

## Пирозлектрическое формирование канальных волноводных структур в ниобате лития лазерным излучением с длиной волны 633 нм

А.С. Перин,\* В.М. Шандаров,† В.Ю. Рябченко‡

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

Экспериментально продемонстрировано формирование двумерных одиночных канальных волноводов и пар таких волноводов в объеме нелегированного ниобата лития. Волноводные структуры с диаметром каналов 23 мкм сформированы светлыми пространственными солитонами, полученными при компенсации дифракционной расходимости световых пучков в кристалле за счет вклада пирозлектрического эффекта в нелинейный отклик. Длина волны света составляла 633 нм, световая мощность изменялась от 1 мВт до 1 Вт. Полная компенсация дифракционной расходимости достигалась при однородном нагреве кристаллического образца до температуры 35 °С.

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

УДК: 535.421.

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

Световые поля в оптически нелинейных средах могут сопровождаться эффектами пространственного самовоздействия, что приводит к изменению характера их дифракции. В фоторефрактивных материалах для этого недостаточны микроваттные уровни световой мощности [1]. В кристаллах ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) фоторефрактивная нелинейность приводит к самофокусировке световых пучков. Однако в нелинейный отклик кристалла может вносить вклад и пирозлектрический эффект, что делает возможными явления самофокусировки таких пучков и формирования в ниобате лития светлых пространственных солитонов, названных пиролитонами [2,3]. Пирозлектрическое поле противоположно по направлению полю пространственного заряда, обусловленному фоторефрактивным эффектом. Оно возникает при нагреве кристалла вследствие изменения его спонтанной поляризации. В результате становится возможным изменение знака нелинейного отклика материала на световое возмущение. Волноводные элементы и системы, сформированные в  $\text{LiNbO}_3$  за счет вклада пирозлектрического эффекта, могут храниться в нем в течение более ста часов, что представляет практический интерес в плане реализации полностью оптических элементов фотоники [4,5].

Целью данной работы явилось исследование влияния пирозлектрического эффекта на дифракционные характеристики световых полей и формирование канальных волноводных структур в кристаллических образцах  $\text{LiNbO}_3$  при длинах волн света  $\lambda = 532$  нм и  $\lambda = 633$  нм и разных его интенсивностях.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В экспериментах используется нелегированный кристалл  $\text{LiNbO}_3$  с размерами  $10 \times 4 \times 4$  мм<sup>3</sup> вдоль осей X, Y, Z соответственно. Источниками излучения явля-

ются твердотельный лазер  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  с длиной волны излучения  $\lambda = 532$  нм и выходной мощностью до 50 мВт и He-Ne лазер с  $\lambda = 633$  нм и выходной мощностью около 1 мВт. Поляризация света соответствует необыкновенной волне в кристалле. Одиночные канальные волноводы формируются лазерными пучками с гауссовым профилем. Для формирования канальной 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 линзой с фокусным расстоянием 40 мм. Диаметр светового пятна на ней составляет  $\sim 23$  мкм при  $\lambda = 633$  нм и  $\sim 12$  мкм при  $\lambda = 532$  нм. Свет распространяется в кристалле вдоль оси. Изображения входной и выходной плоскостей образца проецируются на анализатор лазерных пучков изображающей линзой. Картины распределений световых полей, соответствующих изображениям с входной и выходной плоскостей 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 ее контроля используется бесконтактный инфракрасный термометр (точность определения температуры  $\pm 2$  °С).

Узкий световой пучок при распространении в среде испытывает дифракцию и его размеры в поперечном сечении увеличиваются. Это иллюстрируют картины

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

†E-mail: shandarovvm@svch.rk.tusur.ru

‡E-mail: vryabchenok@gmail.com

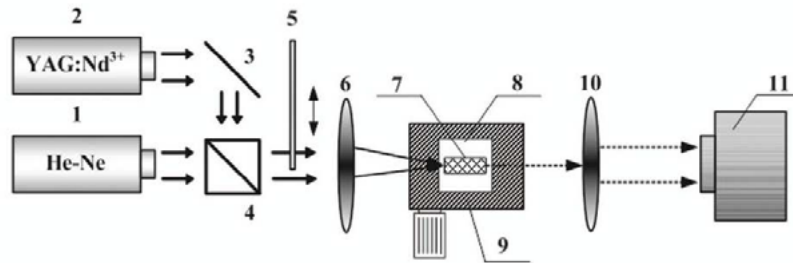


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1, 2 — источники лазерного излучения (He-Ne лазер,  $\lambda = 633$  нм, YAG:Nd<sup>3+</sup> лазер,  $\lambda = 532$  нм), 3 — зеркало, 4 — светоделительный кубик, 5 — стеклянная пластинка, 6 — фокусирующая линза, 7 — образец LiNbO<sub>3</sub>, 8 — трехкоординатный микрометрический столик, 9 — элемент Пельтье, 10 — изображающая линза, 11 — анализатор лазерных пучков.

