

УДК 621.372.8

А.Д. Безпалый, **В.М. Шандаров**, А.Е. Мандель

Канальные волноводные структуры, оптически индуцированные в кристалле ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем

Представлены результаты экспериментальных исследований формирования канальных оптических волноводных структур в образцах ниобата лития Y-среза с фоторефрактивным поверхностным слоем. Структуры получены путем поточечного индуцирования изменений показателя преломления лазерным излучением из зеленой области спектра.

Ключевые слова: оптическое индуцирование, поточечное экспонирование, ниобат лития, фоторефрактивный эффект, канальные волноводы.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-14-16

За последние годы преобразование световых полей и изучение способов управления светом привлекает наибольший интерес для интегральной оптики и волноводной фотоники [1, 2]. В связи с этим большинство задач требует решения по созданию и разработке элементов локализации лазерного излучения, что способствует развитию и совершенствованию оптических устройств и приборов [3–5]. В качестве таких элементов могут выступать волноводные структуры на основе фоторефрактивных материалов, одним из которых является ниобат лития [6–8]. Благодаря своим физическим и нелинейно-оптическим свойствам кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) широко используются на практике [2]. При помощи света можно воздействовать на изменение показателя преломления LiNbO_3 , что позволяет формировать канальные оптические волноводы, топология которых определяется способом оптического индуцирования и формой пути экспонирующего пучка [9, 10].

Оптическое индуцирование канальных волноводов и волноводных систем можно осуществлять различными способами: например, при помощи амплитудной маски, фокусировки лазерного излучения цилиндрической линзой или последовательным поточечным экспонированием, фокусируя световой пучок на поверхность кристалла сферической линзой [10–13].

Поточечное формирование позволяет контролировать локализацию экспонирующего излучения как по глубине кристалла, так и по его поперечным и продольным координатам, влияя тем самым на распределение суммарной интенсивности в фоторефрактивном материале. Так, при поточечном индуцировании канальных волноводов появляется возможность осуществлять периодическую модуляцию их параметров с различным шагом, что позволяет задавать продольную однородность структур, а также топологию и пространственные размеры таких структур в процессе формирования [13–15].

Целью данной работы является исследование возможностей формирования канальных волноводных структур различной топологии с пространственно-модулированными параметрами при их поточечном индуцировании в приповерхностном слое кристалла ниобата лития.

Оптическое индуцирование волноводных структур

Канальные волноводы индуцировались фокусированным лазерным пучком путем последовательного поточечного экспонирования поверхности кристаллического образца LiNbO_3 Y-среза с размерами $30 \times 3 \times 15$ мм³ по осям X, Y, Z соответственно. Поверхностный слой кристалла толщиной около 100 мкм легирован ионами меди. Источником излучения послужил YAG:Nd^{3+} лазер с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Свет распространялся вдоль оси Y кристалла. Поляризация экспонирующего излучения с мощностью 10 мВт соответствовала обыкновенной волне в кристалле. Расстояние между центрами экспонированных точек составляло в разных экспериментах от 25 до 50 мкм. Площадь экспонируемой области легированного слоя в различных экспериментах изменялась от ~200 до 3000 мкм².

Экспонированные области, образованные в виде параллельных полосок, сформированы из последовательно расположенных пятен с различным расстоянием между их центрами (рис. 1).

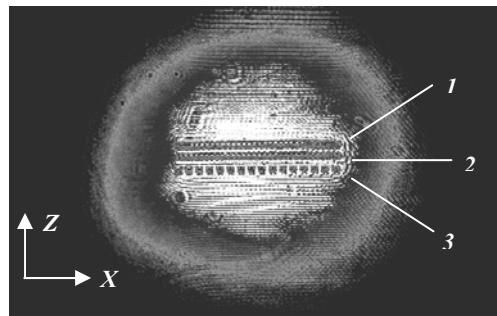


Рис. 1. Результат зондирования волноводной системы, сформированной поточечным экспонированием поверхности образца с расстоянием между центрами световых пятен 25 мкм (полоски 1 и 2) и 50 мкм (полоска 3)

