

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

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

А.С. Перин, А.Д. Безпалый

## **Волноводная фотоника и нанооптика: лабораторный практикум**

Учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по направлению  
подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль  
«Оптические системы связи и обработки информации»

Томск  
2021

**УДК** 621.391.1.519.8(075.8)

**ББК** 32.88-01я73

П 274

**Рецензент:**

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

**Перин, Антон Сергеевич**

П 274 Волноводная фотоника и нанооптика: лабораторный практикум: учеб. метод. пособие /  
А.С. Перин, А.Д. Безпальный – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники,  
2021. – 26 с.

Данное учебно-методическое пособие является частью учебно-методического комплекса и предназначено для подготовки и проведения лабораторных работ по дисциплине «Волноводная фотоника и нанооптика». В пособии содержится необходимый теоретический материал, методические рекомендации для выполнения лабораторных работ, а также варианты заданий для самостоятельного выполнения. Пособие содержит описание четырех лабораторных работ.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 11.04.02 "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", профиль «Оптические системы связи и обработки информации».

Одобрено на заседании каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники,  
протокол № 8 от 27.05.2021

УДК 621.391.1.519.8(075.8)

ББК 32.88-01я73

© Перин А.С., Безпальный А.Д., 2021

© Томск. гос. ун-т систем упр.

и радиоэлектроники, 2021

## Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	4
1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ФОРМИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР В НИОБАТЕ ЛИТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОМЕРНЫХ АМПЛИТУДНЫХ ТРАНСПАРАНТОВ.....	5
1.1 Введение.....	5
1.2 Элементы теории.....	5
1.3 Расчетное задание .....	9
1.4 Содержание работы.....	11
1.5 Порядок выполнения лабораторной работы.....	12
1.6 Содержание отчета.....	12
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР В НИОБАТЕ ЛИТИЯ.....	13
2.1 Введение.....	13
2.2 Элементы теории.....	13
2.3 Расчетное задание .....	16
2.4 Содержание работы.....	17
2.5 Порядок выполнения лабораторной работы.....	18
2.6 Содержание отчета.....	18
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ $LiNbO_3$ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ .....	19
3.1 Введение.....	19
3.2 Элементы теории.....	19
3.3 Описание экспериментальных установок.....	20
3.4 Порядок выполнения работы .....	21
3.5 Содержание отчета.....	22
3.6 Контрольные вопросы .....	22
4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ОПТИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫХ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ $LiNbO_3$ .....	23
4.1 Введение.....	23
4.2 Описание экспериментальных установок.....	23
4.3 Порядок выполнения работы .....	24
4.4 Содержание отчета.....	25
4.5 Контрольные вопросы .....	25
Список рекомендуемой литературы.....	26

## Предисловие

Дисциплина «Волноводная фотоника и нанооптика» изучается студентами направления 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» профиля подготовки «Оптические системы связи и обработки информации» в 1 семестре и входит в модуль направленности (профиля) подготовки.

Данное учебно-методическое пособие является частью учебно-методического комплекса и предназначено для подготовки и проведения лабораторных работ. В пособии содержатся необходимый теоретический материал, методические рекомендации для выполнения лабораторных работ, описание экспериментальных установок, методик проведения экспериментов, расчетное и лабораторное задания, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Пособие содержит описание четырёх лабораторных работ. Первая работа посвящена исследованию процессов формирования одномерных фазовых дифракционных элементов в фоторефрактивном кристалле ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), с использованием одномерных амплитудных транспарантов. Во второй работе исследуются характеристики сформированных в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  фазовых дифракционных элементов. В третьей работе проводится экспериментальное исследование формирования фотонных волноводных элементов в фоторефрактивном кристалле  $\text{LiNbO}_3$  высокоинтенсивным лазерным излучением. Четвёртая лабораторная работа посвящена экспериментальному исследованию сформированных фотонных волноводных элементов в фоторефрактивном кристалле  $\text{LiNbO}_3$ .

Лабораторные работы выполняются на экспериментальных установках. Каждая установка состоит оптической платформы и установленных на ней лазерных источников излучения, оптомеханических и оптических элементов.

Лабораторный практикум предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистров 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль «Оптические системы связи и обработки информации».

# 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## Формирование дифракционных структур в ниобате лития с использованием одномерных амплитудных транспарантов

### 1.1 Введение

**Цель работы:** исследование процессов формирования одномерных фазовых дифракционных элементов в фоторефрактивном ниобате лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), с использованием одномерных амплитудных транспарантов.

В современном мире технологии передачи и обработки информации оптическими методами развиваются очень стремительно. Современные научные достижения позволяют совершенствовать существующие технологии по разработке систем оптической связи, оптической памяти и оптических сенсоров. Одно из фундаментальных свойств оптических волн – дифракция – положено в основу работы многих оптических устройств и систем. Чтобы добиться высокой дифракционной эффективности, обеспечить управление условиями дифракции света, в настоящее время активно используются фоторефрактивные кристаллы.

Объектом исследования в данной работе является фоторефрактивный кристаллический образец ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) с оптически индуцированными одномерными дифракционными элементами. Кристаллы ниобата лития широко используются в интегральной и нелинейной оптике благодаря уникальному сочетанию нелинейно-оптических, механических, электрооптических, акустооптических и пироэлектрических свойств. При воздействии лазерного излучения в этом материале могут формироваться дифракционные и волноводные элементы, представляющие значительный интерес для создания полностью оптических компонентов фотоники.

Для формирования дифракционных элементов в кристаллическом образце ниобата лития будет использован однолучевой метод записи, с использованием одномерных амплитудных транспарантов с различными пространственными периодами.

### 1.2 Элементы теории

#### Фоторефрактивный эффект в электрооптических кристаллах

Фоторефрактивный эффект (ФРЭ) или эффект фоторефракции заключается в изменении показателя преломления диэлектрических или полупроводниковых материалов под действием света. Впервые он был обнаружен в 1965 году в электрооптических кристаллах (в ниобате лития) при проведении экспериментов в области нелинейной оптики. В подобных кристаллах с течением времени наблюдался эффект искажения пространственной структуры световых пучков, и значительно возрастала интенсивность рассеяния излучения. Было ясно, что причиной данных явлений служили индуцированные световым полем в кристалле оптические неоднородности. Сначала данный эффект рассматривался как паразитное явление. Затем было выявлено, что эффект наведенных оптических неоднородностей обладает свойством реверсивности, поскольку оптическая однородность кристаллов восстанавливалась в результате нагревания до температуры около  $170\text{ }^\circ\text{C}$  либо их экспозиции в течение некоторого времени при однородном освещении. Такая реверсивность указывала на возможность использования эффекта фоторефракции в качестве механизма голографической записи в кристаллах ниобата лития и некоторых других электрооптических кристаллах. Дальнейшие исследования показали, что фоторефрактивный эффект проявляется, если в рассматриваемой среде развиваются следующие элементарные процессы (рисунок 1.2.1).

