

Двумерные одноканальные и многоканальные оптически индуцированные волноводные структуры, сформированные в кристалле ниобата лития с учетом пироэлектрического эффекта

А. С. Перин,^{*} Т. Л. Григорян,[†] Б. М. Будаев,[‡] В. М. Шандаров[§]

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

(Статья поступила 20.07.2017; Подписана в печать 16.10.2017)

Экспериментально продемонстрировано формирование одиночных двумерных и многоканальных (3 и 5 волноводов) в объеме нелегированного кристалла ниобата лития. Волноводные структуры с размером каналов 8, 12, 23 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 индуцирующего пучка составляла 532 нм и 633 нм, световая мощность излучения при записи изменялась от 50 до 200 мВт. Полная компенсация дифракционной расходимости достигалась при однократном нагреве кристаллического образца до температуры от 35 до 55 °С.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

Распространение оптического излучения в нелинейно-оптических средах может сопровождаться эффектами трансформации спектральной и пространственной структуры световых полей [1]. В средах с кубичной нелинейностью значительный интерес представляют эффекты самовоздействия света, проявляющиеся в результате изменения диэлектрической проницаемости среды на частоте падающей световой волны [1, 2]. Для световых пучков это приводит к пространственному самовоздействию, под которым понимаются явления их самофокусировки, самодифракции и формирование пространственных оптических солитонов [2, 3]. Режим пространственных солитонов предполагает полную компенсацию дифракционного уширения светового пучка за счет оптической нелинейности материала. В традиционных диэлектрических материалах с керровской нелинейностью, обусловленной электронной поляризацией среды, подобные эффекты могут наблюдаться лишь при интенсивностях света в сотни МВт/см² [2, 4]. Однако оптическая нелинейность может иметь и другую природу, например это ориентационная нелинейность жидких кристаллов [2, 5], термооптическая нелинейность жидкостей и твердых тел [6], фоторефрактивная нелинейность нецентросимметричных электрооптических кристаллов [2, 7]. При исследовании эффектов пространственного самовоздействия

световых полей наибольший интерес проявляется к фоторефрактивным материалам, в которых данные эффекты могут наблюдаться при интенсивностях света в мВт/см² [2, 7].

В данной работе исследованы условия, при которых происходит формирование в кристаллах LiNbO₃ двумерных светлых солитонов и, соответственно, канальных волноводно-оптических структур и схем, путем оптического индуцирования изменения показателя преломления материала с учётом пироэлектрического механизма нелинейного отклика без приложения внешних электрических полей.

1. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Источниками излучения являлись He-Ne лазер 1 с длиной волны излучения $\lambda = 633$ нм (выходная мощность около 1 мВт) и твердотельный лазер YAG:Nd³⁺ 2 с удвоением частоты ($\lambda = 532$ нм, выходная мощность до 50 мВт). Поляризация света во всех экспериментах соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Зеркало 3 и светоделительный кубик 4 обеспечивали распространение излучения с разными длинами волн по одному и тому же пути. Это давало возможность исследования условий достижения солитонного режима распространения световых пучков с разными длинами волн. Для формирования структуры, состоящей из трех и пяти волноводных каналов, использовались световые пучки, получаемые путём дифракции индуцирующего излучения на дополнительно введенной в схему эксперимента дифракционной решетке 5. С помощью сферической линзы 6 световые пучки фокусировались на входную грань кристаллического образца 7. Фокусное расстояние линзы опре-

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

†E-mail: tigrangriogoryan@gmail.com

‡E-mail: boss.buyanto@mail.ru

§E-mail: shandarovvm@svch.rk.tusur.ru

делялось требуемым диаметром перетяжки пучка на этой грани. В экспериментах при фокусном расстоянии 40 мм диаметр светового пятна в перетяжке составлял ~ 23 мкм при $\lambda = 633$ нм и ~ 12 мкм при $\lambda = 532$ нм. Образец LiNbO_3 имел размеры $4 \times 10 \times 4$ мм³ вдоль осей X, Y, Z соответственно.