Создавать прямолинейные структуры возможно и при оптическом индуцировании, фокусируя излучение цилиндрической линзой (рис. 2). Однако при использовании данного метода длина формируемых структур задается продольными размерами экспонирующего пучка. Такой способ недостаточно удобен, когда необходимо формировать структуры с меньшей длиной, так как для этого нужно ограничить апертуру формирующего пучка. В то же время пото-

точный метод позволяет задавать необходимую длину индуцированной структуры в процессе формирования [13–15].

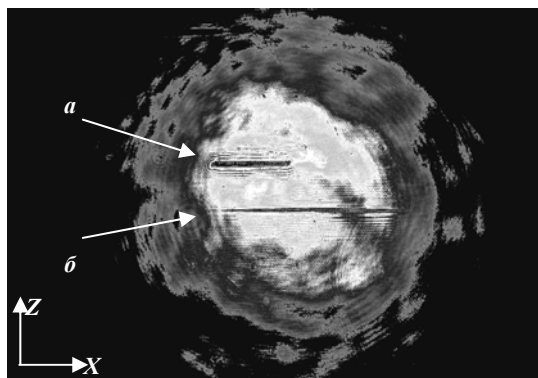


Рис. 2. Результат зондирования структур, сформированных перпендикулярно оптической оси кристалла поточечным методом (а) и с помощью цилиндрической линзы (б)

При индуцировании структур, ориентированных вдоль оптической оси, формирование фоторефрактивных фазовых элементов затруднено. Это связано с тем, что поле пространственного заряда появляется только на границах освещенной области, перпендикулярной направлению оптической оси кристалла. Однако поточечное экспонирование поверхности образца узким световым пучком позволяет индуцировать структуры вдоль оптической оси кристалла (рис. 3).

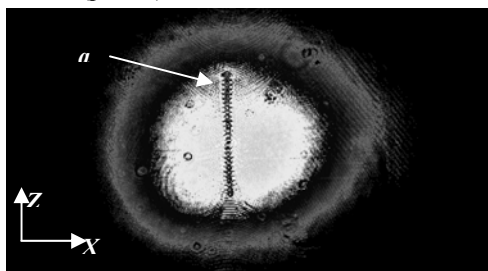


Рис. 3. Результат зондирования структуры, сформированной вдоль оптической оси кристалла поточечным методом

Поточечное индуцирование позволяет формировать прямолинейные структуры не только с периодически модулированными параметрами, но и изменять период модуляции показателя преломления в процессе формирования таких структур. Результат записи подобной структуры представлен на рис. 4.

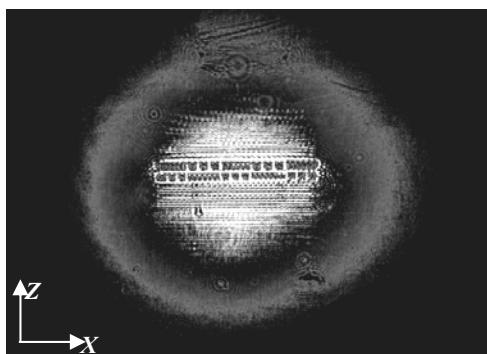


Рис. 4. Результат зондирования индуцированной волноводной структуры с изменением периода модуляции показателя преломления в процессе формирования

Полученные экспериментальные результаты показывают, что топология поточечно индуцированных канальных волноводных структур может не ограничиваться прямыми однородными линиями. Экспонирование поточечным методом позволяет создавать в фоторефрактивных слоях волноводные системы более сложной формы, определяемой траекторией смещения светового пятна по поверхности образца.