1. Фотовозбуждение носителей электрического заряда с донорных примесных центров в запрещенной зоне под действием света, что приводит к появлению электронов в зоне

- проводимости, либо фотовозбуждение валентных электронов с их захватом на примесные акцепторные уровни, что приводит к появлению дырок в валентной зоне.
2. Пространственное перераспределение носителей заряда вследствие тепловой диффузии либо их дрейфа в приложенном к кристаллу внешнем электрическом поле. Дрейф носителей может быть обусловлен также фотовольтаическим эффектом.
  3. Захват носителей заряда в неосвещенных областях кристалла ловушками и формирование вследствие этого неоднородного поля пространственного электрического заряда.
  4. Пространственная модуляция показателя преломления кристалла полем пространственного заряда вследствие линейного электрооптического эффекта.

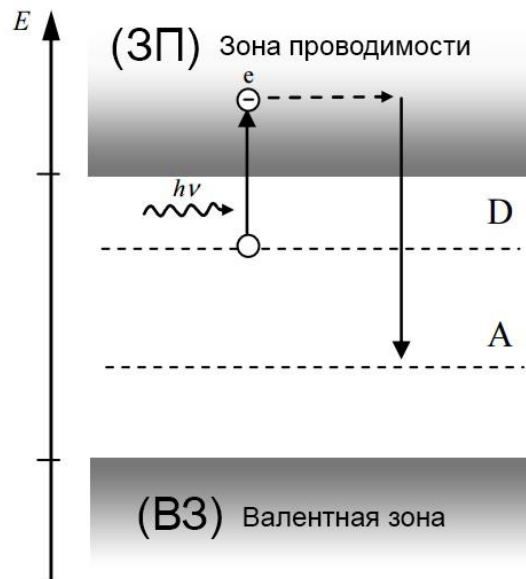


Рисунок 1.2.1 – Схема фоторефрактивных эффектах [1]

Предполагается, что некоторые доноры и все акцепторы ионизированы. В отсутствии светового излучения основным механизмом, пополняющим зону проводимости электронами, является тепловое возбуждение. Динамическое равновесие между теплогенерацией электронов и их обратной рекомбинацией определяет концентрацию свободных электронов, которая в большинстве случаев является однородной по объему кристалла величиной или ее флуктуациями можно пренебречь.

Попадание светового излучения в фотопроводящий кристалл приводит к возникновению в нем дополнительных (фотоиндуцированных) пар электронов и ионизированных доноров. Фотоиндуцированные электроны, диффундировавшие в слабоосвещенные области, захватываются там акцепторами. В то же время, ионизированные доноры не могут двигаться, являясь частью кристаллической решетки, что ведет к локальным нарушениям электронейтральности. Возникает так называемый пространственный заряд, плотность распределения которого неоднородна и повторяет распределение интенсивности света. Нескомпенсированный заряд приводит к появлению электрического поля, называемого полем пространственного заряда, которое, в свою очередь, модулирует показатель преломления кристалла за счет линейного электрооптического эффекта.

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  $\text{LiNbO}_3$

## Дифракционная решетка

Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (канавок, щелей, выступов), нанесённых тем или иным способом на плоскую или вогнутую оптическую поверхность. Дифракционная решетка используется в спектральных приборах в качестве диспергирующей системы для пространственного разложения электромагнитного излучения в спектр. Фронт световой волны, падающей на дифракционную решетку, разбивается её штрихами на отдельные когерентные пучки, которые, претерпев дифракцию на штрихах, интерферируют, образуя результирующее пространственное распределение интенсивности света – спектр излучения.

Существуют отражательные и пропускающие дифракционные решетки. На первых штрихи нанесены на зеркальную (металлическую) поверхность, и результирующая интерференционная картина образуется в отражённом от решётки свете. На вторых штрихи нанесены на прозрачную (стеклянную) поверхность, и интерференционная картина образуется в проходящем свете.

Хорошая дифракционная решетка должна обладать малым периодом и большим числом полосок. В современных решетках число это превышает 100 000 (ширина решетки до 100 мм, число полосок до 1200 на 1 мм). Полоски должны быть строго параллельными между собой, и ширина полосок каждого сорта (прозрачных и непрозрачных) строго одинакова (равенство ширины прозрачной и непрозрачной полосок не обязательно). Существенно, чтобы период решетки  $\Lambda$  был постоянен.

Исследования формирования дифракционных решеток очень актуальны в наше время. Основные работы по исследованию дифракционных структур в кристалле ниобата лития основываются на формировании решеток с помощью одного источника излучения. На рисунке 1.2.2, представлена дифракционная решетка, сформированная на длине волны 532 нм.



Рисунок 1.2.2 – Картина светового поля на выходной плоскости дифракционной решетки с числом элементов 50

## Способы формирования дифракционных элементов

Ниже приведены возможные схемы записи дифракционных элементов. На рисунке 1.2.3 показана схема, где два когерентных пучка света под определенным углом пересекаются в определенной области. В этой области пересечения располагается кристалл  $\text{LiNbO}_3$  для формирования в нем дифракционной структуры. Достоинство данной схемы записи – это получение интерференционной картины с заданным периодом, путем изменения угла пересечения пучков.

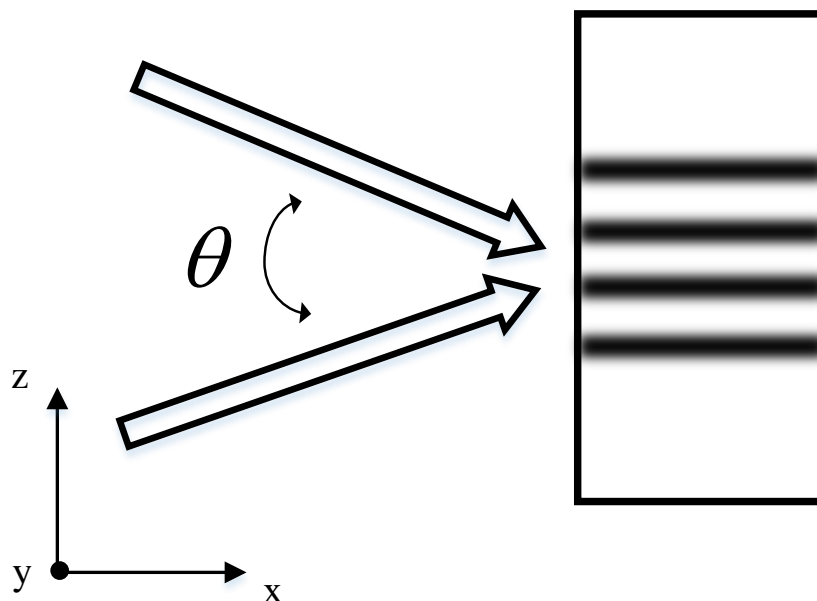


Рисунок 1.2.3 – Двухлучевая схема записи дифракционной структуры в кристалле  $\text{LiNbO}_3$

На схеме (рисунок 1.2.4) широким пучком освещается амплитудная маска (АМ) – амплитудный транспарант с нанесенными на ней прозрачными и непрозрачными полосами определенного периода. Перед началом формирования дифракционных элементов на АМ необходимо подобрать решетку с периодом, который будет соответствовать техническому заданию. Сам же кристалл  $\text{LiNbO}_3$  необходимо максимально близко разместить к АМ, чтобы уменьшить потери и сохранить ступенчатый вид распределения интенсивности.

