

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

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

А.С. Перин

**ФОРМИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОМЕРНЫХ АМПЛИТУДНЫХ ТРАНСПАРАНТОВ**

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 Формирование дифракционных структур в ниобате лития с использованием одномерных амплитудных транспарантов: методические указания по выполнению лабораторной работы / А.С. Перин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 14 с.

Даны указания по исследованию процессов формирования одномерных фазовых дифракционных элементов в фоторефрактивном кристалле ниобата лития с использованием одномерных амплитудных транспарантов.

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	9
4 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	11
5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	12
6 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА	13
7 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	14

1 ВВЕДЕНИЕ

Цель работы: исследование процессов формирования одномерных фазовых дифракционных элементов в фоторефрактивном ниобате лития (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 (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.

2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

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 °С 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.

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.

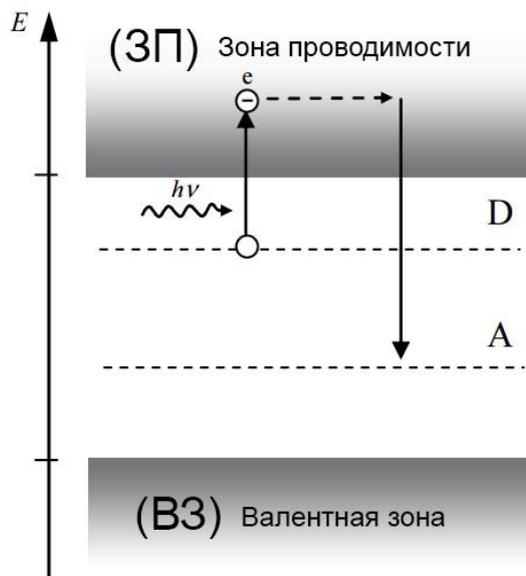


Рисунок 2.1 – Схема фоторефрактивного эффекта [1]

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 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 Λ 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 2.2, представлена дифракционная решетка, сформированная на длине волны 532 нм.

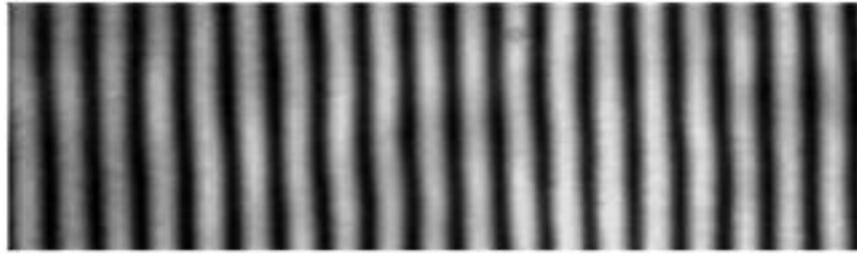


Рисунок 2.2 – Картина светового поля на выходной плоскости дифракционной решетки с числом элементов 50

Способы формирования дифракционных элементов

Ниже приведены возможные схемы записи дифракционных элементов. На рисунке 2.3 показана схема, где два когерентных пучка света под определенным углом пересекаются в определенной области. В этой области пересечения располагается кристалл LiNbO_3 для формирования в нем дифракционной структуры. Достоинство данной схемы записи – это получение интерференционной картины с заданным периодом, путем изменения угла пересечения пучков.

