

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)

**ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ  $\text{LiNbO}_3$   
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Томск  
2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой СВЧ и КР

\_\_\_\_\_ С.Н. Шарангович

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2017 г.

**ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ  $\text{LiNbO}_3$   
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Методические указания к лабораторной работе для магистрантов  
направления подготовки 11.04.02 – Инфокоммуникационные технологии и  
системы связи, дисциплина «Волноводная фотоника и нанооптика»

Разработчики:

Магистрант группы 155-М

\_\_\_\_\_ Безпальный А.Д.

Профессор каф. СВЧиКР

\_\_\_\_\_ Шандаров В.М.

Томск  
2017 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ.....	4
2 ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ .....	4
3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК .....	6
4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	8
5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА .....	9
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	10
7 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	10
Приложение А .....	11

## 1 ВВЕДЕНИЕ

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

## 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  $r_{ij}$ :

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_{o,e}^3 \cdot r_{iz} \cdot E_z.$$

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 и медью, может достигать уровня  $\Delta n = 10^{-3}$ , а поле пространственного заряда значения  $E_{sc} = 20 \div 100$  кВ/см.

### 3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Схема экспериментальной установки №1 для определения диаметра светового пучка на выходе лазера представлена на рисунке 2.1.

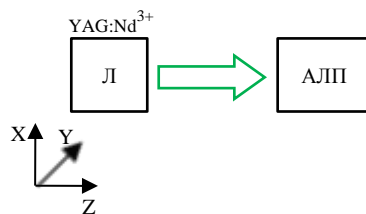


Рисунок 2.1 – Структурная схема экспериментальной установки №1 для определения диаметра светового пучка на выходе лазера. Л – лазер; АЛП – анализатор лазерных пучков

Схема экспериментальной установки №2 для определения диаметра экспонирующего светового пучка представлена на рисунке 2.2.

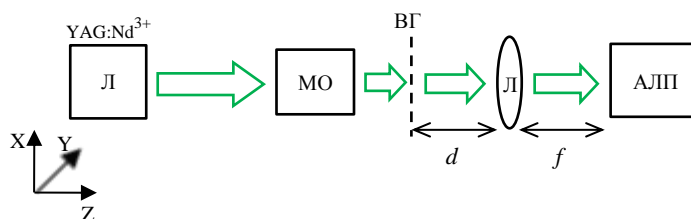


Рисунок 2.2 – Структурная схема экспериментальной установки №2 для определения диаметра экспонирующего светового пучка. Л – лазер; МО – микрообъектив; ВГ – входная грань образца; Л – линза; АЛП – анализатор лазерных пучков

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

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

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 канальных волноводных структур в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  представлена на рисунке 2.3.

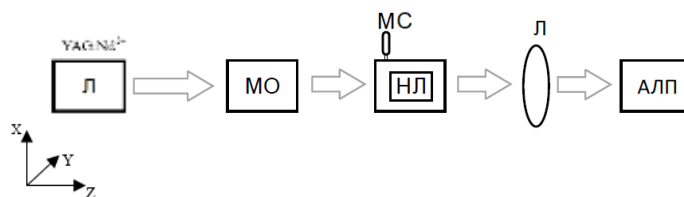


Рисунок 2.3 – Структурная схема экспериментальной установки №3 для формирования оптически индуцированных канальных волноводных структур в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ . Л – лазер; МО – микрообъектив; МС – микрометрический столик; НЛ – образец ниобата лития; Л – линза; АЛП – анализатор лазерных 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 канальный оптический волновод.

## 4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

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.

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 «0,01 мВт». Далее можно приступать к сборке и настройке экспериментальной установки 1.

4.3 Определить с помощью АЛП диаметр пучка YAG:Nd<sup>3+</sup> лазера.

4.4 Собрать и настроить экспериментальную установку №2 и определить диаметр фокусированного экспонирующего пучка.