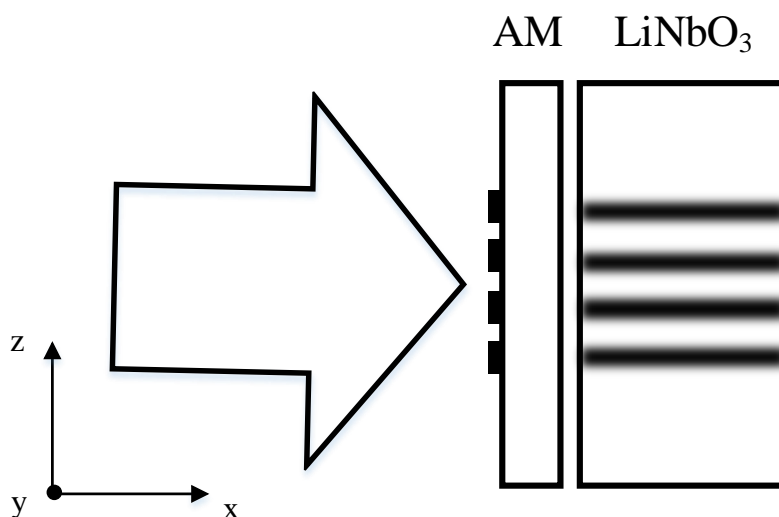


Рисунок 1.2.4 – Однолучевая схема записи дифракционной структуры в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  с использованием амплитудной маски

Этот метод является более простым в исполнении, нежели двухлучевой метод. Основными достоинствами однолучевых схем с амплитудным транспарантом являются возможности:

- получения профилей показателя преломления дифракционных элементов, близких к ступенчатому;
- создания дифракционной структуры с непериодической топологией, задаваемой структурой АМ и распределением интенсивности светового пучка;



- масштабирования профиля интенсивности индуцирующего светового поля с помощью линзы.

Для масштабирования распределения интенсивности индуцирующего излучения применяется схема записи (рисунок 1.2.5) аналогична предыдущей, за исключением того, что используется линза, с помощью которой изображение с необходимым масштабом дифракционной структуры проецируется на кристалл LiNbO<sub>3</sub>.

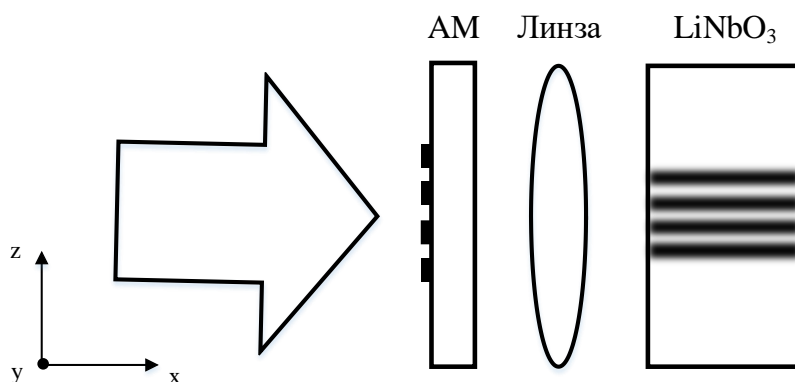


Рисунок 1.2.5 – Однолучевая проекционная оптическая схема записи дифракционной структуры в кристалле LiNbO<sub>3</sub>

### 1.3 Расчетное задание

Одной из важнейших характеристик дифракционных структур, оптически индуцированных в фоторефрактивных кристаллах, является дифракционная эффективность.

**Задание 1.** В рамках расчетного задания необходимо провести расчет дифракционной эффективности решетки полагая, что дифракция света происходит на разных длинах волн. Дифракционная структура имеет толщину 5; 10; 30; 50 мкм. Пространственные периоды дифракционной решетки имеют значения 40, 18, 8 мкм. Величина изменения показателя преломления варьируется от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$ . Для сравнения необходимо построить график зависимости дифракционной эффективности от изменения амплитуды первой гармоники при заданных параметрах при разных длинах волн – 633 нм, 532 нм, 450 нм.

#### Краткие теоретические сведения

Дифракционная эффективность определяется выражением:

$$\eta = \frac{I_{\delta}}{I_{\delta} + I_n}, \quad (1.2.1)$$

где  $I_{\delta}$  – интенсивность дифрагированного светового пучка;

$I_n$  – интенсивность прошедшего светового пучка.

Связь дифракционной эффективности решетки с ее параметрами определяется формулой Когельника:

$$\eta = \sin^2 \frac{\pi L \Delta n}{\lambda \cos(\theta)}, \quad (1.2.2)$$

где  $L$  – толщина решетки,  $\Delta n$  – максимальное изменение показателя преломления,  $\lambda$  – длина волны света,  $\theta$  – угол Брэгга. Соответственно, для оценки величины  $\Delta n$  в решетке используем соотношение:

$$\Delta n = \frac{\lambda \cos(\theta) \arcsin(\sqrt{\eta})}{\pi L}. \quad (1.2.3)$$

Данные соотношения справедливы, если дифракция соответствует дифракции Брэгга. В случае дифракции Рамана-Ната величина дифракционной эффективности для максимума порядка  $m$  может быть найдена из соотношения:

$$\eta_m = J_m^2(\delta) = J_m^2\left(\frac{2\pi L \Delta n_0}{\lambda \cos \vartheta}\right), \quad (1.2.4)$$

где  $J_m(\delta)$  – функция Бесселя;  $\cos \vartheta$  – косинус угла между направлениями распространения дифрагировавшего в  $\pm 1$  порядок пучка и пучка, прошедшего решетку.

Условие, соответствующее режиму дифракции Рамана-Ната (1.2.5) и Брэгга (1.2.6):

$$\frac{\lambda L}{2n\Lambda^2} < 1, \quad (1.2.5)$$

$$\frac{\lambda L}{2n\Lambda^2} \gg 1, \quad (1.2.6)$$

где  $n$  – показатель преломления. Для  $\text{LiNbO}_3$ :

$$n_o = 2,2967; n_e = 2,2082 \text{ при } \lambda=633 \text{ нм};$$

$$n_o = 2,3232; n_e = 2,2336 \text{ при } \lambda=532 \text{ нм};$$

$$n_o = 2,3725; n_e = 2,2755 \text{ при } \lambda=457 \text{ нм}.$$

На практике фоторефрактивная нелинейность кристалла ниобата лития является насыщаемой, следовательно, величина изменения показателя преломления при фоторефрактивном эффекте не может превышать некоторое значение  $\Delta n$ . В этом случае временная зависимость  $\Delta n(t)$  может быть выражена в виде:

$$\Delta n(t) = \Delta n [1 - \exp(-t / \tau)], \quad (1.2.7)$$

где  $\tau$  – постоянная, характеризующая скорость формирования фоторефрактивной дифракционной решетки.