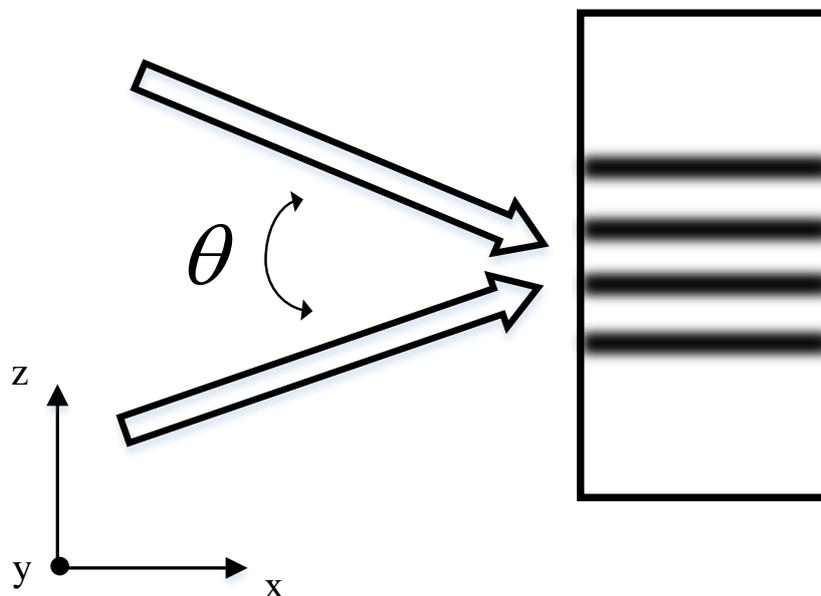


Рисунок 2.3 – Двухлучевая схема записи дифракционной структуры в кристалле LiNbO_3

На схеме (рисунок 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 LiNbO_3 необходимо максимально близко разместить к АМ, чтобы уменьшить потери и сохранить ступенчатый вид распределения интенсивности.

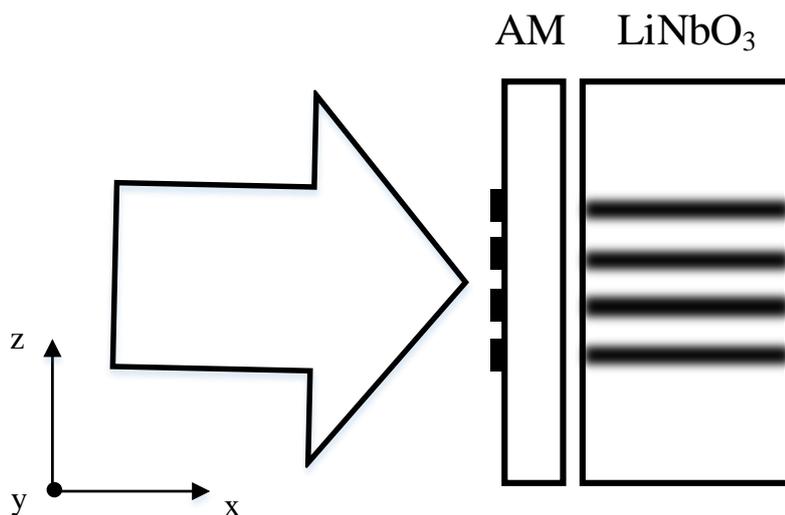


Рисунок 2.4 – Однолучевая схема записи дифракционной структуры в кристалле LiNbO_3 с использованием амплитудной маски

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 неперiodической 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 2.5) аналогична предыдущей, за исключением того, что используется линза, с помощью которой изображение с необходимым масштабом дифракционной структуры проецируется на кристалл LiNbO_3 .

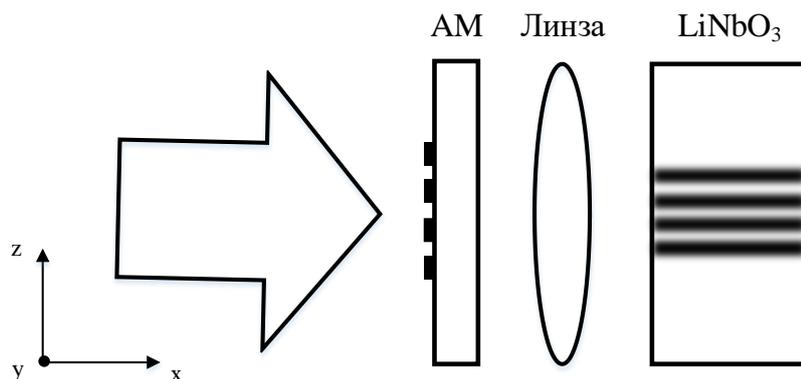


Рисунок 2.5 – Однолучевая проекционная оптическая схема записи дифракционной структуры в кристалле LiNbO_3

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:

$$\eta = \frac{I_o}{I_o + I_n}, \quad (3.1)$$

где I_o – интенсивность дифрагированного светового пучка;

I_n – интенсивность прошедшего светового пучка.