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

$$d = \frac{\lambda}{D} \cdot F,$$

где  $D$  – диаметр пучка YAG:Nd<sup>3+</sup> лазера;  $\lambda$  – длина волны экспонирующего излучения;  $F$  – диаметр линзы, фокусирующей экспонирующее излучение.

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

$$I_m(x) = [\exp(-(x - (n - 1) \cdot l)^2)]^2,$$

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

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

Оценить суммарную интенсивность, произведя нормировку и определив, тем самым, расстояние  $l$  между центрами последовательно перекрывающихся точек (рисунок 4.1).



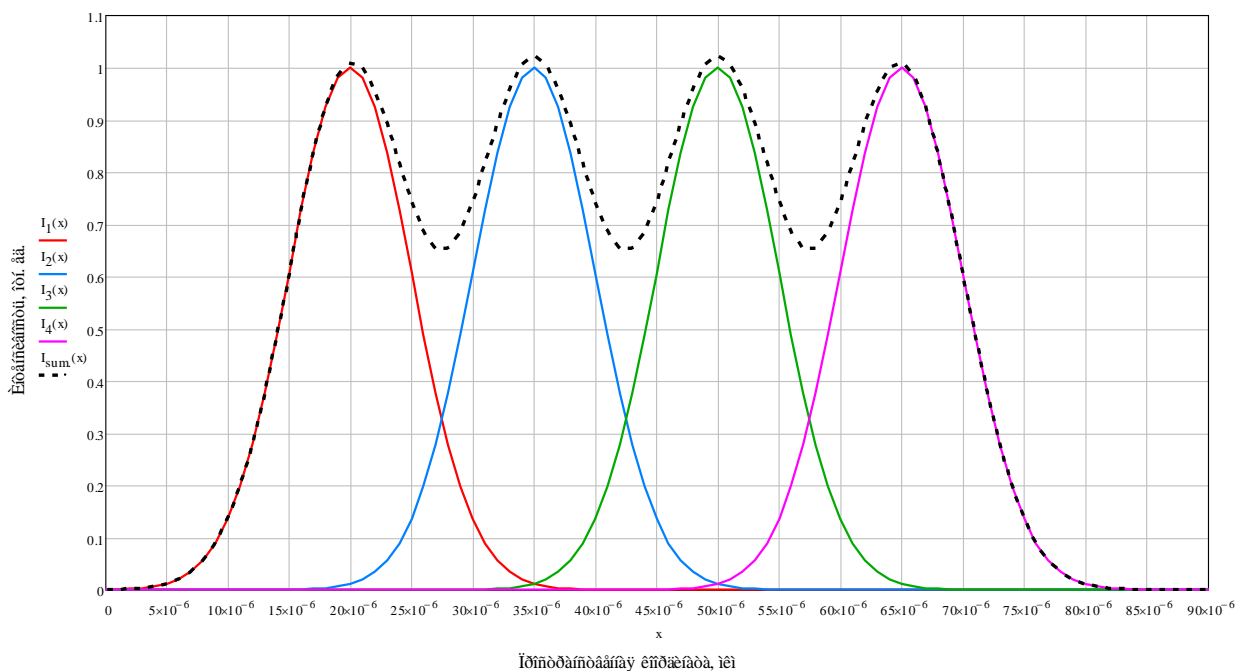


Рисунок 4.1 – Пример распределения суммарной интенсивности излучения  $I_{sum}(x)$  внутри кристалла для фокусированного пучка с диаметром  $d = 16$  мкм по уровню половинной интенсивности при расстоянии между центрами последовательно перекрывающихся точек  $l = 15$  мкм

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

## 5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

5.1 Название работы, цель работы, и схемы экспериментальных установок с полным описанием работы (схемы и описание установок должны соответствовать логической цепочке действий).

5.2 Результаты расчетов и моделирования. Сравнить результаты с экспериментами (соблюдая логическую последовательность выполнения расчетов и экспериментов).