Соответственно, временная зависимость дифракционной эффективности такой решетки в процессе ее формирования определяется соотношением:

$$\eta(t) = \sin^2 \left( A \cdot [1 - \exp(-t / \tau)] \right), \quad (1.2.8)$$

где основной характер зависит от величины коэффициента  $A$ , который определяется, как:

$$A = \frac{\pi L \Delta n}{\lambda \cos(\theta)}. \quad (1.2.9)$$

**Задание 2.** При заданных параметрах расчетного задания, используя формулы 1.2.8 и 1.2.9 постройте график зависимости дифракционной эффективности от времени записи дифракционной решетки в фоторефрактивном кристалле. Для наглядности представления возьмите различные значения параметра  $A$ : 0,1; 0,5; 1,5; 3; 5; 10.

## 1.4 Содержание работы

В данной лабораторной работе необходимо сформировать одномерные дифракционные структуры в кристалле ниобата лития и в процессе экспонирования кристалла исследовать дифракционную эффективность полученной периодической структуры. Формирование дифракционной решетки в кристаллическом образце можно добиться различными способами, один из которых предполагает использование амплитудного транспаранта. Поэтому экспериментальная установка должна содержать источник когерентного лазерного излучения, амплитудный транспарант, рядом с которым необходимо разместить и зафиксировать образец кристалла ниобата лития.

Для записи дифракционных структур в кристалле ниобата лития в качестве источника излучения используется твердотельный непрерывный  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  лазер LCS-DTL-317 с длиной волны лазерного излучения  $\lambda=532$  нм. Схема экспериментальной установки, для формирования дифракционных структур с использованием амплитудного транспаранта приведена на рисунке 1.4.1.

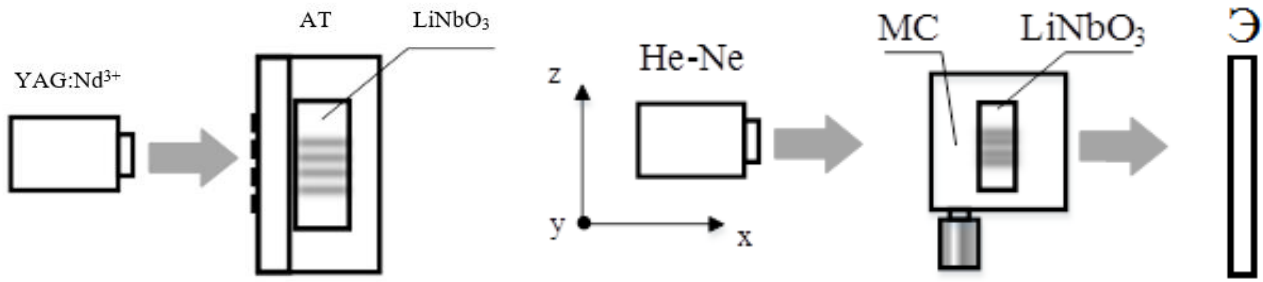


Схема № 1 установки по формированию дифракционных структур

Схема № 2 установки для зондирования образца

$\text{YAG:Nd}^{3+}$  – непрерывный твердотельный лазер с удвоением частоты;  
 АТ – амплитудный транспарант;  $\text{LiNbO}_3$  – кристалл ниобата лития; He-Ne – лазер; МС – микрометрический столик; Э – экран

Рисунок 1.4.1 – Схемы экспериментальных установок

Амплитудный транспарант располагается на оптическом столике в зафиксированном положении, рядом с дифракционной решеткой располагается кристаллический образец ниобата лития. Расстояние между АТ и кристаллом должно быть минимальным.

Во второй части работы необходимо получить изображение дифракционной картины в дальней зоне и выполнить исследование дифракционной эффективности.

Экспериментальная установка должна содержать источник лазерного излучения, микрометрический столик с образцом  $\text{LiNbO}_3$ , а также экран для фиксирования основных максимумов дифракции.

Схема установки для исследования сформированных дифракционных элементов в кристаллическом образце, представлена на рисунке 4.1.

Микрометрический столик, на котором крепится держатель с образцом ниобата лития, имеет возможность смещать структуру в поперечном направлении относительно светового пучка с высокой точностью.

## 1.5 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Прежде чем приступить к выполнению экспериментальной части необходимо изучить теоретический раздел и выполнить расчетное задание.

2 Согласовать с преподавателем основные условия и параметры проводимых экспериментов.

3 Провести очистку кристаллического образца и всех оптических компонентов, применяемых в экспериментальной установке.

4 Собрать и настроить экспериментальную установку № 1 (рисунок 1.4.1), провести эксперимент по формированию дифракционных структур в кристаллическом образце ниобата лития.

5 Собрать и настроить экспериментальную установку № 2 (рисунок 1.4.1), осветить широким пучком He-Ne лазера кристаллический образец. Зафиксировать изображение дифракционных максимумов в дальней зоне.

6 Вместо экран разместить фотодиод и зафиксировать интенсивность основных максимумов дифракции.

7 Используя основные соотношения методического пособия выполнить расчет дирекционной эффективности и оценить значение показателя преломления.

8 Сделать заключение. Составить отчет.

## 1.6 Содержание отчета

Отчет по проделанной лабораторной работе должен содержать:

- Титульный лист;
- Введение (цель работы и краткое описание теоретических данных);
- Расчетную часть;
- Результаты работы:
  - Схемы экспериментальных установок;
  - Условия (параметры) проводимого эксперимента (длина волны излучения, мощность лазерного излучения, время записи дифракционных структур, параметры светоделительного кубика/ ахромата, микрообъектива/ линзы)
  - Изображения дифракционных максимумов в дальней зоне;
  - Расчет дифракционной эффективности и оценка значения изменения показателя преломления.
- Заключение.

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

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Исследование характеристик дифракционных структур в ниобате лития

#### 2.1 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, созданными 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.

#### 2.2 Элементы теории

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 2.2.1. Положение дифракционных максимумов и минимумов не будет зависеть от положения щели, так как 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, так как надо принять в расчет взаимную интерференцию волн, идущих от первой и второй щелей.

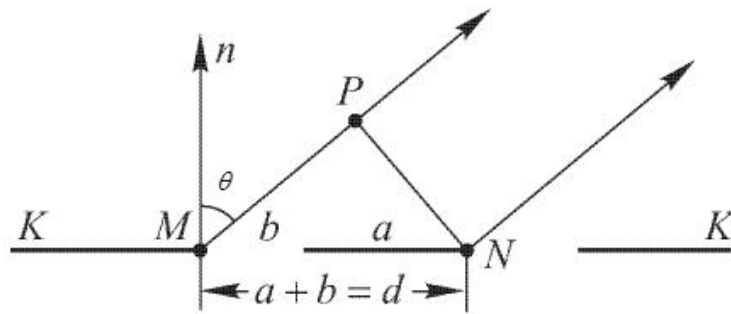


Рисунок 2.2.1 – К определению положения главных максимумов и добавочных минимумов при дифракции на двух параллельных щелях

Предположим, что мы прорезали в перегородке КК (рисунок 2.2.1) две щели шириной  $b$ , разделенные непрозрачным промежутком  $a$ , так что  $a + b = d$ . Очевидно, что минимумы будут на прежних местах, так как 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 2.2.2, условием:

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

т.е.

$$d \cdot \sin \theta = \frac{1}{2} \lambda, \frac{3}{2} \lambda, \frac{5}{2} \lambda, \dots \tag{1.2.1}$$

Наоборот, в направлениях, определяемых из условий

$$d \cdot \sin \theta = \lambda, 2\lambda, \dots, \tag{1.2.2}$$

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 2.2.2) показывает распределение интенсивностей. Штриховая линия 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.

