

Пироэлектрическое формирование планарных волноводных структур в ниобате лития лазерным излучением с длиной волны 532 нм

А. С. Перин,^{*} В. Ю. Рябченко,[†] Е. А. Дмитриев,[‡] В. А. Крадько,[§]
С. Б. Козлов,[¶] Е. А. Березина,^{**} В. М. Шандаров^{††}

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
радиотехнический факультет, кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
Россия, 634050, Томск, проспект Ленина, д. 40*

Экспериментально продемонстрировано формирование одномерных одиночных планарных волноводов и пар таких волноводов в объеме нелегированного ниобата лития. Волноводные структуры с размером каналов 22 мкм сформированы светлыми пространственными солитонами, полученными при компенсации дифракционной расходимости световых пучков в кристалле за счет вклада пироэлектрического эффекта в нелинейный отклик среды. Длина волны света составляла 532 нм, световая мощность изменялась от 0.5 мВт до 1 мВт. Полная компенсация дифракционной расходимости достигалась при однородном нагреве кристаллического образца до температуры 75 °С.

PACS: 42.25.Fx, 42.65.Hw, 42.65.Tg УДК: 535.421.

Ключевые слова: ниобат лития, пироэлектрический эффект, пространственный солитон.

Распространение света в нелинейных оптических средах может сопровождаться эффектами самовоздействия, которые приводят к изменению спектральной и пространственной структуры световых полей. Пространственное самовоздействие световых пучков позволяет реализовать режимы пространственных оптических солитонов — бездифракционного распространения узких световых пучков. В свою очередь, солитоны могут формировать оптические волноводные элементы и волноводные цепи в среде [1, 2]. Повышенный интерес при изучении пространственного самовоздействия световых полей привлекают оптические среды, в которых нелинейный отклик проявляется уже при низких интенсивностях света. В качестве такой среды привлекательным является фоторефрактивный кристалл ниобата лития (LiNbO_3) [3]. Помимо фоторефрактивного эффекта, кристаллы LiNbO_3 обладают сильным нелинейным оптическим эффектом с пироэлектрическим механизмом нелинейного отклика, связанного с изменением температуры среды. Комбинация пироэлектрического и фоторефрактивного эффектов позволяет достичь солитонного режима распространения узких световых пучков в среде [4]. В [4, 5] продемонстрировано, что за счет оптического поглощения и пироэлектрических свойств кристаллических материалов стронций-бариевого ниобата и ниобата лития, происходит самофокусировка светового пучка. В первом случае пироэффект был инициирован поглощением света в освещенной области кристалла, за счет чего происходило

повышение температуры данной области образца. Во втором случае весь кристаллический образец равномерно нагревался, что приводило к изменению спонтанной поляризации кристалла и возникновению пироэлектрического поля.

Основной целью данной работы является экспериментальное исследование формирования планарной волноводной оптической схемы в кристаллическом образце нелегированного LiNbO_3 с использованием световых пучков, распространяющихся в пространственно-солитонном режиме за счет комбинации фоторефрактивного и пироэлектрического эффектов.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В экспериментах используется нелегированный кристалл LiNbO_3 с размерами $10 \times 4 \times 4 \text{ мм}^3$ вдоль осей X, Y, Z соответственно. Источником излучения является твердотельный лазер YAG:Nd^{3+} с длиной волны излучения $\lambda = 532 \text{ нм}$ и выходной мощностью до 50 мВт. Поляризация света соответствует необыкновенной волне в кристалле. Одиночные планарные волноводы формируются лазерными пучками, сфокусированными цилиндрической линзой. Для формирования структуры из двух элементов используется световой пучок с противофазным полем в разных половинах его апертуры. В эксперименте для этого в пучок вводится тонкая стеклянная пластинка, перекрывающая половину его апертуры и обеспечивающая при некотором положении нужный фазовый сдвиг. На входную плоскость образца свет фокусируется цилиндрической линзой с фокусным расстоянием 35 мм. Размеры светового пятна на ней составляют $\sim 22 \text{ мкм}$ вдоль оптической оси кристалла (ось Z) и $\sim 1.1 \text{ мм}$ вдоль оси Y при длине волны света $\lambda = 532 \text{ нм}$. Свет распространяется в кристалле вдоль оси X . Изображения входной и выходной плоскостей образца проецируются на анализатор лазерных пучков изображающей линзой. Картины распределений световых полей, соответствующих изображениям с входной и выходной плос-

