

# Формирование волноводов в ниобате лития методом прямой записи

Р.С. Пономарев<sup>1</sup>, М.П. Смаев<sup>2</sup>, Д.Н. Москалев<sup>1</sup>, П.В. Карнаушкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Букирева 15, Пермь, Россия, 614990

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Миусская площадь 9, Москва, Россия, 125047

**Аннотация.** В работе представлены методы формирования и испытаний оптических волноводов, записываемых в объеме кристалла ниобата лития с помощью фемтосекундного лазера. Был использован лазер с длиной волны 1028 нм с длительностью импульсов 180 фс и частотой их следования 15 кГц и двумя ортогональными поляризациями падающего излучения. В результате записи были получены качественные стенки волноводов. Показано, что характеристики стенок зависят от поляризации излучения.

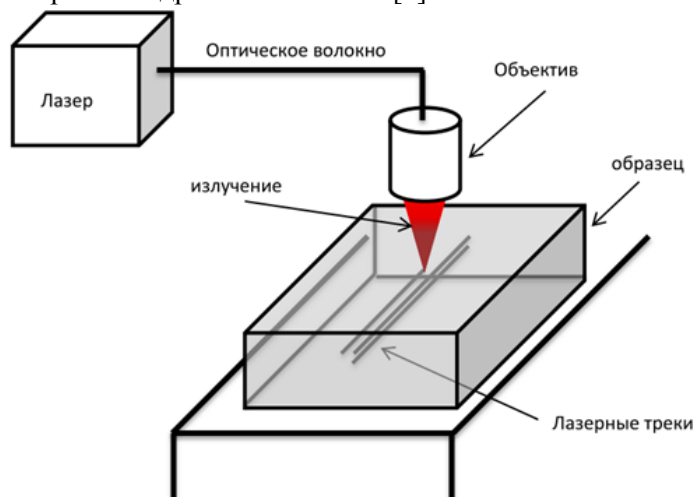
## 1. Введение

Формирование оптических волноводов для изготовления фотонных интегральных схем (ФИС) обычно проводится с помощью фотолитографии. Данный метод позволяет получать множество одинаковых волноводных топологий на одной пластине за один технологический цикл, что делает его наилучшим для серийного производства ФИС. Однако фотолитография требует наличия большого набора дорогостоящего оборудования, установленного в чистых помещениях высокого класса. Кроме того для проведения фотолитографии нужно иметь заранее подготовленный фотошаблон и любые изменения топологии волноводов ФИС могут быть получены только изменением фотошаблона. Эти факторы делают фотолитографические способы формирования волноводов малоприменимыми для проведения исследовательских работ или быстрого прототипирования волноводов ФИС.

В качестве альтернативы фотолитографии было предложено [1,2] использовать для формирования волновода лазер, воздействие которого на локальный объем оптического материала может приводить к изменению его показателя преломления. При установке образца или лазерной головки на подвижное основание можно обеспечить формирование протяженной области с измененным показателем преломления, то есть «нарисовать» топологию волноводов. Такой способ называется прямой записью волноводов (direct writing) и реализуется с помощью лазеров с фемтосекундными импульсами и системы высокоточных позиционеров. К преимуществам способа прямой записи относятся возможность быстро менять топологию волноводов, а также возможность записи трехмерных структур, включающих волноводы, лежащие на разной глубине от поверхности кристалла. Таким образом, метод прямой записи в данный момент входит в число наиболее удобных методов формирования топологии волноводов ФИС для лабораторных применений и проведения НИОКР.

## 2. Формирование волноводов методом прямой записи

Формирование волновода, как области с повышенным относительно окружающего материала, показателем преломления, происходит двумя способами. В первом случае в ходе облучения показатель преломления материала повышается, и облученная область становится волноводом. Во втором случае после облучения показатель преломления материала понижается, и для формирования волновода необходимо окружить неизменную область материала треками с пониженным показателем преломления, от которых будет происходить отражение распространяющегося излучения (рис.1). Оба механизма изменения оптических свойств материала подробно описаны в [3].



**Рисунок 1.** Схема установки для записи волноводов с помощью фемтосекундного лазера.

Физические явления, происходящие в материале под действием сверхкороткого лазерного импульса, весьма разнообразны. В ходе облучения вещества в фокальном объеме может происходить многофотонная или туннельная ионизация, что определяется адиабатическим параметром Келдыша [4].