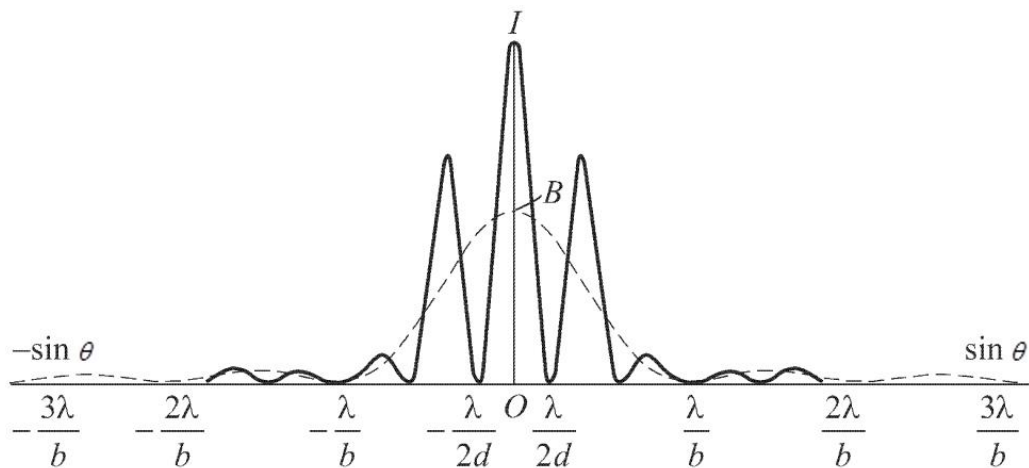


Рисунок 2.2.2 – Распределение интенсивности при дифракции на двух параллельных щелях шириной  $b$ , расположенных на расстоянии  $d$ : штриховая кривая относится к случаю освещения щелей некогерентным светом, сплошная – к освещению когерентным светом

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 2.2.2). 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:

$$I = I_0 \left( \frac{\sin U}{U} \right)^2 \cdot \frac{\sin(N\delta)^2}{\sin(\delta)^2}, \quad (2.2.3)$$

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

$$U = \frac{\pi b}{\lambda} \sin(\theta), \quad (2.2.4)$$

$$\delta = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot \sin(\theta), \quad (2.2.5)$$

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

### 2.3 Расчетное задание

Необходимо выполнить расчет угловых зависимостей распределения интенсивности света при дифракции на периодических структурах при длине волны света 532 нм и 633 нм. Считать, что на дифракционную решетку падает плоская световая волна в направлении к нормали ее плоскости. Дифракционная решетка состоит прямоугольных щелей, количество щелей, ширина и расстояние между ними обговаривается преподавателем.

Для выполнения расчетного задания воспользуйтесь формулами 2.2.3-2.2.5. Исходные данные для двух вариантов представлены в таблице 2.3.1.

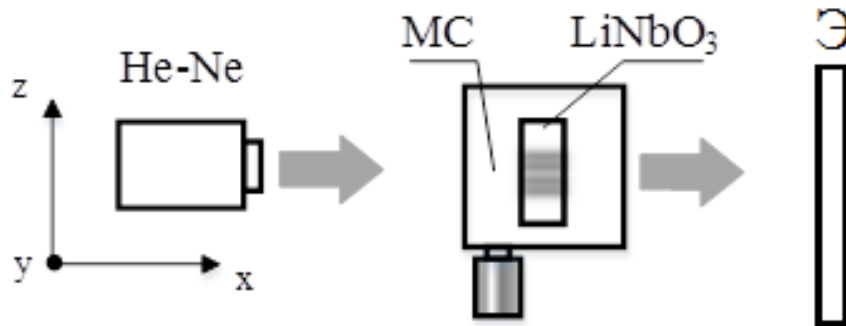
Таблица 2.3.1 – Исходные данные для исследования дифракционных элементов

Длина волны, $\lambda$	532 нм	633 нм
Ширина элемента, $a$	8 мкм	9 мкм
Толщина решетки, $L$	50 мкм	50 мкм
Ширина щели, $b$	8 мкм	9 мкм
Период решетки, $d$	16 мкм	18 мкм
Число щелей, $N$	20	20



## 2.4 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 2.4.1.



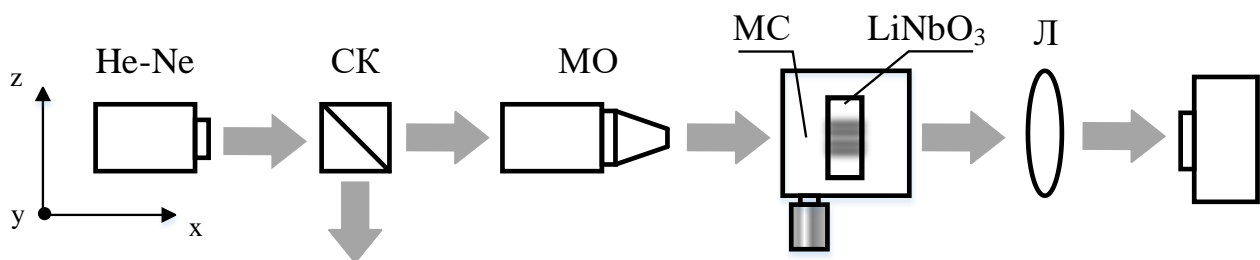
He-Ne – лазер; МС – микрометрический столик; LiNbO<sub>3</sub> – кристалл ниобата лития; Э – экран

Рисунок 2.4.1 – 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 2.4.2.



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 2.4.2 – 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 2.4.1:

$$\sin \theta_m = \frac{m \cdot \lambda}{\Lambda}, \quad (2.4.1)$$

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

## 2.5 Порядок выполнения лабораторной 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 2.4.1-2.4.2)
3. Собрать и настроить экспериментальную установку №1 (рисунок 2.4.1). 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 2.4.2). 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.

## 2.6 Содержание отчета

Отчет по проделанной лабораторной работе должен содержать следующие пункты:

- Титульный лист;
- Введение (цель работы и краткое описание теоретических данных);
- Расчетную часть;
- Результаты работы:
  - изображение дифракционных максимумов в дальней зоне
  - расчет угла между нулевым и первым максимумами и соответствующий расчет пространственного периода дифракционной решетки.
  - 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.

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

## Формирование фотонных волноводных элементов в фоторефрактивном кристалле $\text{LiNbO}_3$ лазерным излучением

### 3.1 Введение

Цель работы: экспериментальное исследование формирования фотонных волноводных элементов в фоторефрактивном кристалле  $\text{LiNbO}_3$  высокоинтенсивным лазерным излучением.