5.3 Результаты зондирования волноводных структур с оценкой поперечных и продольных размеров.

5.4 Результаты вычисления изменения показателя преломления  $\Delta n$  в  $\text{LiNbO}_3$ .

5.5 Выводы

## 6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1 В чем заключается явление фоторефракции?

6.2 Как влияет обыкновенная и необыкновенная поляризация на  $\Delta n$ ?

6.3 Как зависит изменение профиля показателя преломления от времени экспонирования?

6.4 Каковы достоинства и недостатки поточечного индуцирования канальных волноводных структур в кристалле  $\text{LiNbO}_3$ ?

## 7 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

7.1 А. Ярив, П. Юх. Оптические волны в кристаллах. – М.: Мир, 1987. – 616 с.

7.2 Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. – СПб.: Наука. С.-Петербургское отделение, 1992. – 320 с.

**Приложение А**

(Пример оформления отчета)

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образованияТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)**ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ  $\text{LiNbO}_3$   
ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**Отчет к лабораторной работе №3 по дисциплине  
«Волноводная фотоника и нанооптика»

Выполнили:

Студенты группы 155-М

\_\_\_\_\_ Большанин Г.И.

\_\_\_\_\_ Еремеева А.А.

\_\_\_\_\_ Ефимова Е.В.

\_\_\_\_\_ Незнанова О.В.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Проверил:

Профессор каф. СВЧиКР

\_\_\_\_\_ Шандаров В.М.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Томск  
2016 г.

## 1 Введение

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

## 2 Ход работы

Явление фоторефракции, заключающееся в изменении показателя преломления материала под действием света, позволяет формировать фотонные волноводные элементы в кристаллах ниобата лития и других фоторефрактивных материалов. Фоторефрактивная чувствительность  $\text{LiNbO}_3$  максимальна в сине-зеленой области видимого спектра, поэтому наиболее эффективным является оптическое индуцирование фотонных волноводных элементов излучением соответствующему диапазону длин волн  $\lambda = 450 \div 570$  нм.

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

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_{o,e}^3 \cdot r_{i3} \cdot E_3, \quad (2.1)$$

где  $E_3$  – величина внешнего поля (20÷30 кВ/см);

$r_{i3}$  – электрооптический коэффициент:

- для обыкновенной поляризации  $r_{13} = 8,6 \cdot 10^{-10} \text{ см/В}$ ;
- для необыкновенной поляризации  $r_{33} = 30,8 \cdot 10^{-10} \text{ см/В}$ ;

$n_{o,e}$  – показатель преломления материала:

- для излучения с  $\lambda = 532 \text{ нм}$  при обыкновенной поляризации  $n_o = 2,2$ ;
- для излучения с  $\lambda = 532 \text{ нм}$  при необыкновенной поляризации  $n_e = 2,24$ .

Для обыкновенной поляризации :

$$\Delta n = -\frac{1}{2} \cdot 2,2^3 \cdot 8,6 \cdot 10^{-10} \cdot 25 \cdot 10^3 = 1,145 \cdot 10^{-4}.$$

Для необыкновенной поляризации:

$$\Delta n = -\frac{1}{2} \cdot 2,24^3 \cdot 30,8 \cdot 10^{-10} \cdot 25 \cdot 10^3 = 4,327 \cdot 10^{-4}.$$

При выполнении данной работы в качестве источника излучения использовался YAG:Nd<sup>3+</sup> лазер, работающий в непрерывном режиме с длиной волны света  $\lambda = 532$  нм.

Для определения диаметра светового пучка на выходе лазера, используем экспериментальную установку, схема которой представлена на рисунке 2.1. Включив лазер и после завершения накачки установили мощность лазера на минимальный показатель 0,01 мВт.