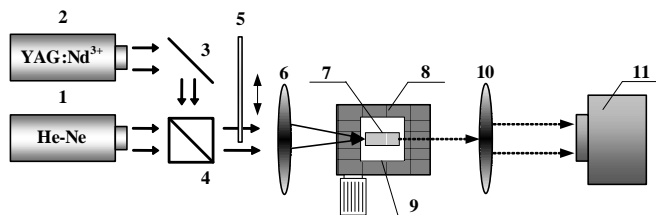


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1, 2 — источники лазерного излучения (He–Ne лазер, $\lambda = 633$ нм, YAG:Nd³⁺ лазер, $\lambda = 532$ нм), 3 — зеркало, 4 — светоделительный кубик, 5 — дифракционная решетка, 6 — фокусирующая линза, 7 — образец LiNbO_3 , 8 — элемент Пельтье, 9 — трехкоординатный микрометрический столик, 10 — изображающая линза, 11 — анализатор лазерных пучков

Кристалл не легирован специальными примесями, увеличивающими фоторефрактивную чувствительность, однако фоторефрактивный эффект в нем проявлялся из-за наличия собственных дефектов либо присутствия неконтролируемых примесей. Свет распространялся в образце LiNbO_3 вдоль оси Y . Для обеспечения однородного (или почти однородного) нагрева кристалла образец размещался на поверхности термоэлектрического преобразователя Пельтье 8, размещенного на столике с микрометрическим позиционированием 9. На поверхность нагревательного элемента, соприкасающаяся с гранью кристаллического образца, наносился тонкий слой теплопроводящей пасты, что позволяло обеспечить лучшую теплопередачу, остальные грани кристалла оставались свободными. В экспериментах кристаллический образец мог нагреваться до 90°C . Контроль температуры осуществлялся бесконтактным инфракрасным термометром (точность определения температуры $\pm 2^\circ\text{C}$). Изображения световых полей на входной и выходной гранях кристалла могли проецироваться с помощью изображающей линзы 10 на поверхность чувствительного сенсора видекамеры 11 (анализатора лазерных пучков), сопряженного с персональным компьютером.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведены картины распределений световых полей на входной (а) и выходной (б) гранях образца при диаметре пучка на входной плоскости кристалла ~ 23 мкм при $\lambda = 633$ нм и ~ 12 мкм при $\lambda = 532$ нм, световой мощности 10 мкВт и температуре образца, соответствующей комнатной ($T = 25^\circ\text{C}$). Вследствие линейной дифракции диаметр светового пятна на выход-

ной грани увеличивается примерно до 50 мкм. Увеличение световой мощности до 50 мкВт приводит к индуцированию в освещенной области образца оптической неоднородности, обусловленной фоторефрактивным эффектом. Индуцированная оптическая неоднородность приводит к увеличению дифракционной расходимости светового пучка, что демонстрируется уширением картины распределения светового поля преимущественно вдоль оптической оси кристалла (рис. 2, в). Для компенсации как линейной, так и нелинейной дифракции светового пучка кристалл подвергается однородному нагреву до температуры 35°C . Далее взаимодействие фоторефрактивного и пироэлектрического эффекта приводит к формированию пиролитона [8] и формированию двумерного волноводного канала в объеме кристалла (рис. 2, г).

Для случая фотоиндуцирования волноводно-оптических схем, состоящих из трех и пяти канальных волноводов картины световых полей на входной и выходной плоскостях образца имеют вид, представленный соответственно на рис. 3 и 4. На рис. 3 приведены картины световых полей на входной (а) и выходной (б–г) гранях образца при длине волны света $\lambda = 532$ нм, диаметре пучка на входной плоскости кристалла ~ 12 мкм, при поляризации световой волны, соответствующей необыкновенной волне в кристалле.

В данном случае для компенсации как линейной, так и нелинейной дифракции светового пучка кристалл нагревался до температуры 55°C . В результате поперечные размеры световых пятен на выходной плоскости кристаллического образца уменьшаются до их размеров на входной плоскости, что свидетельствует о достижении режима светлых пространственных солитонов (рис. 3, г). Время, необходимое для полной компенсации дифракции светового поля при указанных условиях экспериментов составляло от 20 до 30 с.

