к перезарядке (Fe, Cu, Cr, Rh и т.д.). Ярким примером фоторефрактивного материала является  $\text{LiNbO}_3$ .

Дифракция — это отклонение света от прямолинейного распространения на неоднородностях среды. Рассмотрим явление дифракции на щели по схеме, изображенной на рисунке 2.1. Положение дифракционных максимумов и минимумов не будет зависеть от положения щели, ибо положение максимумов определяется направлением, по которому идет большая часть испытавшего дифракцию света. Поэтому при перемещении щели параллельно самой себе никаких изменений дифракционной картины не должно наблюдаться. Если в непрозрачной перегородке проделаны две идентичные параллельные щели, то они дадут одинаковые накладывающиеся друг на друга дифракционные картины, вследствие чего максимумы соответственным образом усилятся. Однако в действительности картина окажется сложнее, ибо надо принять в расчет взаимную интерференцию волн, идущих от первой и второй щелей.

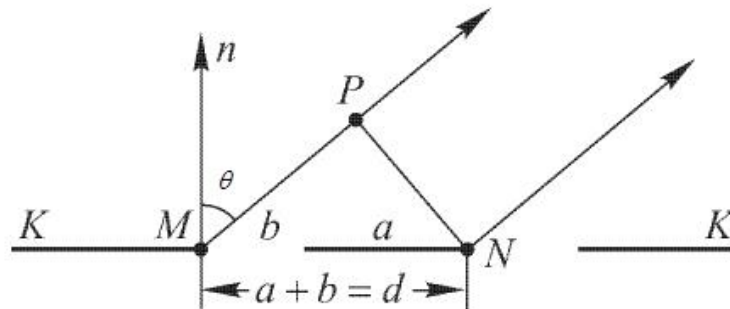


Рисунок 2.1 – К определению положения главных максимумов и добавочных минимумов при дифракции на двух параллельных щелях

Предположим, что мы прорезали в перегородке  $KK$  (рисунок 2.1) две щели шириной  $b$ , разделенные непрозрачным промежутком  $a$ , так что  $a + b = d$ . Очевидно, что минимумы будут на прежних местах, ибо те направления, по которым ни одна из щелей не посылает света, не получают его и при двух щелях. Кроме того, однако, возможны направления, в которых колебания, посылаемые двумя щелями, взаимно уничтожаются. Это будут, очевидно, направления, которым соответствует разность хода  $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots$  для волн, идущих от соответственных точек обеих щелей. Такие направления определяются, как легко видеть из рисунка 2.2, условием:

$$MP = MN \cdot \sin \theta = \frac{1}{2} \lambda, \frac{3}{2} \lambda, \dots, \text{т.е.}$$

$$d \cdot \sin \theta = \frac{1}{2} \lambda, \frac{3}{2} \lambda, \frac{5}{2} \lambda, \dots \quad (2.1)$$

Наоборот, в направлениях, определяемых из условий

$$d \cdot \sin \theta = \lambda, 2\lambda, \dots, \quad (2.2)$$

действие одной щели усиливает действие другой, так что этим направлениям соответствуют главные максимумы. Таким образом, полная картина определяется из условий:

прежние минимумы  $b \cdot \sin \theta = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$ ;

добавочные минимумы  $d \cdot \sin \theta = \frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots$ ;

главные максимумы  $d \cdot \sin \theta = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$ ;

т.е. между двумя главными максимумами располагается один добавочный минимум. Расстояние между первичными минимумами (от одной щели) зависит от ширины щели  $b$ . Если  $b$  значительно меньше  $d$  (далекие и узкие щели), то между двумя первоначальными минимумами может расположиться значительное число новых минимумов и максимумов.

Кривая (рисунок 2.2) показывает распределение интенсивностей. Штриховая кривая соответствовала бы сложению интенсивностей обеих щелей, например, в том случае, если бы обе щели освещались некогерентными между собой световыми пучками. Сплошная кривая дает действительное распределение интенсивностей. Общие световые потоки сквозь щели, определяемые площадями, заключающимися между этими кривыми и осью абсцисс, должны, конечно, оставаться одинаковыми в обоих случаях.