*E-mail: perin.anton@gmail.com

†E-mail: vryabchenok@gmail.com

‡E-mail: d.e.a_03@mail.ru

§E-mail: krادko.vika@gmail.com

¶E-mail: serega_09_tm@mail.ru

**E-mail: katya161195@mail.ru

††E-mail: shandarovvm@svch.rk.tusur.ru

костей кристалла, анализируются визуально и сохраняются в памяти персонального компьютера. Перемещение кристалла в поперечном направлении относительно лазерного пучка осуществляется с помощью микрометрического позиционера. Кристаллический образец размещен на поверхности термоэлектрического преобразователя (элемента Пельтье), обеспечивающего однородный (или почти однородный) нагрев кристалла. Для лучшей теплопередачи поверхность кристалла, соприкасающаяся с керамической подложкой, смазывается тонким слоем теплопроводящей пасты, все остальные грани кристалла остаются свободными. Температура образца в ходе экспериментов может повышаться до 90 °С. Для контроля температуры используется бесконтактный инфракрасный термометр (точность определения температуры ± 2 °С).

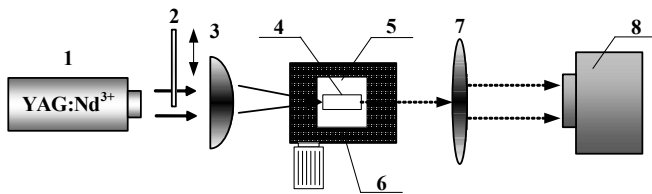


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1 — источник лазерного излучения (YAG:Nd³⁺ лазер, $\lambda=532$ нм), 2 — стеклянная пластинка, 3 — цилиндрическая линза, 4 — образец LiNbO₃, 5 — элемент Пельтье 6 — трехкоординатный микрометрический столик, 7 — изображающая линза, 8 — анализатор лазерных пучков

Узкий световой пучок при распространении в среде испытывает дифракцию и его размеры в поперечном сечении увеличиваются. Это иллюстрируют картины светового поля на входной (а) и выходной (б) плоскостях кристаллического образца на рис. 2. Световая мощность в этом случае ~ 0.5 мВт для исключения влияния фоторефрактивного эффекта на световое поле. Температура образца соответствует комнатной ($T = 25$ °С). Вследствие линейной дифракции узкая часть светового поля уширяется примерно до 200 мкм. Исследуемый образец не легирован специальными примесями, однако, фоторефрактивный эффект в нем проявляется при воздействии видимого света из-за наличия собственных дефектов кристалла. Поэтому в освещенной области образца возникает электрическое поле пространственного заряда в направлении параллельном направлению оптической оси кристалла. Вследствие самодефокусирующего характера фоторефрактивного нелинейного отклика в LiNbO₃ это поле индуцирует дефокусирующую нелинейную линзу в освещенной области за счет линейного электрооптического эффекта. Возникшая нелинейная линза увеличивает дифракционную расходимость светового пучка, что демонстрирует картина светового поля на выходной плоскости образца при световой мощности 1 мВт (рис. 2б). Поляризация света соответствует в данном случае необыкновенной волне в кристал-

ле. Это нелинейная дифракция светового пучка. Компенсация как линейной, так и нелинейной дифракции света достигается при этой световой мощности путем однородного нагрева кристалла до температуры 75 °С (рис. 2з). Изменение температуры образца приводит к изменению спонтанной поляризации кристалла и возникновению пирозлектрического поля, понижающего показатель преломления однородно нагретого кристалла. В освещенной же области пирозлектрическое поле экранируется вследствие фотопроводимости среды, приводящей к дрейфовому перераспределению носителей заряда и компенсации пирозлектрического поля. Таким образом, взаимодействие фоторефрактивного и пирозлектрического эффекта при определенных условиях приводит к формированию одномерного светлого пространственного солитона и формированию планарного волноводного канала в объеме кристалла.

