

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)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ, ОПТИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫХ В
ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ LiNbO_3**

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.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ, ОПТИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫХ В
ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ LiNbO_3**

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.....	7
5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА	9
6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	9
7 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	9
Приложение А	10

1 ВВЕДЕНИЕ

Цель работы: Экспериментальное исследование оптически сформированных фотонных волноводных элементов в фоторефрактивном кристалле LiNbO_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 (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 материалов в широких пределах.

Фоторефрактивная чувствительность LiNbO_3 максимальна в сине-зеленой области видимого спектра, поэтому фотонные волноводные элементы, сформированные оптическим индуцированием, могут в течение долгого времени считываться излучением He-Ne лазера без их разрушения.

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 при фоторефрактивном эффекте Δn 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 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 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 зондирующего светового пучка представлена на рисунке 3.1.

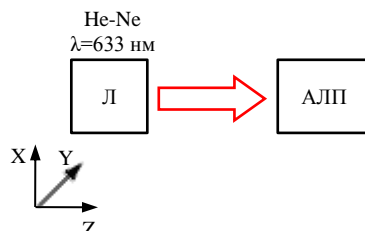


Рисунок 3.1 – Структурная схема экспериментальной установки №1 для определения диаметра зондирующего светового пучка. Л – лазер; АЛП – анализатор лазерных пучков

Схема экспериментальной установки №2 для зондирования экспонированных областей параллельным пучком представлена на рисунке 3.2.

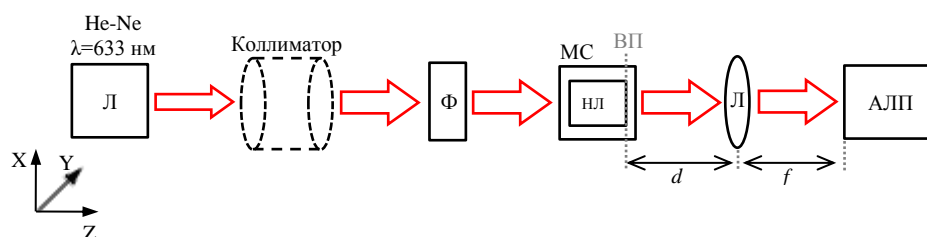


Рисунок 3.2 – Структурная схема экспериментальной установки №2 для зондирования экспонированных областей параллельным пучком. Л – лазер; Ф – световой фильтр; К – коллиматор; МС – микрометрический столик; НЛ – образец ниобата лития; АЛП – анализатор лазерных пучков

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:

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

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

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1 Включить He-Ne лазер. Собрать экспериментальную установку №1. Определить диаметр зондирующего пучка d по уровню половинной интенсивности I , как показано на рисунке 4.1.

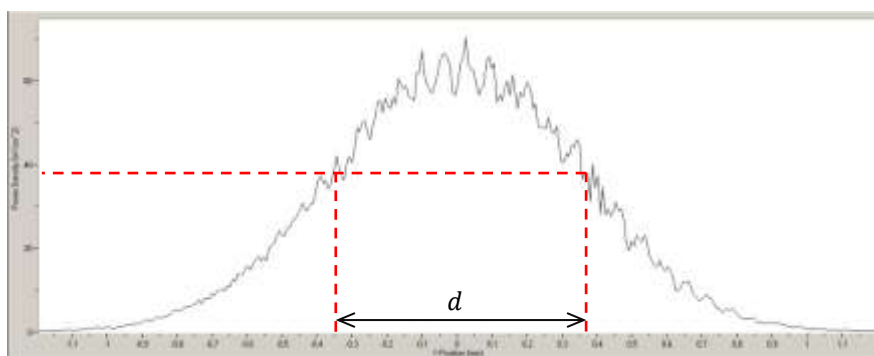


Рисунок 4.1 – Пример оценки диаметра зондирующего пучка d при помощи АЛП

4.2 Выполнив пункт 4.1, собрать и настроить экспериментальную установку №2. Приступить к зондированию экспонированных областей на поверхности кристалла.

4.3 Оценить, как показано на рисунке 4.2, поперечные и продольные размеры волноводной структуры $h_{\text{вс}}$ и $l_{\text{вс}}$, отдельно определить ширину экспонированных областей $d_{\text{эо}}$ и волноводной области $d_{\text{во}}$, где $2d_{\text{эо}} + d_{\text{во}} = h_{\text{вс}}$.