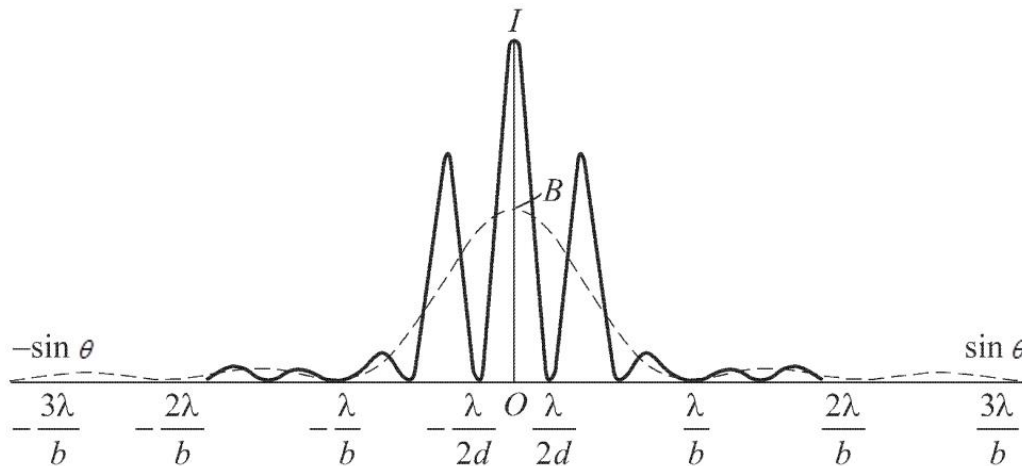


Рисунок 2.2 – Распределение интенсивности при дифракции на двух параллельных щелях шириной  $b$ , расположенных на расстоянии  $d$ : штриховая кривая относится к случаю освещения щелей некогерентным светом, сплошная — к освещению когерентным светом

При увеличении расстояния между щелями отдельные максимумы станут уже и чаще, но указанная площадь останется неизменной. Так как для одной щели центральный максимум гораздо интенсивнее боковых, то и при наличии двух одинаковых щелей почти весь свет сосредоточен в области центрального максимума, т.е. в пределах, определяемых условием  $\sin \theta = \pm \lambda/b$  (рисунок 2.2). Таким образом, угловая ширина основной дифракционной картины равна  $2\lambda/b$ .

Рассмотрение дифракции на двух щелях показывает, что в этом случае дифракционные максимумы становятся более узкими, чем в случае одной щели. Увеличение числа щелей делает это явление еще более отчетливым.

Повторяя предыдущее рассуждение, найдем, что между каждыми двумя главными максимумами ( $d \cdot \sin \theta = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$ ) при трех щелях располагаются два добавочных

минимума ( $d \cdot \sin \theta = \lambda/3, 2\lambda/3, 3\lambda/3, 5\lambda/3$  и т.д.), при четырех щелях — три добавочных минимума и т.д.

В общем случае  $N$  щелей ширины  $b$  с промежутками  $a$  (период решетки  $d = a + b$ ) имеем: прежние минимумы  $b \cdot \sin \theta = \lambda, 2\lambda, \dots$ ;

главные максимумы  $d \cdot \sin \theta = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$ ;

добавочные минимумы  $d \cdot \sin \theta = \lambda/N, 2\lambda/N, \dots, (N-1)\lambda/N, (N+1)\lambda/N, \dots$ ,

т.е. между двумя главными максимумами располагается  $(N-1)$  добавочных минимумов, разделенных вторичными максимумами.

Конечно, с увеличением числа щелей растет интенсивность главных максимумов, ибо возрастает количество пропускаемого решеткой света. Однако самое существенное изменение, вносимое большим числом щелей, состоит в превращении расплывчатых максимумов в резкие узкие максимумы, разделенные практически темными промежутками, ибо вторичные максимумы очень слабы: самый сильный из наблюдаемых вторичных максимумов составляет не более 5 % от главного. Резкость максимумов обеспечивает возможность надежно отличать близкие длины волн, для которых главные максимумы не будут перекрывать друг друга, что имеет место при расплывчатых максимумах, получающихся с одной щелью или малым числом их.

То обстоятельство, что в результате интерференции большого числа лучей мы получаем резкий переход (малое изменение направления  $\theta$ ) от максимума к соседнему минимуму. Когда все складывающиеся  $N$  лучей находятся в одной фазе, мы получаем максимум, соответствующий амплитуде  $s = Na$  результирующего колебания, где  $N$  — число интерферирующих лучей и  $a$  — амплитуда каждого из них. Для получения минимума необходимо, чтобы фаза последнего луча отличалась от фазы первого на  $2\pi$ . Следовательно, при наличии  $N$  лучей различие в фазе двух соседних лучей должно равняться  $2\pi/N$  (различие в разности хода  $\lambda/N$ ), т.е. быть тем меньше, чем больше  $N$ .