Изменение амплитудного распределения светового поля на входной плоскости образца дает возможность оптического индуцирования в нелинейной среде более сложных волноводных структур, чем одиночный волноводный канал. Одним из примеров является волноводный направленный ответитель. Подобно одиночным волноводным каналам [6], такие структуры могут быть индуцированы и в LiNbO₃. В проведенных экспериментах иллюстрируется формирование волноводной структуры из двух параллельных планарных волноводов за счет вклада пирозлектрического эффекта в рассуждаемом кристаллическом образце при длине волны света $\lambda = 532$ нм. Формирующее световое поле представляет собой лазерный пучок, сфокусированный цилиндрической линзой с изменением знака поля (сдвиг фазы на нечетное число π) в половинах его апертуры. Поле фазировалось в направлении, параллельном направлению оптической оси кристалла.

Результат формирования двухканальной волноводной структуры иллюстрирует изображение светового поля на выходной (рис. 3а) плоскости кристаллического образца зафиксированное в режиме освещения широким световым полем, и график зависимости интенсивности светового поля от координаты (рис. 3б). В данном случае поляризация света также соответствует необыкновенной волне в кристалле.

Приведенные картины показывают, что при освещении образца с записанной волноводной структурой широким световым пучком, наблюдается локализация интенсивности светового пучка в планарном волноводе. Время, необходимое для формирования данной системы при мощности излучения 1 мВт и температуры кристалла 75 °С, составляет около трёх минут.

Таким образом, экспериментальные результаты демонстрируют возможность оптического формирования в кристаллах ниобата лития сложных волноводных структур при длине волны света 532 нм, топология которых определяется распределением светового поля на входной плоскости образца, за счет вклада пирозлектрического механизма в нелинейный отклик.

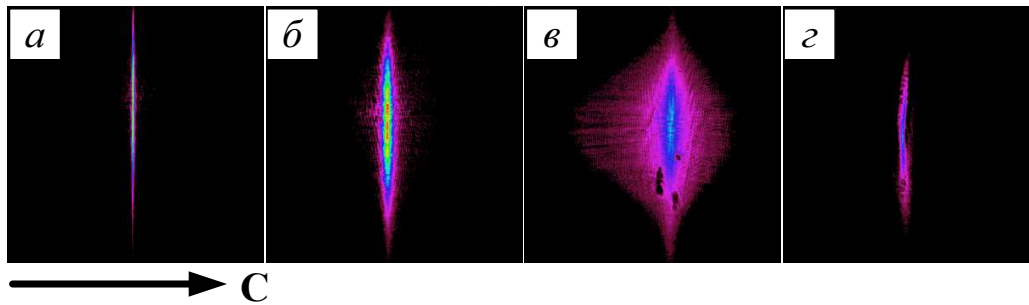


Рис. 2: Картины распределения световых полей ($\lambda = 532$ нм) на входной (а) и выходной (б) гранях кристалла в начальный момент времени в линейном режиме дифракции (световая мощность 0.5 мВт); в, г – картины световых полей на выходной плоскости образца при световой мощности 1 мВт (в) и нагреве кристалла до температуры 75 °С (г)