### 3.2 Элементы теории

Фотонные волноводные элементы в кристалле ниобата лития могут формироваться лазерным излучением благодаря явлению фоторефракции, которое заключается в изменении показателя преломления материала под действием света. К числу наиболее известных фоторефрактивных материалов относится ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ), легированный некоторыми примесями, например, ионами Fe, Cu, Rh, Co, Ce, а также их комбинациями. Легирование кристаллов может осуществляться в процессе их выращивания, однако повышение концентрации вводимых примесей ограничено ухудшением механических свойств объемных образцов вследствие возрастания числа дефектов и возникновения упругих напряжений. Современные технологии твердотельной или термической диффузии, ионного обмена и ионной имплантации позволяют значительно повысить степень легирования поверхностного слоя материала, дополнительно делая возможным введение разных примесей (или их комбинаций) в разные области поверхности образца. Результатом является возможность варьирования физических свойств приповерхностной области материала в широких пределах.

Фоторефрактивная чувствительность  $\text{LiNbO}_3$  максимальна в сине-зеленой области видимого спектра, поэтому наиболее эффективным является оптическое индуцирование фотонных элементов излучением соответствующего диапазона длин волн  $\lambda = 450 \div 570$  нм.

Фоторефрактивный эффект является результатом нескольких последовательно развивающихся процессов:

а) фотовозбуждения носителей электрического заряда, например, электронов, с энергетических уровней активных примесных центров в запрещенной зоне, в зону проводимости;

б) перераспределения фотовозбужденных носителей в пространстве вследствие тепловой диффузии, под действием внешнего электрического поля или вследствие фотовольтаического эффекта;

в) захвата носителей заряда в неосвещенных областях глубокими ловушечными центрами и, в результате, появления электрического поля пространственного заряда;

г) модуляции показателя преломления среды полем пространственного электрического заряда вследствие линейного электрооптического эффекта.

Величина локального изменения показателя преломления материала  $\Delta n$  при фоторефрактивном эффекте определяется величиной поля пространственного заряда  $E_{sc}$  и соответствующих электрооптических коэффициентов  $r_{ij}$ :

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_{o,e}^3 \cdot r_{i3} \cdot E_{sc}, \quad (3.2.1)$$

где  $E_{sc}$  – величина поля пространственного заряда ( $20 \div 30$  кВ/см);  $r_{i3}$  – электрооптический коэффициент:

- для волны с обыкновенной поляризацией  $r_{13} = 8,6 \cdot 10^{-12}$  м/В;

- для волны с необыкновенной поляризацией  $\gamma_{33} = 30,8 \cdot 10^{-12}$  м/В;  
 $n_{o,e}$  – показатель преломления  $\text{LiNbO}_3$ :

$$n_o = 2,2967; n_e = 2,2082 \text{ при } \lambda=633 \text{ нм};$$

$$n_o = 2,3232; n_e = 2,2336 \text{ при } \lambda=532 \text{ нм};$$

$$n_o = 2,3725; n_e = 2,2755 \text{ при } \lambda=457 \text{ нм}.$$

При этом для  $\text{LiNbO}_3$  основной механизм пространственного перераспределения носителей заряда – это фотовольтаический ток. Он обусловлен асимметрией элементарных актов фотовозбуждения носителей заряда и их захвата ловушками в неосвещенных областях. Особенностью данного механизма является его проявление в условиях пространственной однородности интенсивности света и отсутствия внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу, что существенно упрощает экспериментальные методики. Величина фоторефрактивного изменения показателя преломления в  $\text{LiNbO}_3$ , легированном железом или медью, в насыщении может достигать уровня  $\Delta n_s = 10^{-3}$ , а поле пространственного заряда – максимального значения  $E_{sc} = 10^5$  В/см при воздействии излучения в диапазоне 0,4-0,6 мкм [7].

### 3.3 Описание экспериментальных установок

Схема экспериментальной установки №1 для определения диаметра светового пучка на выходе лазера представлена на рисунке 3.3.1.

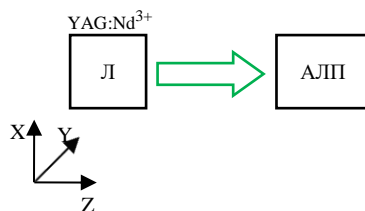


Рисунок 3.3.1 – Структурная схема экспериментальной установки №1 для определения диаметра светового пучка на выходе лазера. Л – лазер; АЛП – анализатор лазерных пучков

Схема экспериментальной установки №2 для определения диаметра экспонирующего светового пучка представлена на рисунке 3.3.2.

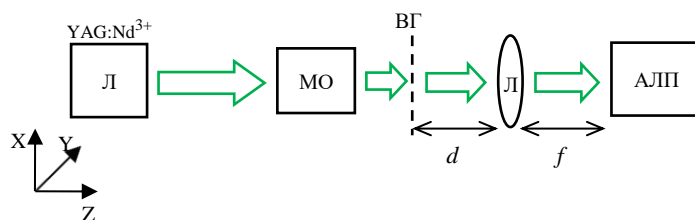


Рисунок 3.3.2 – Структурная схема экспериментальной установки №2 для определения диаметра экспонирующего светового пучка. Л – лазер; МО – микрообъектив; ВГ – входная грань образца; Л – линза; АЛП – анализатор лазерных пучков

Для точного определения диаметра пучка, необходимо, чтобы АЛП выдавал изображение в масштабе 1:1. Настройку масштаба можно осуществить, воспользовавшись формулой тонкой линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad (3.3.1)$$

где  $d$  – расстояние от входной грани кристалла (ВГ) до линзы (Л);  $f$  – расстояние от линзы до анализатора лазерных пучков;  $F$  – фокусное расстояние линзы.

Схема экспериментальной установки №3 для формирования оптически индуцированных волноводных структур в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  представлена на рисунке 3.3.3.

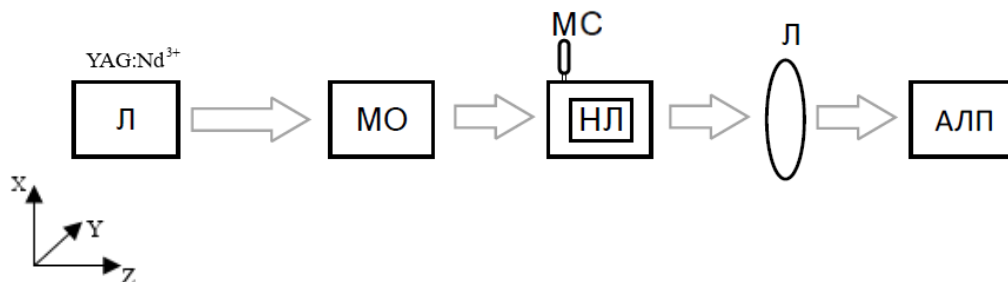


Рисунок 3.3.3 – Структурная схема экспериментальной установки №3 для формирования оптически индуцированных волноводных структур в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ . Л – лазер; МО – микрообъектив; МС – микрометрический столик; НЛ – образец ниобата лития; Л – линза; АЛП – анализатор лазерных пучков

Источником излучения является  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  лазер, работающий в непрерывном режиме с длиной волны света  $\lambda=532$  нм. Фокусировка излучения на поверхности кристалла осуществляется путем ее совмещения с фокальной плоскостью микрообъектива (МО). Изображение на выходной грани кристалла, передаваемое линзой (Л), регистрируется АЛП, позволяющим контролировать процесс экспонирования в кристаллическом образце. Оптические волноводы формируются путем поточечного экспонирования поверхности  $\text{LiNbO}_3$  при смещении образца относительно фокусированного светового пучка. Между экспонированными областями в виде узких полосок, ориентированными в направлении оси X, формируется оптический волновод.