Многофотонная ионизация – это процесс, при котором вероятность поглощения атомом кванта излучения степенным образом зависит от отношения энергии ионизации к энергии кванта излучения. При многофотонной ионизации энергия кванта излучения недостаточна для выбивания электрона с основного уровня. Вместо этого атом поглощает некоторое количество электронов, суммарная энергия которых равна энергии ионизации.

Туннельная ионизация атома происходит при деформации зонной структуры атома при его взаимодействии с набегающей электромагнитной волной. При этом понижается величина потенциального барьера и электрон получает возможность туннелировать в валентную зону. Каналы ионизации, рассмотренные выше, обуславливают появление плазмы в виде свободных электронов в фокальном объеме. В зависимости от интенсивности лазерного излучения и концентрации свободных зарядов, плазма различными способами взаимодействует с лазерным излучением: эффект Комптона, вынужденное рамановское рассеяние, а также рассеяние Мандельштама – Бриллюена. По мере того как фокальный объем подвергается облучению, концентрация свободных электронов растет, и при последующем прохождении лазерного импульса через плазму низкой плотности, за фронтом импульса возникает кильватерная волна, которая захватывает и ускоряет свободные заряды. Ее воздействие приводит к возмущению электронной плотности, вследствие ускорения заряженных частиц в область слабого электромагнитного поля. При увеличении плотности плазмы кильватерная волна разрушается и основным процессом, определяющим характер взаимодействия субпикосекундных импульсов с плазмой, является вынужденное рамановское рассеяние [5].

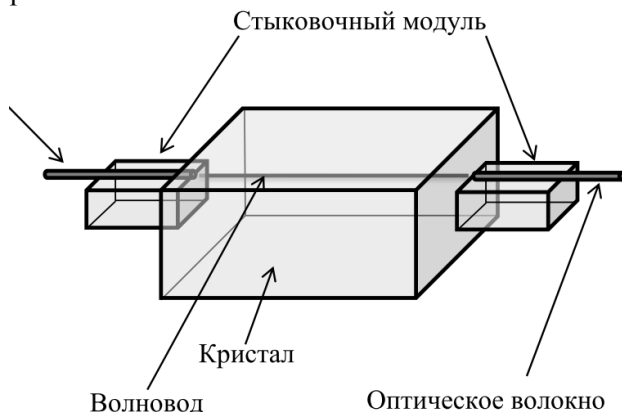
При дальнейшем увеличении плотности плазмы единый лазерный канал разбивается на несколько каналов вследствие неустойчивости самофокусировки. В результате описанных процессов происходит гладкое изменение показателя преломления, модификация необыкновенного или обыкновенного показателей преломления, возникновение микровзрывов и пустот в материале. В итоге режим записи и характеристики получаемых структур напрямую

зависят от параметров лазера (энергия, длительность импульса, частота следования импульсов, длина волны, поляризация, фокусное расстояние, скорость движения лазерного пятна), а также от свойств материала (ширина запрещенной зоны, теплопроводности и т.д.).

### 3. Методы ввода и вывода излучения

Во множестве работ, посвященных исследованию волноводов прямой записи для ввода излучения в волновод используется объемная линза, которая фокусирует излучение на торце кристалла. Такой метод позволяет зафиксировать только сам факт каналирования излучения волноводом, но не позволяет исследовать величину оптических потерь в волноводе и потерь на ввод/вывод излучения. Кроме того, сборка с линзой может работать только на оптическом столе и не позволяет проводить температурные или другие испытания образцов.

Мы предлагаем использовать для тестирования оптических характеристик формируемых волноводов методы интегральной оптики, то есть неразъемную стыковку формируемых волноводов с оптическими волокнами, вклеиваемыми в специальные оптические соединители. Такой метод является чуть более трудоемким, чем линзовый ввод, но при этом позволяет получить готовое устройство, пригодное для измерения оптических потерь и проведения других типов испытаний. Схема стыковки волновода с оптическим волокном приведена на рис.2.



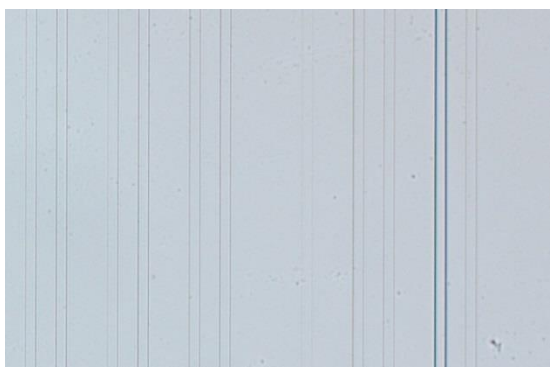
**Рисунок 2.** Схема установки для ввода и вывода излучения в каналный волновод.