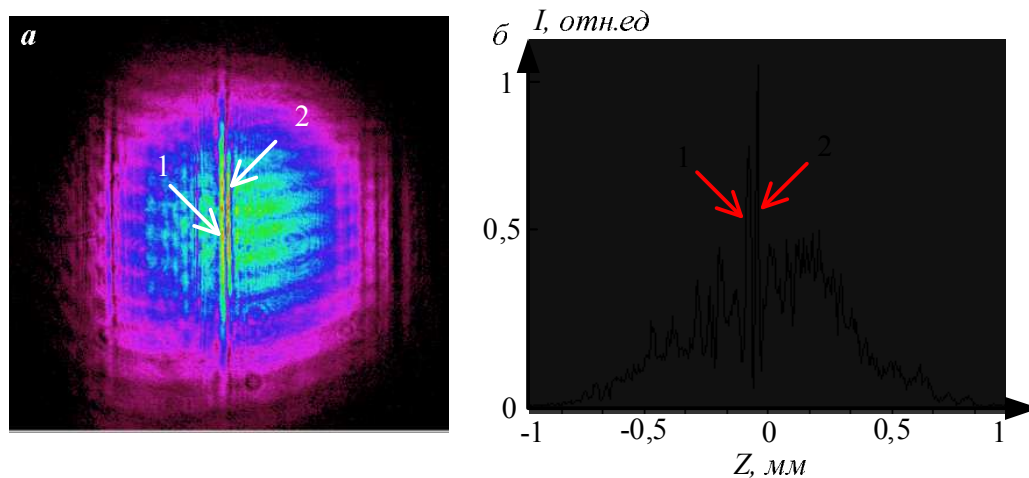


Рис. 3: Картина распределения светового поля ($\lambda = 532$ нм) на выходной грани кристалла (а) в режиме освещения широким полем (1 и 2 – локализация света в волноводе); график зависимости интенсивности зондирующего светового поля от координаты (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части Госзадания

на 2016 г. (проект № 3642) и проектной части (работа № 3.878.2014/К)

- [1] Stegeman G. I., Segev M. Science. **289**. P. 1518. (1999).
 [2] Safioui J. et al. Optics Express. **17**, N 24. P. 22209. (2009).
 [3] Segev M., Shih M. F., Valley G. C. J.Opt.Soc.Am. B. **13**. P. 706. (1996).
 [4] Kip D., Krötzig E., Shandarov V., Moretti P. Optics

- Letters. N 23. P. 343. (2009).
 [5] Safioui J. et al. Optics Express. **17**, N 24. P. 22209. (2009).
 [6] Popescu S. T., Petris A., Vlad V. I. Journal of Applied Physics. **113**. Art. 213110. (2013).

Pyroelectric formation of planar waveguide structures in lithium niobate by laser beam with the wavelength of 532 nm

A. S. Perin^a, V. Y. Ryabchenok^b, E. A. Dmitriev^c, V. A. Kradko^d, S. B. Kozlov^e, E. A. Berezina^f, V. M. Shandarov^g

Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Faculty of Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk 634050, Russia

E-mail: ^aperin.anton@gmail.com, ^bvryabchenok@gmail.com, ^cd.e.a_03@mail.ru, ^dkradko.vika@gmail.com,
^eserega_09_tm@mail.ru, ^fkatya161195@mail.ru, ^gshandarovvm@svch.rk.tusur.ru

Formation of one-dimensional planar waveguides and couples of such waveguides within a bulk of undoped lithium niobate has been experimentally demonstrated. Waveguide structures with a channel size of $22\ \mu\text{m}$ have been formed by the bright spatial solitons obtained at the compensation of the diffraction divergence of light beams in the crystal due to the contribution of the pyroelectric effect into the nonlinear response. The light wavelength was 532 nm and the optical power was ranged from 0.5 mW to 1 mW in experiments. The total compensation of the diffraction divergence at uniform heating of the crystal sample to the temperature from 75 °C.

PACS: 42.25.Fx, 42.65.Hw, 42.65.Tg

Keywords: lithium niobate, pyroelectric effect, spatial soliton.

Сведения об авторах

1. Перин Антон Сергеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, тел.: (3822) 701-518, e-mail: perin.anton@gmail.com.
2. Рябченко Владимир Юрьевич — аспирант, мл. науч. сотрудник, тел.: (3822) 701-518, e-mail: vryabchenok@gmail.com.
3. Дмитриев Евгений Александрович — студент, e-mail: d.e.a_03@mail.ru.
4. Крадько Виктория Андреевна — студент, e-mail: kradko.vika@gmail.com.
5. Козлов Сергей Борисович — студент, e-mail: serega_09_tm@mail.ru.
6. Березина Екатерина Александровна — студент, e-mail: katya161195@mail.ru.
7. Шандаров Владимир Михайлович — доктор физ.-мат. наук, профессор, тел.: (3822) 701-518, e-mail: shandarovvm@svch.rk.tusur.ru.