Заключение

Таким образом, в работе экспериментально продемонстрированы методы оптического индуцирования канальных волноводных структур с пространственной модуляцией их параметров в кристалле LiNbO_3 с фоторефрактивным поверхностным слоем. Полученные структуры можно многократно оптически реконфигурировать, что является важным при разработке и создании как отдельных элементов управления светом в оптических устройствах и приборах фотоники, так и для осуществления связи активных компонентов интегрально-оптических схем между собой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 3.1110.2017/ПЧ в рамках Госзадания вузу) и РФФИ (грант 16-29-14046-офи_м).

Литература

1. Kivshar Y.S. Optical solitons: from fibers to photonic crystals. – Academic Press, 2003. – 540 p.
2. Petrov M.P., Stepanov S.I., Khomenko A.V. Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems. – Springer Series in Optical Sciences, 2013. – 277 p.
3. Bazzan M. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications / M. Bazzan, C. Sada // Appl. Phys. Rev. – 2015. – Vol. 2, No. 4. – P. 040603-1–040603-25.
4. Kip D. Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications // Appl. Phys. B. – 1998. – Vol. 67. – P. 131–150.
5. Chen F. Development of ion implanted optical waveguides in optical materials: a review / F. Chen, X.L. Wang and K.M. Wang // Opt. Mater. – 2017. – Vol. 29. – P. 1523–1542.
6. Davydov S.A. Quasi-One-Dimensional Photonic Lattices and Superlattices in Lithium Niobate: Linear and Nonlinear Discrete Diffraction of Light / S.A. Davydov, P.A. Trenikhin, V.M. Shandarov, K.V. Shandarova, D. Kip, Ch. Rueter, F. Chen // Physics of Wave Phenomena. – 2010. – Vol. 18, No.1. – P. 1–6.
7. Chen F. Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 106, № 8. – P. 081101.
8. Das B.K. Distributed Feedback-Distributed Bragg Reflector Couple Cavity Laser With a $\text{Ti}(\text{Fe})\text{:Er}:\text{LiNbO}_3$ Waveguide // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29. – P. 165–167.
9. Vittadello L. Photorefractive direct laser writing / L. Vittadello, A. Zaltron, N. Argiolas, M. Bazzan, N. Rossetto, R. Signorini // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2016. – Vol. 49, No. 12. – P. 1–9.
10. Kroesen S. Electro-optical tunable waveguide embedded multiscan Bragg gratings in lithium niobate by direct femtosecond laser writing / S. Kroesen, W. Horn, J. Imbrock, C. Denz // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, No. 19. – P. 23339–23348.
11. Kanshu A. Optically-induced defect states in photonic lattices: formation of defect channels, directional couplers, and disordered lattices leading to Anderson-like light localization / A. Kanshu, C.E. Rüter, D. Kip, V.M. Shandarov // J. Appl. Phys. – 2009. – B. 95. – P. 537–543.

12. Courjal N. Low-loss LiNbO₃ tapered-ridge waveguides made by optical-grade dicing / N. Courjal, F. Devaux, A. Gerthoffer et al. // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23. – P. 13983–13990.

13. Безпальный А.Д. Волноводные и дифракционные элементы устройств и приборов фотоники, оптически индуцированные в подложках ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем / А.Д. Безпальный, А.О. Верхотуров, В.М. Шандаров // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 4 (38). – С. 86–90.

14. Bezpaly A.D. Channel waveguides and phase diffraction gratings optically formed in photorefractive surface layers of lithium niobate / A.D. Bezpaly, A.O. Verkhoturov, V.M. Shandarov // *Proceedings of SPIE*. – 2017. – Vol. 10603. – P. 106030O-1–106030O-6.

15. Bezpaly A.D. Optical writing of channel waveguides and 1D diffraction gratings in photorefractive surface layers of lithium niobate / A.D. Bezpaly, A.O. Verkhoturov, V.M. Shandarov // *Ferroelectrics*. – 2017. – Vol. 515:1. – P. 34–43.

5. Chen F., Wang X.L. and Wang K.M. Development of ion implanted optical waveguides in optical materials: a review. *Opt. Mater*, 2017, vol. 29, pp. 1523–1542.