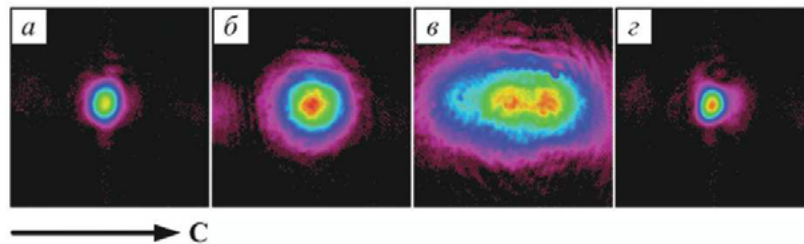


Рис. 2: Картины распределения световых полей ( $\lambda = 633$  нм) на входной (а) и выходной (б) гранях кристалла в начальный момент времени в линейном режиме дифракции (световая мощность 1 мкВт); в, г — картины световых полей на выходной плоскости образца при световой мощности 1 мВт (в) и нагреве кристалла до температуры 35 °С (г).

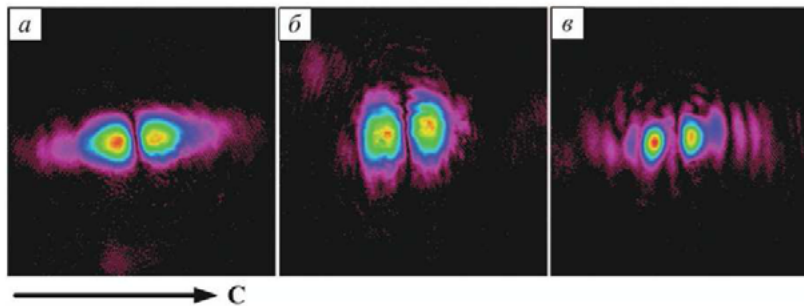


Рис. 3: Картины распределения световых полей ( $\lambda = 633$  нм) на входной (а) и выходной (б) гранях кристалла в начальный момент времени в линейном режиме дифракции (световая мощность 1 мкВт); в — картина светового поля на выходной плоскости образца при мощности излучения 1 мВт и нагреве кристалла до температуры 35 °С.

светового поля на входной (а) и выходной (б) плоскостях кристаллического образца на рис. 2 (длина волны света  $\lambda = 633$  нм). Световая мощность в этом случае  $\sim 1$  мкВт для исключения влияния фоторефрактивного эффекта на световое поле. Температура образца соответствует комнатной ( $T = 25^\circ\text{C}$ ). Вследствие линейной дифракции диаметр светового пятна на выходной грани увеличивается примерно до 45 мкм. Исследуемый образец не легирован специальными примесями, но фоторефрактивный эффект в нем проявляется при воздействии видимого света из-за наличия собственных дефектов кристалла. Поэтому в освещенной области образца возникает электрическое поле пространствен-

ного заряда в направлении, параллельном направлению оптической оси кристалла. Вследствие самодифрагирующего характера фоторефрактивного нелинейного отклика в LiNbO<sub>3</sub> 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. 2, в). Поляризация света соответствует в данном случае необыкновенной волне в кристалле. Это нелинейная дифракция светового пучка. Компенсация как линейной, так и нели-

нейной дифракции света достигается при этой световой мощности путем однородного нагрева кристалла до температуры 35 °С (рис. 2, з). Изменение температуры образца приводит к изменению спонтанной поляризации кристалла и возникновению пироэлектрического поля, понижающего показатель преломления однородно нагретого кристалла. В освещенной же области пироэлектрическое поле экранируется вследствие фотопроводимости среды, приводящей к дрейфовому перераспределению носителей заряда и компенсации пироэлектрического поля. Таким образом, взаимодействие фоторефрактивного и пироэлектрического эффекта при определенных условиях приводит к формированию двумерного светлого пространственного солитона — пиролитона [2] и формированию двумерного 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 в  $\text{LiNbO}_3$ . В проведенных экспериментах иллюстрируется формирование волноводной структуры из двух параллельных канальных волноводов диаметром около 23 мкм за счет вклада пироэлектрического эффекта в обсуждаемом кристаллическом образце при длине волны света. Формирующее световое поле представляет собой круговой лазерный пучок с изменением знака поля (сдвиг фазы на нечетное число  $\pi$ ) в половинах его апертуры. Поле фазировалось в направлении, параллельном направлению оптической оси кристалла.