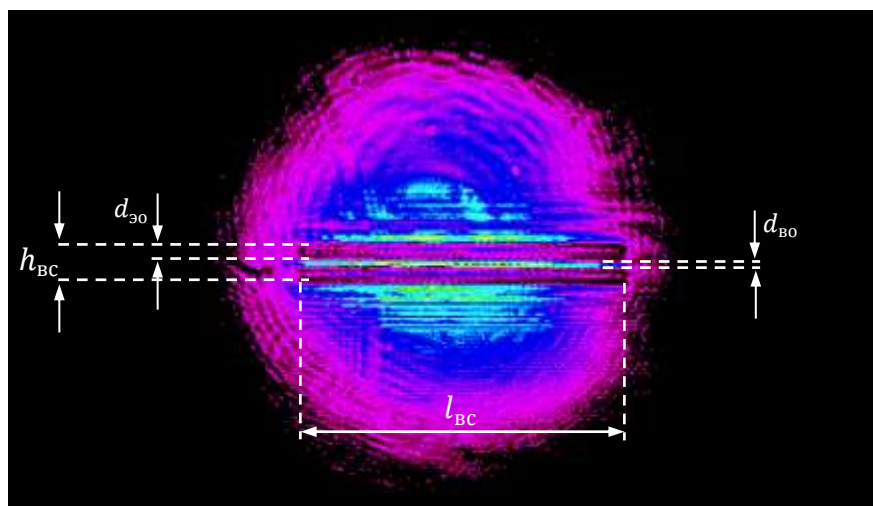


Рисунок 4.2 – Пример оценки поперечных и продольных размеров волноводной структуры

4.4 Оценить изменение показателя преломления в кристалле LiNbO_3 по формуле:

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

где E_3 – напряженность электрического поля (20÷30 кВ/см) [2];

r_{i3} – электрооптический коэффициент, для обыкновенной поляризации $r_{13} = 8,6 \cdot 10^{-10}$ см/В, для необыкновенной поляризации $r_{33} = 30,8 \cdot 10^{-10}$ см/В;

$n_{o,e}$ – показатель преломления материала, для излучения с $\lambda = 532$ нм и обыкновенной поляризацией $n_o = 2,2$, для излучения с $\lambda = 532$ нм необыкновенной поляризацией $n_3 = 2,24$.

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

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

5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

5.1 Название работы, цель работы, и схемы экспериментальных установок с полным описанием работы.

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

5.3 Результаты вычисления изменения показателя преломления Δn в LiNbO_3 .

5.4 Таблица с характеристиками волноводной структуры.

5.5 Выводы

6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1 В чем заключается явление фоторефракции?

6.2 Запишите выражение для изменения показателя преломления среды при Δn обыкновенной и необыкновенной поляризации внешнего излучения.

6.3 Какому виду должна соответствовать поляризация при экспонировании и зондировании кристалла и почему?

6.4 Как зависит изменение профиля показателя преломления от времени экспонирования?

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)**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ, ОПТИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫХ В
ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ LiNbO_3** Отчет к лабораторной работе №4 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 оптически сформированных фотонных волноводных элементов в фоторефрактивном кристалле LiNbO_3 .

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 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 Δn 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 $\lambda = 532 \text{ нм}$ и обыкновенной поляризацией $n_o = 2,2$, для излучения с $\lambda = 532 \text{ нм}$ необыкновенной поляризацией $n_z = 2,24$.

Для определения диаметра зондирующего пучка соберем установку по схеме, представленной на рисунке 2.1. В качестве источника излучения

используется He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 633$ нм. После включения лазера, и завершения процесса накачки, регистрируем излучение лазера анализатором лазерных пучков (АЛП). Полученное распределение интенсивности приведено на рисунке 2.2.

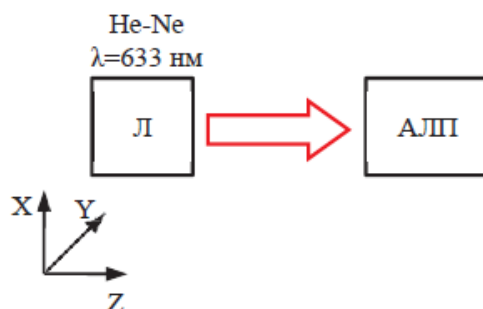


Рисунок 2.1 – Структурная схема экспериментальной установки для определения диаметра зондирующего светового пучка. Л – лазер; АЛП анализатор лазерных пучков