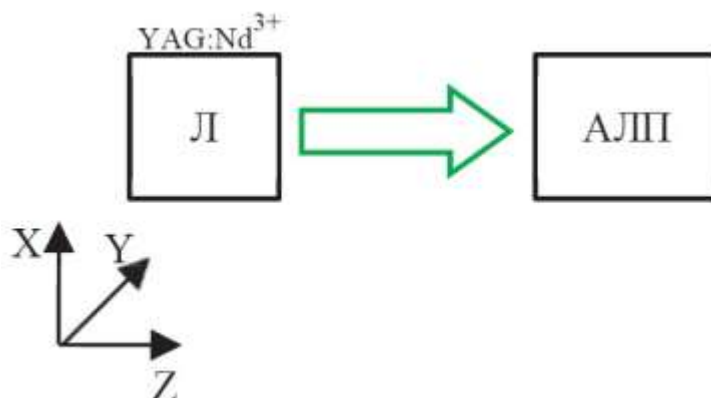


Рисунок 2.1 – Структурная схема установки для определения диаметра светового пучка на выходе лазера, где Л – лазер; АЛП – анализатор лазерных пучков

На рисунке 2.2 приведена картина поля светового пучка на выходе лазера, полученная с помощью анализатора световых пучков.

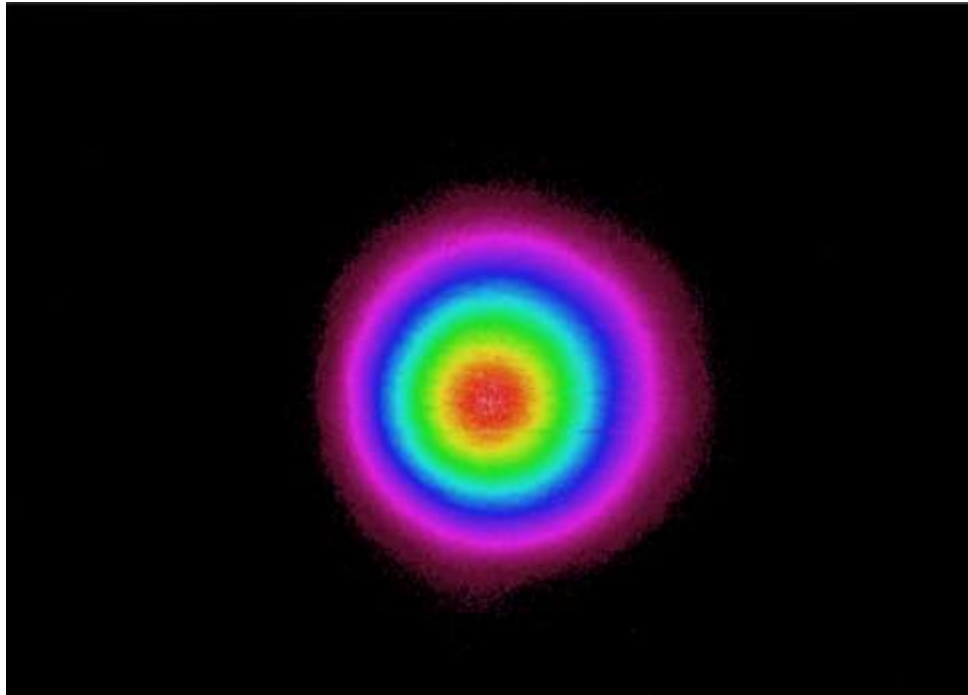


Рисунок 2.2 – Изображение светового пучка на выходе лазера, полученное с помощью АЛП