Для случая формирования пяти светлых двумерных солитонов и, соответственно, волноводной схемы, состоящей из пяти канальных волноводов при длине волны излучения $\lambda = 532$ нм (рис. 4) световая мощность индуцирующего излучения составила 200 мкВт, а температура кристалла увеличилась от комнатной до 55°C . Время формирования волноводных каналов составило при этом 30 с, а диаметр полученных волноводных каналов — около 8 мкм.

Следует отметить, что наряду с формированием и изучением особенностей характеристик двумерных волноводных элементов, представляет интерес и возможность оптического формирования в LiNbO_3 , с обращенным знаком нелинейного отклика, планарных оптических волноводов в режиме одномерных пространственных солитонов. 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

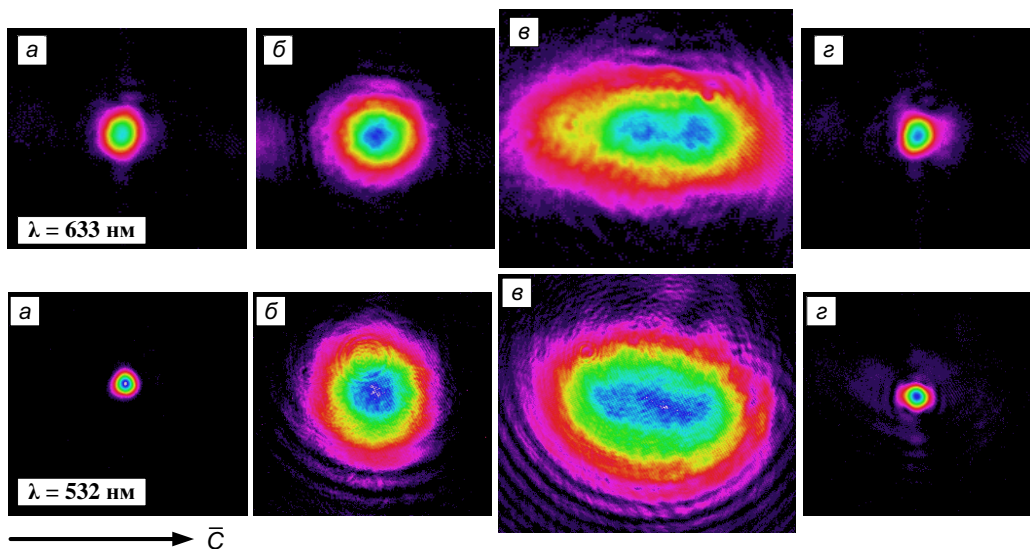


Рис. 2: Картины распределения световых полей (верхний ряд для $\lambda = 633$ нм; нижний ряд для $\lambda = 532$ нм) на входной (а) и выходной (б) гранях кристалла в начальный момент времени в линейном режиме дифракции; в, з — картины световых полей на выходной плоскости образца при световой мощности 50 мкВт (в) и нагреве кристалла до температуры 35°C (з)

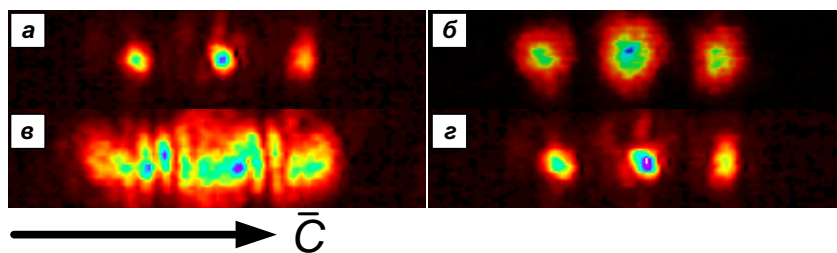


Рис. 3: Картины распределения световых полей на входной (а) и выходной гранях кристалла в начальный момент времени в линейном (б) и нелинейном (в) режиме дифракции; з — картины световых полей на выходной плоскости образца в режиме светлых пространственных солитонов