Таким образом, между каждыми двумя главными максимумами, соответствующими разности хода  $d \cdot \sin \theta = m\lambda$ , где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , лежат по  $(N-1)$  добавочных минимумов, определяемых разностью хода  $d \cdot \sin \theta = m\lambda + p\lambda/N$ , где  $p$  пробегает целые значения от 1 до  $(N-1)$ .

Для определения интенсивности света, распространяющегося в направлении, составляющем угол  $\theta$  с нормалью, воспользуемся принципом Гюйгенса-Френеля, который гласит, что каждая точка фронта (поверхности, достигнутой волной) является вторичным (т.е. новым) источником сферических волн. Огибающая фронтов волн всех вторичных источников становится фронтом волны в следующий момент времени. Выведенная общая формула, для определения интенсивности дифракции света на периодической структуре, имеет вид:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin U}{U} \right)^2 \cdot \frac{\sin(N\delta)^2}{\sin(\delta)^2}, \quad (2.3)$$

где  $U$  и  $\delta$  можно определить как:

$$U = \frac{\pi b}{\lambda} \sin(\theta), \quad (2.4)$$

$$\delta = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\theta), \quad (2.5)$$

где  $b$  — ширина щели;  $d$  — период решетки;  $\lambda$  — длина волны излучения.

### 3 РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ

В качестве расчетного задания необходимо сделать расчет угловых зависимостей распределения интенсивности света при дифракции на периодических структурах при длине волны света 532 нм и 633 нм. Считать, что на дифракционную структуру падает плоская световая волна в направлении к нормали ее плоскости. Дифракционная структура состоит прямоугольных щелей, количество щелей, ширина и расстояние между ними обговаривается преподавателем.

Для выполнения расчетного задания воспользуйтесь формулами 2.3-2.5. Исходные данные для двух вариантов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные для исследования дифракционных элементов

Длина волны света для формирования/зондирования	532 нм	633 нм
Ширина элемента	8 мкм	9 мкм
Толщина структуры	50 мкм	50 мкм
Расстояние между соседними элементами	8 мкм	9 мкм
Пространственный период	16 мкм	18 мкм
Число дифракционных элементов	для 20 шт.	для 20 шт.

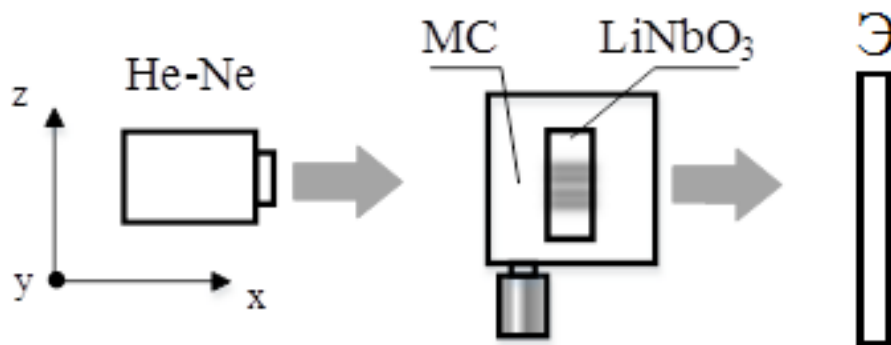
В качестве исследуемого образца, во всех экспериментах будет использоваться кристалл ниобата лития Y среза, поверхностно легированный железом и медью, геометрические размеры которого составляют  $8 \times 2 \times 17 \text{ мм}^3$  по осям X×Y×Z.

Используя исходные данные, представленные в таблице 3.1, необходимо выполнить расчетную часть, собрать экспериментальную установку, определить методику проводимого эксперимента. Подтвердить формирование фоторефрактивной решетки с заданным пространственным периодом.



#### 4 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В данной лабораторной работе предполагается исследовать уже сформированные дирекционные элементы в кристаллическом образце ниобата лития методом дифракции света. Экспериментальная установка для исследования дифракции в дальней зоне представлена на рисунке 4.1.