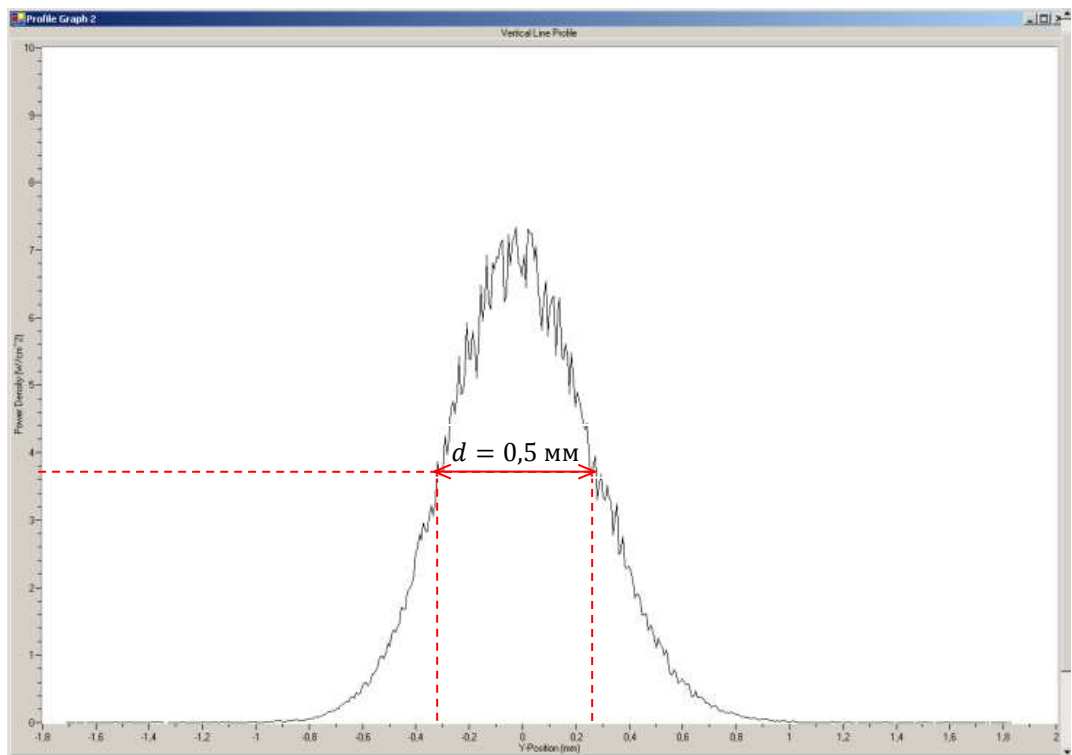


Рисунок 2.3 - Профиль распределения интенсивности светового пучка на выходе лазера

По рисунку 2.3 определили диаметр выходного пучка по уровню половинной интенсивности, он равен:

$$D_{\text{вых}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Следующим шагом была сборка установки, схема которой представлена на рисунке 2.4. Установка использовалась для определения диаметра сфокусированного экспонирующего пучка.

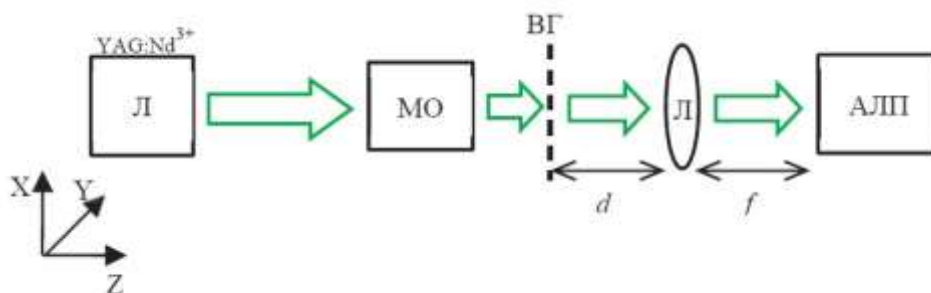


Рисунок 2.4– Структурная схема для определения диаметра экспонирующего светового пучка. Л – лазер; МО – микрообъектив; ВГ – входная грань образца; Л – линза; АЛП – анализатор лазерных пучков