### 3.4 Порядок выполнения работы

3.4.1 Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с теоретической частью и элементами экспериментальной установки. Студенты допускаются к работе преподавателем после ответов на контрольные вопросы.

3.4.2 Включить лазер, повернув ключ на положение «ON», дождаться зеленого сигнала над кнопкой «Pumping», после чего нажать на нее. После завершения накачки установить мощность лазер на минимальный показатель «0,1 мВт». Далее можно приступить к сборке и настройке экспериментальной установки №1.

3.4.3 Определить с помощью АЛП диаметр пучка  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  лазера по уровню  $1/e^2$  от максимальной интенсивности.

3.4.4 Собрать и настроить экспериментальную установку №2 и определить диаметр фокусированного экспонирующего пучка по уровню  $1/e^2$ .

3.4.5 Оценить диаметр фокусированного экспонирующего пучка  $d$  по формуле:

$$d = \frac{\lambda}{D} \cdot F, \quad (3.4.1)$$

где  $D$  – диаметр пучка  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  лазера;  $\lambda$  – длина волны экспонирующего излучения;  $F$  – фокусное расстояние линзы.

3.4.6 Промоделировать распределение суммарной интенсивности излучения внутри кристалла при его поточечном экспонировании фокусированным пучком, используя выражения:

$$I_n(x) = I_0 \exp(-(x - (n-1) \cdot l)^2), \quad (3.4.2a)$$

$$I_{sum}(x) = I_1 + I_2 + \dots + I_n, \quad (3.4.2a)$$

где  $I_n$  – интенсивность n-того пучка,  $I_{sum}$  – суммарная интенсивность,  $l$  – сдвиг между центрами пучков (мкм).

Оценить суммарную интенсивность  $I_{sum}$ , произведя нормировку и определив, тем самым, расстояние  $l$  между центрами последовательно перекрывающихся точек (рисунок 3.4.1).

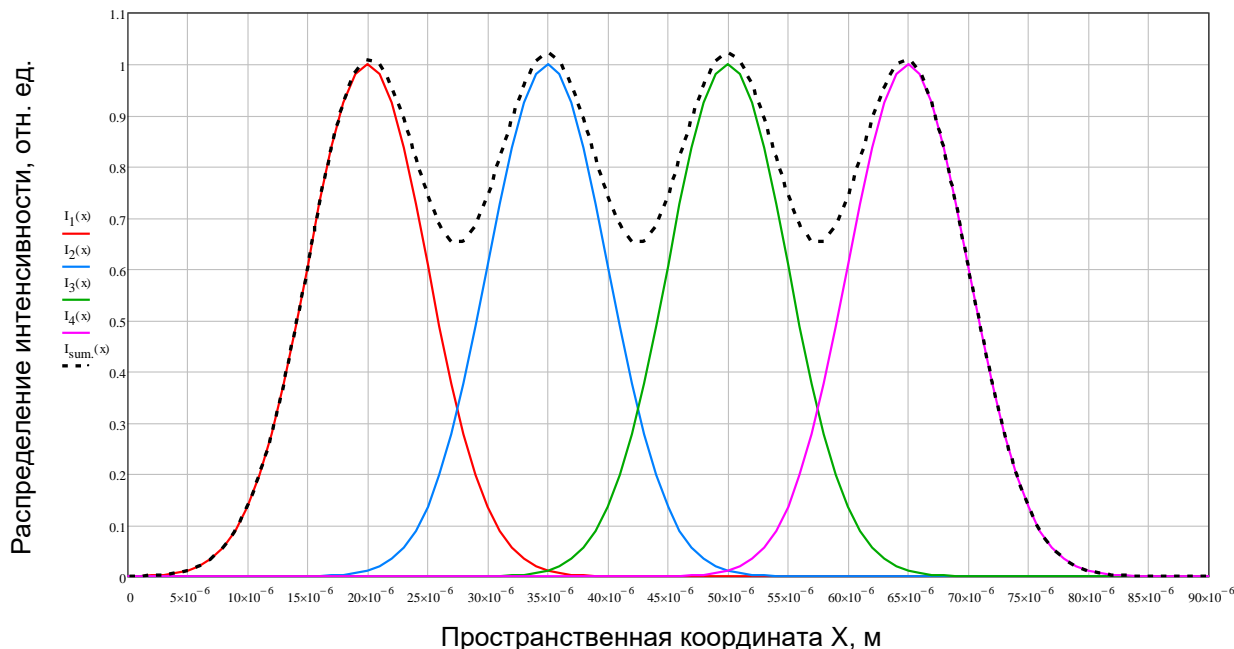


Рисунок 3.4.1 – Пример распределения суммарной интенсивности излучения  $I_{sum}(x)$  внутри кристалла для фокусированного пучка с диаметром  $d = 20$  мкм по уровню  $1/e^2$  максимальной интенсивности при расстоянии между центрами последовательно перекрывающихся точек  $l = 15$  мкм

3.4.7 Собрать и настроить экспериментальную установку №3 и приступить к экспонированию образца (время экспонирования каждой точки задается преподавателем для каждого варианта отдельно).

### 3.5 Содержание отчета

1. Название работы, цель работы, и схемы экспериментальных установок с полным описанием работы.
2. Результаты расчетов и моделирования.
3. Результаты эксперимента по экспонированию образца.
4. Выводы.

### 3.6 Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление фоторефракции?
2. Как влияет обыкновенная и необыкновенная поляризация на  $\Delta n$ ?
3. Как зависит изменение профиля показателя преломления от времени экспонирования?
4. Каковы достоинства и недостатки поточечного индуцирования волноводных структур в кристалле  $\text{LiNbO}_3$ ?

## 4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Исследование характеристик фотонных волноводных элементов, оптически индуцированных в фоторефрактивном кристалле $\text{LiNbO}_3$

#### 4.1 Введение

Цель работы: экспериментальное исследование оптически сформированных фотонных волноводных элементов в фоторефрактивном кристалле  $\text{LiNbO}_3$ .

#### 4.2 Описание экспериментальных установок

Схема экспериментальной установки №1 для определения диаметра зондирующего светового пучка представлена на рисунке 4.3.1.

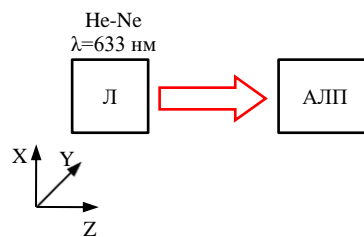


Рисунок 4.3.1 – Структурная схема экспериментальной установки №1 для определения диаметра зондирующего светового пучка. Л – лазер; АЛП – анализатор лазерных пучков

Схема экспериментальной установки №2 для зондирования экспонированных областей параллельным пучком представлена на рисунке 4.3.2.