Обычно для ввода излучения используется стандартное одномодовое волокно SMF-28, рассчитанное на длину волны 1,55 мкм. При этом для сборки устройства с волноводами малого диаметра применяются линзованные волокна, позволяющие сфокусировать излучение в пучок диаметром до 2 мкм [6]. Для юстировки взаимного расположения деталей применяют высокоточные механические, шаговые или пьезопозиционеры, перемещающие, как правило, оптический соединитель в трех линейных и трех угловых направлениях. Склеивание деталей проводится с помощью оптического полимерного клея с минимальной усадкой, отверждаемого под действием ультрафиолета.

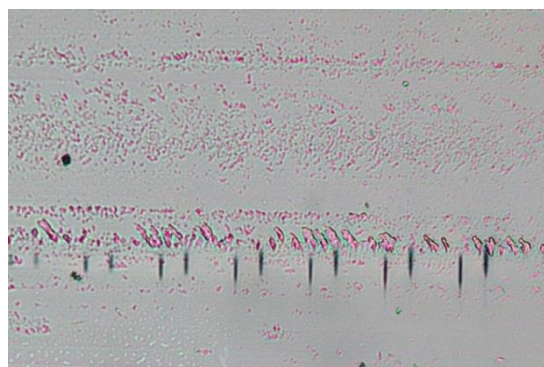
### 4. Результаты эксперимента

В результате эксперимента в кристалле конгруэнтного ниобата лития X-среза была изготовлена серия треков, формирующих стенки волноводов. Был использован лазер с длиной волны 1028 нм с длительностью импульсов 180 фс и частотой их следования 15 кГц, энергией в импульсе от 20 до 200 нДж и двумя ортогональными поляризациями падающего излучения, параллельно и перпендикулярно плоскости кристалла. Микрофотографии полученных структур приведены на рис. 3 и 4.

В результате эксперимента получены структуры стенок волноводов, для которых планируется проведение испытаний методом стыковки с оптическим волокном с одной или с двух сторон. В случае односторонней стыковки оценка качества волновода будет производиться с помощью ИК-камеры высокого разрешения Spiricon SP-620U.



**Рисунок 3.** Треки, записанные в образце НЛ.  
Вид сверху.



**Рисунок 4.** Треки, записанные в образце НЛ.  
Вид с торца кристалла.

## 5. Литература

- [1] Davis, K.M. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser / K.M. Davis [et al.] // *Opt. Lett.* – 1996. – Vol. 21(21). – P. 1729-1731.
- [2] Deshpande, D.C. Investigation of femtosecond laser assisted nano and microscale modifications in lithium niobate / D.C. Deshpande [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 97(7). – P. 074316 (1-9).
- [3] Хо1. Femtosecond Laser Micromachining / edited by. R. Osellame, G. Cerullo, R. Ramponi. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. – 482 p.
- [4] Попов, В.С. Туннельная и многофотонная ионизация атомов и ионов в сильном лазерном поле (теория Келдыша) // *Успехи физических наук.* – 2004. – Т. 174, № 9. – С. 921-950.
- [5] Федоров, М.В. Работа Л.В. Келдыша «Ионизация в поле сильной электромагнитной волны» и современная физика взаимодействия атомов с сильным лазерным полем // *ЖЭТФ.* – 2016. – Т. 149, № 3. – С. 522-529.
- [6] Карнаушкин, П.В. Волоконный световод с конусной линзой для ввода излучения в волновод малого диаметра / П.В. Карнаушкин, Р.С. Пономарев // *Вестник Пермского университета.* – 2017. – Т. 1, № 35. – С. 54-63.

## Direct written waveguides in lithium niobate

R.S. Ponomarev<sup>1</sup>, M.P. Smaev<sup>2</sup>, D.N. Moskaev<sup>1</sup>, P.V. Karnaushkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm State National Research University, Bukireva 15, Perm, Russia, 614990

<sup>2</sup>D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sq. 9, Moscow, 125047

**Abstract.** We investigate characteristics of channel optical waveguides written directly in bulk lithium niobate crystals by fs-laser. We used wavelength 1028 nm, pulse durability 180 fs with 15 kHz frequency with TE and TM-polarisation. The crystal was congruent X-cut lithium niobate. We made set of optical walls working like waveguide.