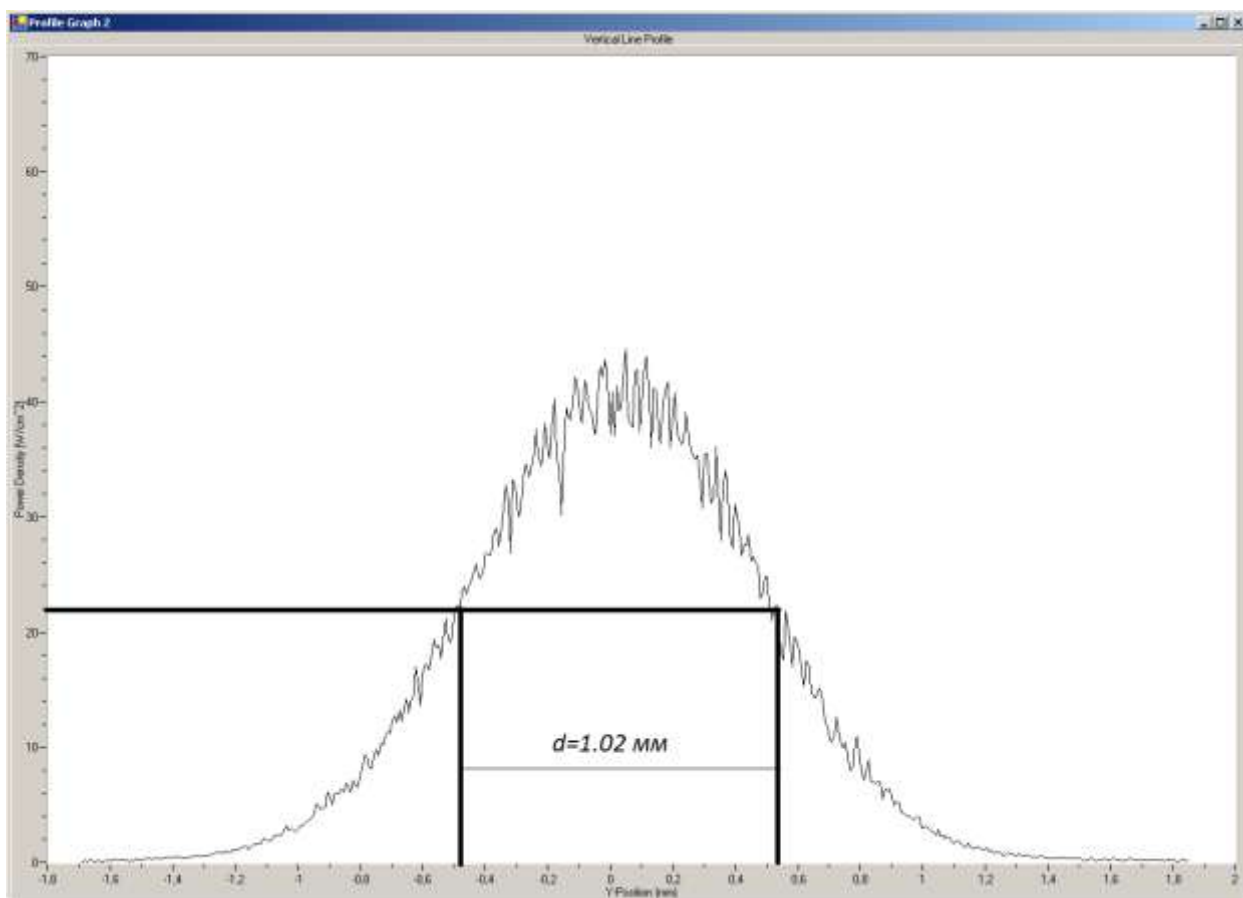


Рисунок 2.2- Профиль распределения интенсивности коллимированного светового пучка He-Ne лазера

По рисунку 2.2 по уровню половинной интенсивности определили диаметр выходного пучка, он равен:

$$D_{\text{вых}} = 1,02 \text{ мм.}$$

Далее приступаем к зондированию экспонированных областей параллельным пучком. Время экспонирования каждой точки составило 3 секунды. Схема установки приведена на рисунке 2.3. Для точного определения размеров экспонированных областей, проводим предварительную настройку масштаба, используя формулу тонкой линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \quad (2.2)$$

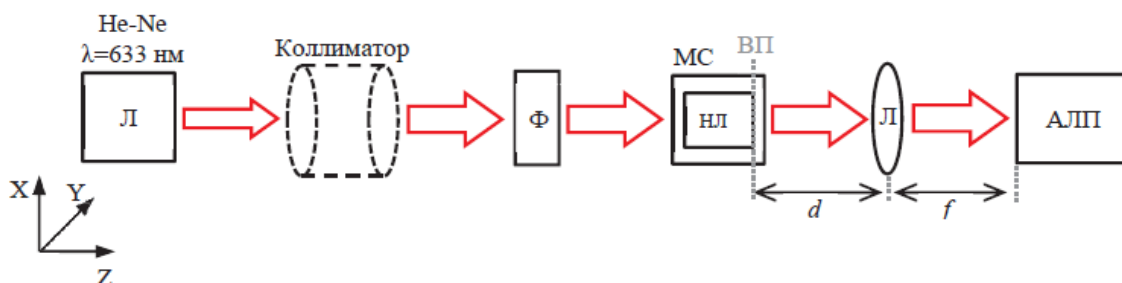


Рисунок 2.3 – Структурная схема экспериментальной установки для зондирования экспонированных областей параллельным пучком. Л – лазер; Ф – световой фильтр; К – коллиматор; МС – микрометрический столик; НЛ – образец ниобата лития; АЛП – анализатор лазерных пучков

Источником излучения является He-Ne лазер с длиной волны $\lambda=633$ нм и выходной мощностью $P \approx 1$ мВт. Свет, проходящий через образец, фиксируется анализатором лазерных пучков (АЛП), который позволяет определить размеры сформированной волноводной структуры в поперечном и продольном направлениях.