Результаты формирования двухканальной волноводной структуры иллюстрируют изображения световых полей на входной (а) и выходной (б, в) плоскостях кристаллического образца, приведенные на рис. 3. В дан-

ном случае поляризация света также соответствует необыкновенной волне в кристалле, а  $\lambda = 633$  нм.

Приведенные картины показывают, что в линейном режиме наблюдается обычное дифракционное уширение светового поля фазированного пучка (оптическая мощность 1 мкВт). С течением времени проявляется нелинейное уширение картины светового поля вдоль направления, параллельного оптической оси кристалла (оптическая мощность 1 мВт). Нагрев образца до температуры 35 °С приводит к компенсации линейного и нелинейного дифракционного уширения светового поля и на заключительном этапе характерные размеры элементов светового поля становятся практически такими же, как и на входной плоскости кристалла (рис. 3, в). Время, необходимое для полной компенсации дифракции светового поля при указанной мощности излучения и температуры кристалла, составляет около 30 секунд.

Для излучения с длиной волны  $\lambda = 532$  нм наблюдаются аналогичные эффекты при световых мощностях от 50–100 мкВт. Время формирования волноводных каналов составило при этом, в зависимости от величины световой мощности, 20–30 с.

Таким образом, экспериментальные результаты демонстрируют возможность оптического формирования в кристаллах ниобата лития сложных волноводных структур при длинах волн света как 532 нм, так и 633 нм, топология которых определяется распределением светового поля на входной плоскости образца, за счет вклада пироэлектрического механизма в нелинейный отклик.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой части Госзадания Минобрнауки РФ на 2015 г. (проект № 3642) и проектной части (работа № 3.878.2014/К).

- [1] Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. С.Пб.: Наука. (1992).  
 [2] Safioui J. et al. Optics Express. **17**, N 24. P. 22209. (2009).  
 [3] Safioui J. et al. Photorefractive Materials, Effects, and Devices Control of Light and Matter. P. 209. (2009).  
 [4] Парханюк А.Н. и др. Доклады Томского государствен-

ного университета систем управления и радиоэлектроники. № 24. С. 124. (2011).

- [5] Перин А.С. и др. Ученые записки физического факультета МГУ. № 5. (2013). <http://uzmu.phys.msu.ru/abstract/2013/5/135044>.  
 [6] Fazioetal E. Appl. Phys. Lett. **85**. P. 2193. (2004).

## Pyroelectric formation of channel waveguide structures in lithium niobate by laser beam with the wavelength of 633 nm

A. S. Perin<sup>a</sup>, V. M. Shandarov<sup>b</sup>, V. Y. Ryabchenok<sup>c</sup>

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

E-mail: <sup>a</sup>perin.anton@gmail.com, <sup>b</sup>shandarovvm@svch.rk.tusur.ru, <sup>c</sup>vyryabchenok@gmail.com

Formation of two-dimensional channel waveguides and couples of such waveguides within a bulk of undoped lithium niobate has been experimentally demonstrated. Waveguide structures with a channel diameter of  $23\ \mu\text{m}$  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 633 nm and the optical power was ranged from  $1\ \mu\text{W}$  to 1 mW in experiments. The total compensation of the diffraction divergence at uniform heating of the crystal sample to the temperature from 35 degrees.

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

Keywords: lithium niobate, pyroelectric effect, spatial soliton.

Received 27.07.2015.

#### Сведения об авторах

1. Перин Антон Сергеевич — канд. техн. наук, младший научный сотрудник, тел.: (3822) 701-518, e-mail: perin.anton@gmail.com.
2. Шандаров Владимир Михайлович — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор, тел.: (3822) 701-518, shandarovvm@svch.rk.tusur.ru.
3. Рябченко Владимир Юрьевич — аспирант, младший научный сотрудник, тел.: (3822) 701-518, e-mail: vryabchenok@gmail.com.