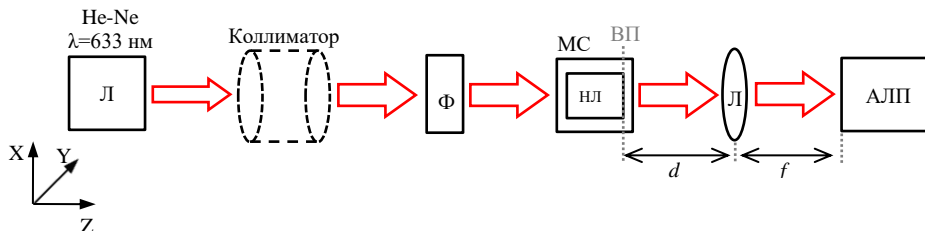


Рисунок 4.3.2 – Структурная схема экспериментальной установки №2 для зондирования экспонированных областей параллельным пучком. Л – лазер; Ф – световой фильтр; К – коллиматор; МС – микрометрический столик; НЛ – образец ниобата лития; АЛП – анализатор лазерных пучков

Далее следует процесс зондирования сформированных волноводных структур. Источником излучения является He-Ne лазер с длиной волны  $\lambda=633$  нм и выходной мощностью  $P \approx 1$  мВт. Световая картина на выходной грани образца фиксируется анализатором лазерных пучков (АЛП), который позволяет определить размеры сформированной волноводной структуры в поперечном и продольном направлениях. Для точного определения размеров экспонированных областей, необходимо, чтобы АЛП выдавал изображение в масштабе 1:1. Настройку необходимого масштаба можно осуществить, воспользовавшись формулой тонкой линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (4.3.1)$$

где  $d$  – расстояние между выходной плоскостью кристалла (ВП) и линзой (Л);  $f$  – расстояние от линзы до анализатора лазерных пучков;  $F$  – фокусное расстояние линзы.

### 4.3 Порядок выполнения работы

4.4.1 Включить He-Ne лазер. Собрать экспериментальную установку №1. Определить диаметр зондирующего пучка  $d$  по уровню  $1/e^2$  максимальной интенсивности  $I_{max}$ , как показано на рисунке 4.4.1.

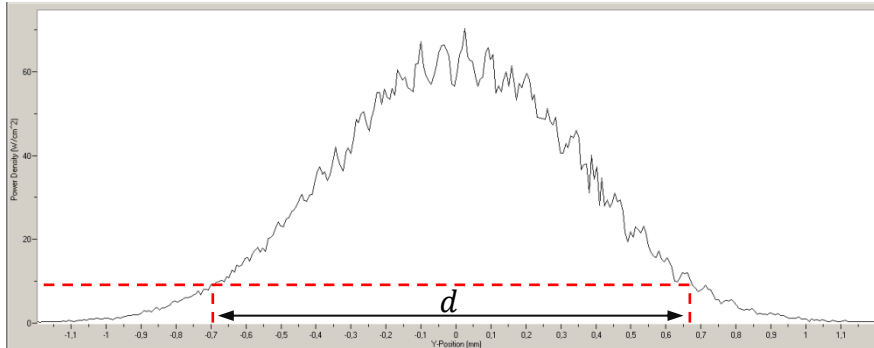


Рисунок 4.4.1 – Пример оценки диаметра зондирующего пучка  $d$  при помощи АЛП

4.4.2 Выполнив пункт 4.4.1, собрать и настроить экспериментальную установку №2. Приступить к зондированию экспонированных областей на поверхности кристалла.

4.4.3 Оценить, как показано на рисунке 4.4.2, поперечные и продольные размеры волноводной структуры  $h_{BC}$  и  $l_{BC}$ , отдельно определить ширину экспонированных областей  $d_{э0}$  и волноводной области  $d_{в0}$ , где  $2d_{э0} + d_{в0} = h_{BC}$ .

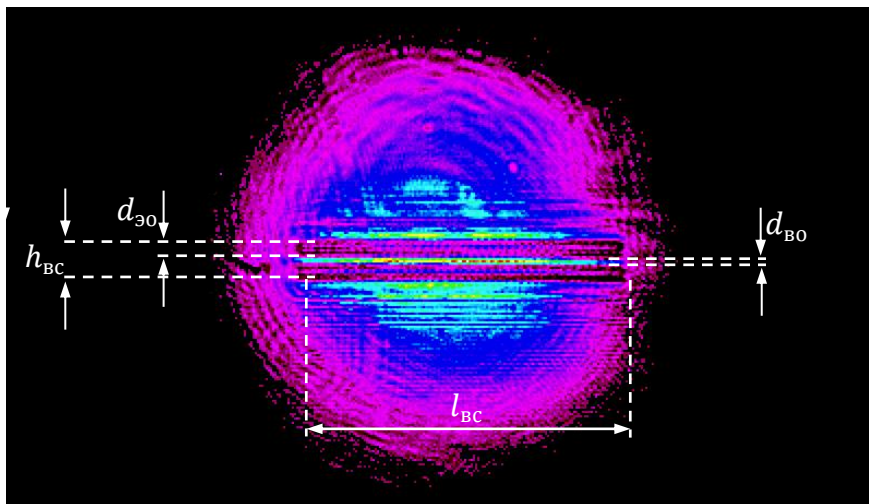


Рисунок 4.4.2 – Пример оценки поперечных и продольных размеров волноводной структуры

4.4.4 Оценить изменение показателя преломления в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  по соотношению (3.2.1) для волн с обыкновенной и необыкновенной поляризацией.

4.4.5 Определить глубину экспонированных областей  $L_{э0}$ , прозондировав экспериментальный образец с торца.

4.4.6 Составить таблицу со следующими характеристиками волноводной структуры: ширина экспонированной области  $d_{э0}$ , ширина волноводной области  $d_{в0}$ , длина и ширина волноводной структуры  $l_{BC}$  и  $h_{BC}$ , глубина экспонированных областей  $L_{э0}$ , показатель преломления экспонированных и волноводной областей  $n_{э0}$ ,  $n_{в0}$ .



## 4.4 Содержание отчета

- 1 Название работы, цель работы, и схемы экспериментальных установок с полным описанием работы.
- 2 Результаты зондирования волноводных структур с оценкой поперечных и продольных размеров.
- 3 Результаты оценки изменения показателя преломления  $\Delta n$  в  $\text{LiNbO}_3$ .
- 4 Таблица с характеристиками волноводной структуры.
- 5 Выводы.

## 4.5 Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление фоторефракции?
2. Запишите выражение для изменения показателя преломления среды при  $\Delta n$  обыкновенной и необыкновенной поляризации внешнего излучения.
3. Какому виду должна соответствовать поляризация при экспонировании и зондировании кристалла и почему?
4. Как зависит изменение профиля показателя преломления от времени экспонирования?

## Список рекомендуемой литературы

- 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.
- 5 Ландсберг, Г. С. Оптика. Учебное пособие: для вузов / Г. С. Ландсберг – 6 изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
- 6 Герасимов, Ф. М. Современные дифракционные решетки / Ф. М. Герасимов // Оптико-механическая промышленность. – 1965. – № 10. – С. 33.
- 7 Стурман, Б. И. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления / Б. И. Стурман, В. М. Фридкин. – М.: Наука, 1992. – 208 с.