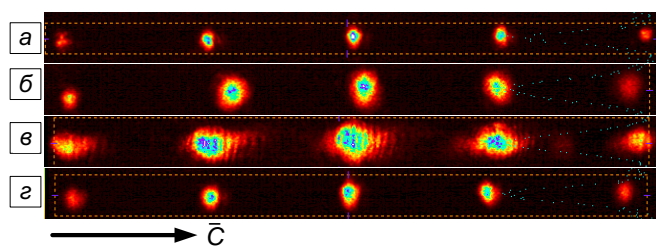


Рис. 4: Картины распределения световых полей на входной (а) и выходной (б) гранях кристалла в начальный момент времени в линейном режиме дифракции; в — картина светового поля на выходной плоскости образца при мощности излучения 200 мкВт и картина (з) при нагреве кристалла до температуры 55°C

ответвитель. Подобно одиночным волноводным кана-

лам [9], такие структуры могут быть индуцированы и в LiNbO_3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе экспериментально продемонстрировано, что при нагреве нелегированного образца кристалла ниобата лития до температуры 35–55°C при его освещении световыми пучками с длинами волн света $\lambda = 633$ нм и $\lambda = 532$ нм, происходит формирование канальных волноводных структур в объёме кристалла, топология которых определяется распределением светового поля на входной грани образца.

Работа выполнена в рамках проектной части (проект по заявке 3.1110.2017/ПЧ) и базовой части (задание № 3.8898.2017/БЧ) Госзадания Минобрнауки РФ на 2017–2019 гг.

[1] Akhmanov S. A. , Sukhorukov A. P., Khokhlov R. V. Sov. Phys. Usp. 1968. N 10. P. 609.

[2] Kivshar Y. S., Agrawal G. P. Academic Press. 2003.

- [3] *Chen Z., Segev M., Christodoulides D. N.* Rep. Prog. Phys. 2012. **75**. Art. 086401.
[4] *Chekalin S. V., Kandidov V. P.* Phys. Usp. 2013. **56**, N 2. P. 123.
[5] *Karpierz M. A.* Phys. Rev. E. 2002. **66**. Art. 036603.
[6] *Santhi A., Namboodiri V. V., Radhakrishnan P., Nampori V. P. N.* Appl. Phys. Lett. 2006. **89**. Art. 231113.
[7] *Krätzig E.* Ferroelectrics. 1990. **104**, N 1. P. 257.
[8] *Safioui J., Devaux F., Chauvet M.* Optics Express. 2009. **17**, N 24. P. 22209.
[9] *Popescu S. T., Petris A., Vlad V. I.* J. Appl. Phys. 2013. **113**. Art. 213110.

Two-dimensional single-channel and multichannel optically induced waveguide structures formed in a lithium niobate crystal with the pyroelectric effect

A. S. Perin^a, T. L. Grigoryan^b, B. M. Budaev^c, V. M. Shandarov^d

*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, ^btigrangriogoryan@gmail.com, ^cboss.buyanto@mail.ru, ^dshandarovvm@svch.rk.tusur.ru

Formation of single two-dimensional waveguides and multi-element (3 and 5 waveguides) of such waveguides within a bulk of undoped lithium niobate has been experimentally demonstrated. Waveguide structures with a channel size of 8, 12, 23 μm 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 were 532 and 633 nm and the optical power was ranged from 50 to 200 μW in experiments. The total compensation of the diffraction divergence at uniform heating of the crystal sample to the temperature from 35 to 55°C.

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

Keywords: lithium niobate, photorefractive effect, pyroelectric effect, spatial soliton, pyroliton.

Received 20 July 2017.

Сведения об авторах

1. Перин Антон Сергеевич — канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; тел.: (3822) 701-518, e-mail: perin.anton@gmail.com.
 2. Григорян Тигран Липаритович — студент, e-mail: tigrangriogoryan@gmail.com.
 3. Будаев Буянто Мункожаргалович — студент, e-mail: boss.buyanto@mail.ru.
 4. Шандаров Владимир Михайлович — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор, тел.: (3822) 701-518, shandarovvm@svch.rk.tusur.ru.
-