6. Davydov S.A. Quasi-One-Dimensional Photonic Lattices and Superlattices in Lithium Niobate: Linear and Nonlinear Discrete Diffraction of Light. *Physics of Wave Phenomena*, 2010, vol. 18, no. 1, pp. 1–6.

7. Chen F. Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, no. 8, p. 081101.

8. Das B.K. Distributed Feedback-Distributed Bragg Reflector Couple Cavity Laser With a Ti:(Fe):Er:LiNbO₃ Waveguide. *Optics Letters*, 2004, vol. 29, pp. 165–167.

9. Vittadello L., Zaltron A., Argiolas N., Bazzan M., Rossetto N., Signorini R. Photorefractive direct laser writing. *J. Phys. D: Appl. Phys*, 2016, vol. 49, no. 12, pp. 1–9.

10. Kroesen S., Horn W., Imbrock J., Denz C. Electro-optical tunable waveguide embedded multiscan Bragg gratings in lithium niobate by direct femtosecond laser writing. *Optics Express*, 2014, vol. 22, no. 19, pp. 23339–23348.

11. Kanshu A., Rüter C. E., Kip D. and Shandarov V. M. Optically-induced defect states in photonic lattices: formation of defect channels, directional couplers, and disordered lattices leading to Anderson-like light localization. *J Appl. Phys.*, 2009, b. 95, pp. 537–543.

12. Courjal N., Devaux F., Gerthoffer A. et al. Low-loss LiNbO₃ tapered-ridge waveguides made by optical-grade dicing. *Optics Express*, 2015, vol. 23, pp. 13983–13990.

13. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Waveguide and diffraction elements of photonic devices and structures optically induced in lithium niobate wafers with photorefractive surface layer. *Doklady TUSUR*, 2015, №4 (38), pp. 86–90.

14. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Channel waveguides and phase diffraction gratings optically formed in photorefractive surface layers of lithium niobate. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10603, pp. 106030O-1–106030O-6.

15. Bezpaly A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Optical writing of channel waveguides and 1D diffraction gratings in photorefractive surface layers of lithium niobate. *Ferroelectrics*, 2017, vol. 515:1, pp. 34–43.

Безпальный Александр Дмитриевич

Аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР), мл. науч. сотр. научно-образовательного центра «Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии» Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-18
Эл. почта: id_alex@list.ru

Шандаров Владимир Михайлович

Д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотр. научно-образовательного центра «Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии» ТУСУР

Мандель Аркадий Евсеевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) ТУСУР Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-18
Эл. почта: mandelae@svch.tusur.ru

Bezpaly A.D., [Shandarov V.M.], Mandel A.E.

Channel waveguide structures optically induced in a lithium niobate crystal with a photorefractive surface layer

Experimental results of studies of channel waveguide structures formation in Y-cut lithium niobate samples with photorefractive surface layers are demonstrated. The structures are obtained by point-by-point inducing of refractive index changes by laser radiation from blue-green range.

Keywords: optical inducing, point-by-point exposure, lithium niobate, photorefractive effect, channel waveguides.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-14-16

References

1. Kivshar Y.S. *Optical solitons: from fibers to photonic crystals*. Academic Press, 2003. 540 p.

2. Petrov M.P., Stepanov S.I., Khomenko A.V. *Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems*. Springer Series in Optical Sciences, 2013. 277 p.

3. Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications. *Appl. Phys. Rev.*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 040603-1–040603-25.

4. Kip D. Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications. *Appl. Phys. B.*, 1998, vol. 67, pp. 131–150.

Alexander D. Bezpaly

PhD student, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Junior Researcher, Science Educational Center «Nonlinear Optics, Nanophotonics and Laser Technologies», Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-18
Email: id_alex@list.ru

Vladimir M. Shandarov

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Science Educational Center «Nonlinear Optics, Nanophotonics and Laser Technologies», TUSUR

Arkady E. Mandel

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-15-18
Email: mandelae@svch.tusur.ru