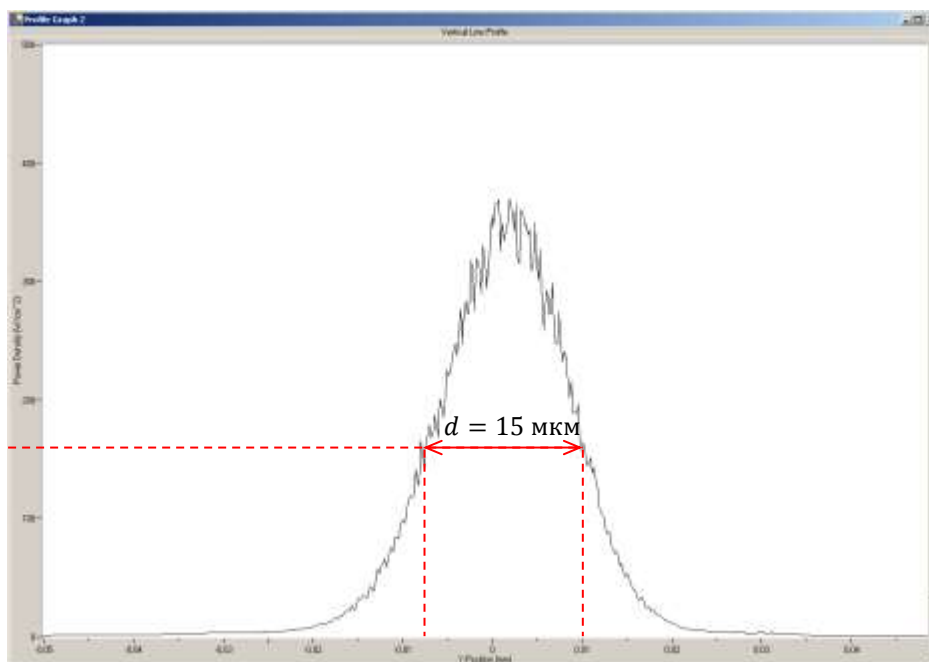


Рисунок 2.5 – Профиль распределения интенсивности сфокусированного пучка с  $\lambda = 532 \text{ нм}$  и диаметром 15 мкм по ее половинному уровню

Определим диаметр пучка на выходе линзы:

$$d = \frac{\lambda}{D_{\text{ВЫХ}}} * F, \quad (2.2)$$

где  $D$  – диаметр пучка YAG:Nd<sup>3+</sup> лазера;

$\lambda$  – длина волны экспонирующего излучения, 532 нм;

$F$  – диаметр линзы, фокусирующей экспонирующее излучение.

Оценим диаметр пучка на выходе линзы по формуле 2.2:

$$d = \frac{\lambda}{D_{\text{ВЫХ}}} * F = 7,448 * 10^{-6}$$

где  $\lambda$ - длина волны 532 нм,

$F$ - фокусное расстояние линзы, 7 мм.

Смоделируем распределение суммарной интенсивности излучения внутри кристалла при его поточечном экспонировании, для чего построим графики следующих функций:

$$I_1(x) = [\exp(-x^2)]^2,$$

$$I_2(x) = \exp(-(x - l)^2),$$

$$I_3(x) = \exp(-(x - 2 \cdot l)^2),$$

$$I_4(x) = \exp(-(x - 3 \cdot l)^2),$$

$$I_{sum}(x) = I_1(x) + I_2(x) + I_3(x) + I_4(x).$$

Нормированное распределение светового поля экспонирующего излучения на входной плоскости кристалла приведено на рисунке 2.6