Световая картина пучка, прошедшего через образец, изображена на рисунке 2.4.

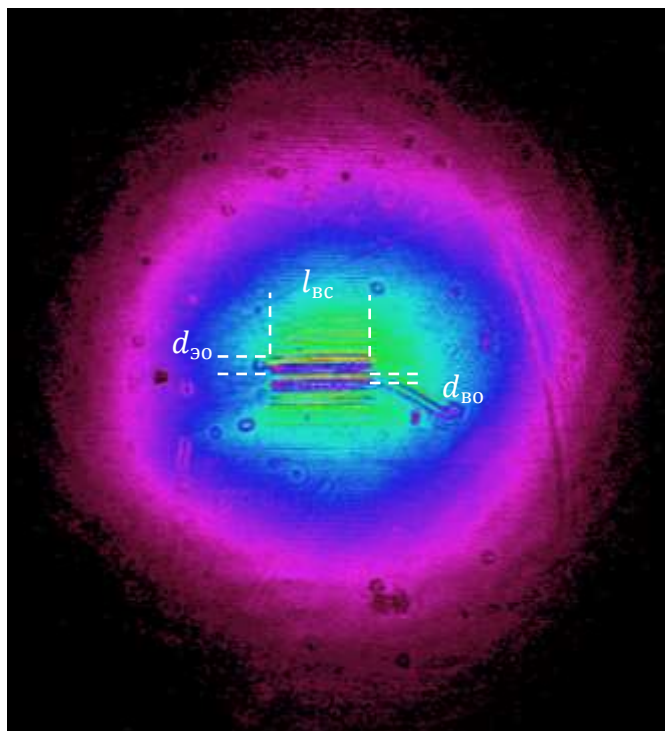


Рисунок 2.4 - Световая картина на выходной плоскости кристалла при зондировании He-Ne лазером

По рисунку оценим продольные l_{bc} и поперечные h_{bc} размеры волноводной структуры, определим ширину экспонированных $d_{э0}$ и волноводных $d_{во}$ областей:

$$\begin{aligned} l_{bc} &= 255 \text{ мкм}; & h_{bc} &= 72 \text{ мкм}; \\ d_{э0} &= 30 \text{ мкм}; & d_{во} &= 12 \text{ мкм}. \end{aligned}$$

По формуле (2.1) оценим изменение показателя преломления в кристалле LiNbO_3 . 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:

$$\Delta n = -\frac{1}{2} \cdot 2.24^3 \cdot 30.8 \cdot 10^{-10} \cdot 25 \cdot 10^3 = 4.327 \cdot 10^{-4}$$

Прозондировав экспериментальный образец с торца, определили глубину проникновения экспонированных областей $L_{э0} = 80$ мкм.

Характеристики исследуемой волноводной структуры приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики волноводной структуры

Материал	Ширина экспонированной области $d_{э0}$, мкм	Ширина волноводной области $d_{в0}$, мкм	Длина волноводной структуры $l_{вс}$, мкм	Ширина волноводной структуры $h_{вс}$, мкм	Глубина проникновения экспонированных областей $L_{э0}$, мкм	Показатель преломления экспонированной области $n_{э0}$	Показатель преломления волноводной области $n_{в0}$
$LiNbO_3$	30	12	255	72	80 мкм	2.1998	2.2

Выводы

В ходе выполнения работы был изучен теоретический материал, собраны установки для определения диаметра выходного пучка He-Ne лазера с длиной волны 633 нм.

Диаметр выходного пучка составил $D_{\text{вых}} = 1,02$ мм.

Было проведено зондирование сформированных волноводных структур параллельным пучком. Зарегистрированная при помощи АЛП световая картина на выходе образца приведена на рисунке 2.4. По полученному изображению были оценены характеристики волноводной структуры.

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 $\Delta n_2 = 4,327 \cdot 10^{-4}$.

Характеристики исследуемой структуры приведены в таблице 2.1.

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 LiNbO_3 позволяют использовать его для многих целей, в частности, благодаря фоторефрактивному эффекту, в LiNbO_3 возможно создание оптических канальных волноводов.