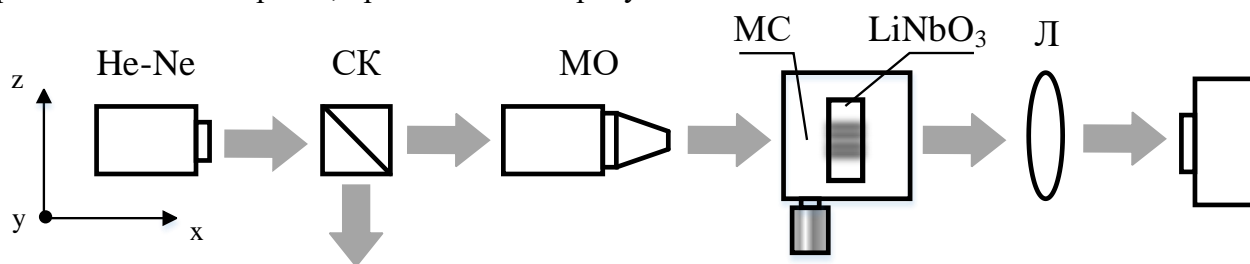
He-Ne – лазер; МС – микрометрический столик; LiNbO<sub>3</sub> – кристалл ниобата лития; Э – экран

Рисунок 4.1 – Схема для исследования полученных дифракционных элементов в кристаллическом образце.

Необходимо провести зондирование образца с использованием АЛП, цель которого получить картины распределения светового поля и распределения интенсивности на выходной грани кристалла ниобата лития.

Экспериментальная установка должна содержать источник лазерного излучения, микрообъектив, микрометрический столик с образцом LiNbO<sub>3</sub>, а также линзу для фокусировки полученного изображения на анализатор лазерных пучков.

Схема установки для исследования сформированных дифракционных элементов в кристаллическом образце, представлена на рисунке 4.2.



He-Ne – лазер; СК – светоделительный кубик; МО – микрообъектив; МС – микрометрический столик; LiNbO<sub>3</sub> – кристалл ниобата лития; Л – фокусная линза; АЛП – анализатор лазерных пучков

Рисунок 4.2 – Схема установки для зондирования образца.

Светоделительный кубик используется для отражения лазерного пучка от входной грани кристалла ниобата лития. По отраженному пучку можно добиться точной фокусировки лазерного пучка на грань кристаллического образца. В дальнейшем эксперимент проводился без светоделительного кубика. Микрометрический столик, на котором крепится держатель с образцом ниобата лития, имеет возможность смещать структуру в поперечном направлении относительно светового пучка с высокой точностью.

Методом дифракции можно получить пространственный период дифракционной решетки в дальней зоне. Для его определения необходимо воспользоваться формулой 4.1:

$$\sin \theta_m = \frac{m \cdot \lambda}{\Lambda}, \quad (4.1)$$

где,  $\theta_m$  - угол между нулевым и первым максимумами,  $\lambda$  - заданная длина волны излучения лазера,  $\Lambda$  - период дифракционной решетки.

## 5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Прежде чем приступить к выполнению экспериментальной части необходимо изучить теоретический раздел и выполнить расчетное задание.
2. Произвести зачистку кристаллического образца и всех оптических компонентов в экспериментальной установке (рисунок 4.1-4.2)
3. Собрать и настроить экспериментальную установку № 1 (рисунок 4.1). В качестве кристаллического образца использовать кристалл с уже сформированными дифракционными структурами.
4. Полученные на экране максимумы в дальней зоне зафиксировать, рассчитать угол дифракции и полученный пространственный период решетки исходя из условий.
5. Собрать и настроить экспериментальную установку № 2 (рисунок 4.2). Используя кристаллический образец с сформированной дифракционной решеткой необходимо получить изображение на выходной грани кристаллического образца с использованием He-Ne лазера и объектива. А также изображения интенсивности максимумов по осям при использовании анализатора лазерных пучков.
6. Сделать заключение. Составить отчет.

## 6 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по проделанной лабораторной работе должен содержать:

- Титульный лист;
- Введение (цель работы и краткое описание теоретических данных);
- Расчетную часть;
- Результаты работы:
  - 1. Изображение дифракционных максимумов в дальней зоне
  - 2. Расчет угла между нулевым и первым максимумами и соответствующий расчет пространственного периода дифракционной решетки.
  - 3. Полученное изображение на выходной грани кристаллического образца с использованием He-Ne лазера и объектива. Изображения интенсивности максимумов по осям при использовании анализатора лазерных пучков.
- Заключение.

На всех графиках необходимо указать соответствующие единицы измерения. Отчет должен соответствовать образовательному стандарту ОС ТУСУР 01-2013.

## 7 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Петров, М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. – С.Пб.: Наука, 1992. – 320 с.
2. Сидоров, Н. В. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны / Н. В. Сидоров, Т. Р. Волк, Б. Н. Маврин, В. Т. Калинин. – М.: Наука, 2003. – 255 с.
3. Ярив, А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
4. Шандаров, В. М. Основы физической и квантовой оптики / Шандаров, В. М. – Томск: ТУСУР, 2005. – 258 с.