Связь дифракционной эффективности решетки с ее параметрами определяется формулой Когельника:

$$\eta = \sin^2 \frac{\pi L \Delta n}{\lambda \cos(\theta)}, \quad (3.2)$$

где L – толщина решетки, Δn – максимальное изменение показателя преломления, λ – длина волны света, θ – угол Брэгга. Соответственно, для оценки величины Δn в решетке используем соотношение:

$$\Delta n = \frac{\lambda \cos(\theta) \arcsin(\sqrt{\eta})}{\pi L}. \quad (3.3)$$

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:

$$\eta_m = J_m^2(\delta) = J_m^2\left(\frac{2\pi L \Delta n_0}{\lambda \cos \vartheta}\right), \quad (3.4)$$

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

Условие, соответствующее режиму дифракции Рамана-Ната (3.5) и Брэгга (3.6):

$$\frac{\lambda L}{2n\Lambda^2} < 1, \quad (3.5)$$

$$\frac{\lambda L}{2n\Lambda^2} \gg 1, \quad (3.6)$$

где n – показатель преломления материала (для ниобата лития LiNbO_3 $n = 2,2864$ при $\lambda=633$ нм; $n = 2,3232$ при $\lambda=532$ нм; $n = 2,3789$ при $\lambda=450$ нм).

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

$$\Delta n(t) = \Delta n [1 - \exp(-t / \tau)], \quad (3.7)$$

где τ – постоянная, характеризующая скорость формирования фоторефрактивной дифракционной решетки.

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

$$\eta(t) = \sin^2 (A \cdot [1 - \exp(-t / \tau)]), \quad (3.8)$$

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

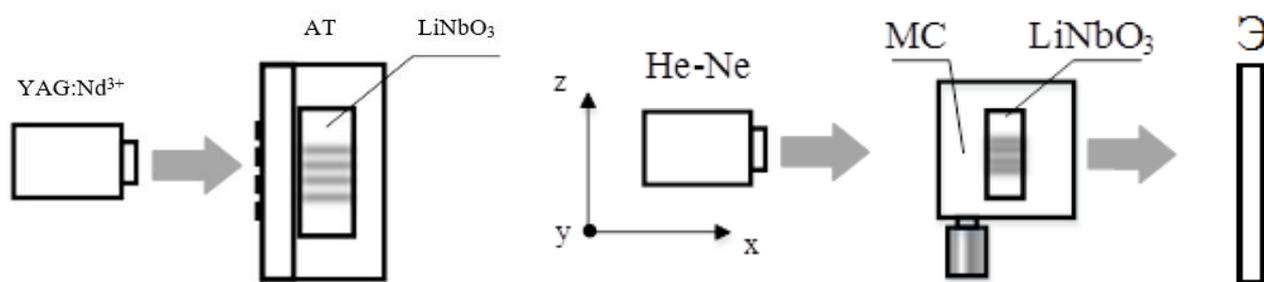
$$A = \frac{\pi L \Delta n}{\lambda \cos(\theta)}. \quad (3.9)$$

Задание 2. При заданных параметрах расчетного задания, используя формулы 3.8 и 3.9 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.

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 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 4.1.



1. Схема установки по формированию дифракционных структур

2. Схема установки для зондирования образца

YAG:Nd^{3+} – непрерывный твердотельный лазер с удвоением частоты;
АТ – амплитудный транспарант; LiNbO_3 – кристалл ниобата лития; He-Ne – лазер; МС – микрометрический столик; Э – экран

Рисунок 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 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.

5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ 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 4.1), провести эксперимент по формированию дифракционных структур в кристаллическом образце ниобата лития.
5. Собрать и настроить экспериментальную установку № 2 (рисунок 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.

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.

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.