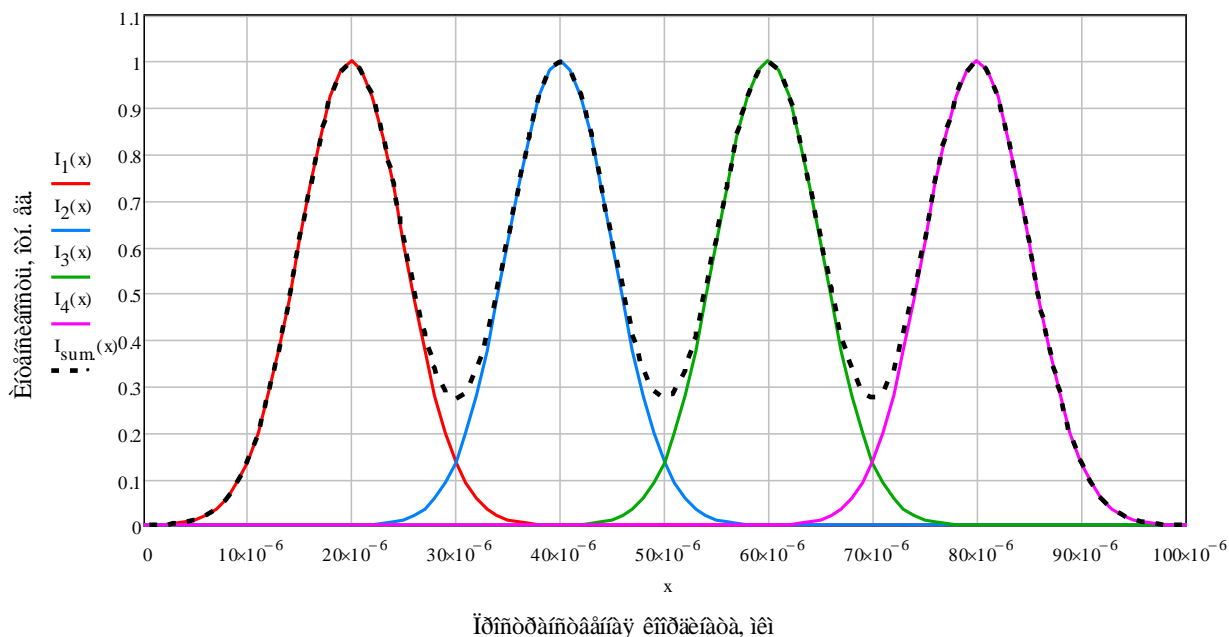


Рисунок 2.6 – Распределение суммарной интенсивности излучения  $I_{sum}(x)$  внутри кристалла для фокусированного пучка с диаметром  $d = 16$  мкм по уровню половинной интенсивности при расстоянии между центрами последовательно перекрывающихся точек  $l = 20$  мкм

Для формирования оптически индуцированных канальных волноводов в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$  соберем установку, схема которой представлена на рисунке 2.7.

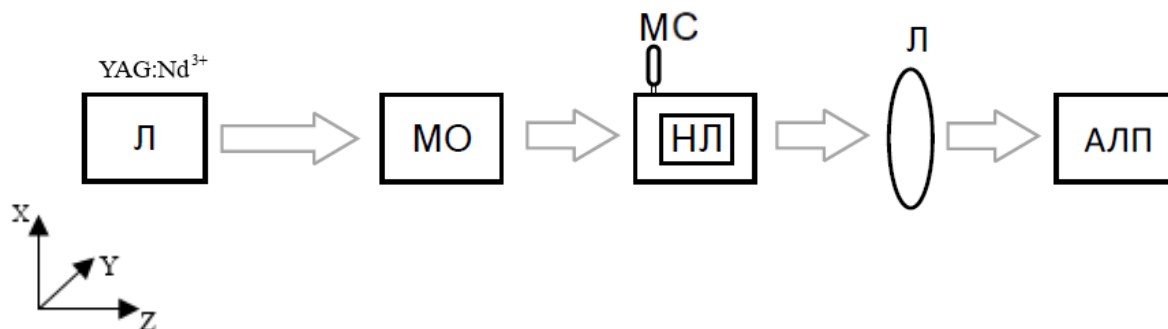


Рисунок 2.7– Структурная схема экспериментальной установки для формирования оптически индуцированных канальных волноводных структур в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ . Л – лазер; МО – микрообъектив; МС – микрометрический столик; НЛ – образец ниобата лития; Л – линза; АЛП – анализатор лазерных пучков

Источником излучения является YAG:Nd<sup>3+</sup> лазер, работающий в непрерывном режиме с длиной волны света  $\lambda=532$  нм и мощностью излучения P=10 мВт. 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 LiNbO<sub>3</sub> при смещении образца относительно фокусированного светового пучка. Между экспонированными областями в виде узких полосок, ориентированными в направлении оси X, формируется каналный оптический волновод.

Время экспонирования каждой точки составило 3 секунды. Сформированный оптический волновод представлен на рисунке 2.8

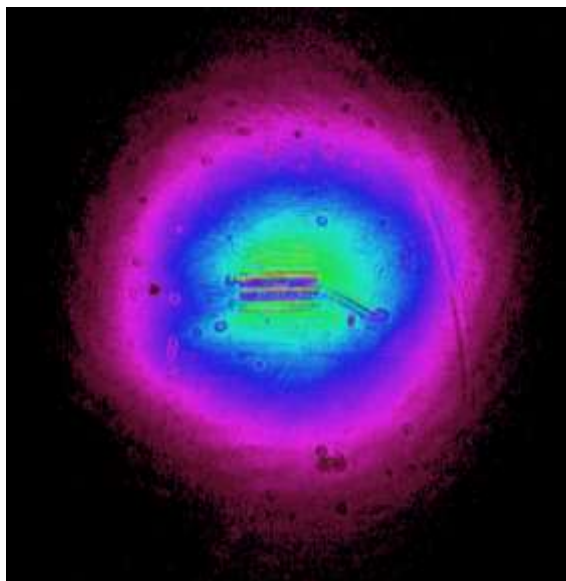


Рисунок 2.8 – Результат зондирования экспонированных областей He-Ne лазером

## Выводы

В ходе выполнения работы был изучен теоретический материал, собраны установки для определения диаметра выходного пучка  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  лазера с длиной волны 532 нм.

По формуле 2.1 было оценено изменение показателя преломления, которое составило для обыкновенной поляризации  $\Delta n_1 = 1,145 \cdot 10^{-4}$ , для необыкновенной поляризации  $\Delta n_2 = 4,327 \cdot 10^{-4}$ .

Диаметр выходного пучка составил  $D_{\text{вых}} = 0,5$  мм. После фокусировки диаметр пучка составил  $d = 7,448$  мкм.

В среде MATHCAD 15 было смоделировано суммарное распределение светового поля экспонирующего излучения на входной плоскости кристалла при поточечном экспонировании. Расстояние между центрами последовательно перекрывающихся точек на входной плоскости кристалла составило 20 мкм.

Кристаллы ниобата лития широко используются для создания интегрально-оптических устройств, благодаря хорошим электрооптическим и нелинейно-оптическим свойствам. В задачах нелинейной оптики, связанных с преобразованием спектральных характеристик лазерного излучения, требуется высокая стабильность оптических свойств, в частности, для выдерживания условий фазового синхронизма. Важной задачей является поиск методик подавления фотоиндуцированных изменений параметров среды, в том числе внесением соответствующих примесей. Свойства ниобата лития значительно зависят от его стехиометрического состава и содержания легирующих примесей. В данной работе использовался кристалл, легированный медью.

Свойства  $\text{LiNbO}_3$  позволяют использовать его для многих целей, в частности, благодаря фоторефрактивному эффекту, в  $\text{LiNbO}_3$  возможно создание оптических канальных волноводов.

Таким образом, на примере  $\text{LiNbO}_3$  была исследована возможность применения фоторефрактивных материалов для оптических систем.