

УДК 535:621.372.8

А.Д. Безпальный, В.И. Быков, А.Е. Мандель, В.А. Краковский

Изменения показателя преломления, индуцированные в поверхностном слое кристалла ниобата лития при формировании канальных волноводных структур для устройств оптоэлектроники

Представлены результаты экспериментальных исследований изменений показателя преломления, поточно индуцированных в поверхностно легированном кристалле ниобата лития при формировании канальных оптических волноводных структур. Изменения показателя преломления индуцированы путем экспонирования поверхности кристалла фокусированным лазерным излучением и исследованы при помощи интерферометра Жамена.

Ключевые слова: оптическое индуцирование, ниобат лития, канальные волноводы, показатель преломления, фоторефрактивный эффект, интерференция.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-33-36

В настоящее время кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) широко используются на практике в качестве подложки для различных устройств оптоэлектроники, таких как электрооптический модулятор, оптический переключатель или делитель световых сигналов [1–4]. Особую важность в конструкции фотонных и оптических устройств и приборов играют элементы локализации и преобразования световых сигналов, одними из которых являются волноводные и дифракционные структуры [1–9]. Канальные волноводы и дифракционные решетки можно создавать на основе кристаллов LiNbO_3 различными способами, например диффузией титана, методами ионной имплантации и протонного замещения [2, 4–6, 8, 9]. Благодаря фоторефрактивному эффекту, заключающемуся в изменении показателя преломления под воздействием света, в кристаллах LiNbO_3 можно формировать волноводные и дифракционные структуры путем направленной лазерной записи [2–4, 7, 9, 10]. Отличительной чертой лазерного индуцирования в сравнении с другими методами является возможность формирования канальных волноводов и дифракционных решеток с различными характеристиками и топологией любой сложности без необходимости создания специальных атмосферных условий [2–4, 7, 9–15].

Целью данной работы является исследование изменений показателя преломления, индуцированных в поверхностно легированном кристалле ниобата лития фокусированным лазерным излучением из видимой области спектра при формировании канальных волноводных структур.

Исследование изменений показателя преломления в индуцированных волноводных каналах

Эксперименты проводились с кристаллом ниобата лития X-среза, поверхностный слой которого был легирован ионами меди на глубину ~ 200 мкм. Кристалл имел размеры $1 \times 8 \times 14$ мм по осям X, Y, Z соответственно. Канальные волноводные структуры индуцировались лазерным пучком путем экспониро-

вания последовательности точек на поверхности кристалла [11, 12].

В качестве источников излучения использовались YAG:Nd³⁺ лазер с длиной волны $\lambda = 532$ нм и He-Ne лазер с $\lambda = 633$ нм. Световое излучение распространялось вдоль оси X кристалла. Поляризация света соответствовала обыкновенной волне в кристалле. Световой пучок фокусировался на поверхность кристалла микрометрическим объективом с $10\times$ увеличением. Плотность мощности фокусированного излучения составляла ~ 800 Вт/см². Расстояние между центрами экспонированных точек в экспериментах составляло 25 мкм. Экспонированные области представляли собой прямые полосы длиной ~ 1 мм. Каждая полоска была сформирована из последовательно расположенных пятен. Диаметр воздействующего на поверхность кристалла светового пучка составлял ~ 40 мкм по уровню 0,1 максимальной интенсивности. Время экспонирования одного пятна в разных экспериментах изменялось от 1 до 120 с [16].

Исследования изменений показателя преломления Δn , индуцированные в процессе формирования канальных волноводных структур в поверхностном слое подложки ниобата лития, проводились с помощью интерферометра Жамена. Для этого предварительно создавались одиночные полосы с пониженным показателем преломления, индуцированные вдоль оси Y (рис. 1). Каждая полоска состоит из 40 последовательно расположенных точек. Исследуемый образец с индуцированными структурами помещался в одно из плеч интерферометра Жамена, оптическая схема которого приведена на рис. 2.

В интерферометре в качестве источника излучения использовался He-Ne лазер с необыкновенной поляризацией световой волны и выходной мощностью ~ 1 мВт. Коллимированное лазерное излучение направлялось на зеркало (2), выступающее в роли светоделительного элемента и разделяющее излучение на два световых пучка. Кристалл ниобата лития с индуцированными структурами (3) помещался в одно из плеч интерферометра. Вторым зеркалом

интерферометра (4) оба световых пучка сводились, образуя интерференционную картину. Интерференционные картины на выходе интерферометра масштабировались сферической линзой (5) для совмещения с размерами матрицы ПЗС-камеры (6), сопряженной с компьютером (7). Полученные интерферограммы регистрировались на экране монитора компьютера (7). Примеры полученных интерферограмм представлены на рис. 3.

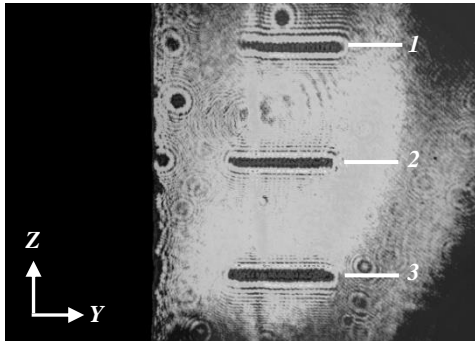


Рис. 1. Световая картина на выходной грани кристалла, полученная при зондировании поточечно индуцированных областей с пониженным показателем преломления. Время экспонирования одной точки в полоске: 1 – 5 с; 2 – 15 с; 3 – 30 с

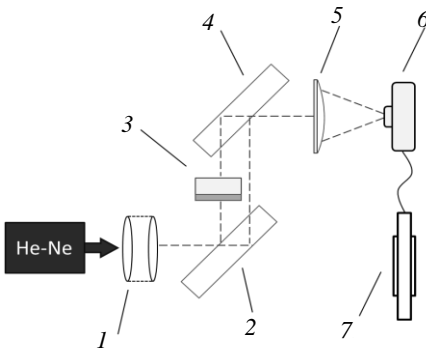


Рис. 2. Схема экспериментальной установки с интерферометром Жамена для исследования изменений показателя преломления, индуцированных в поверхностном слое

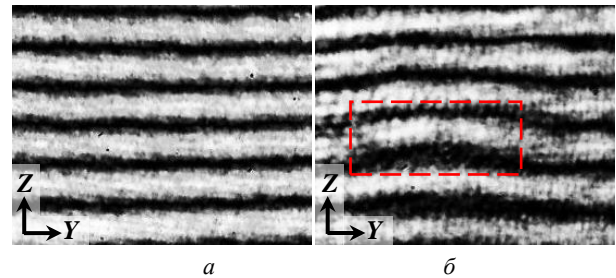
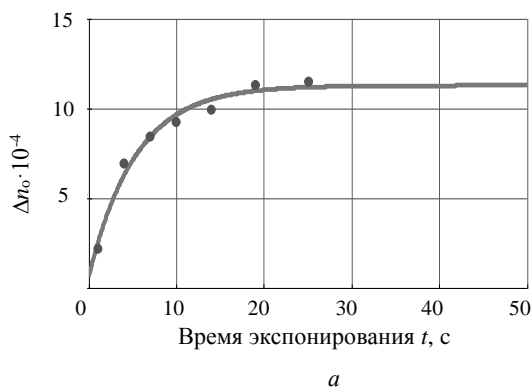


Рис. 3. Интерференционные картины на выходе интерферометра Жамена: а – в «чистой» области кристалла; б – в области структуры, индуцированной экспонированием кристалла лазерным излучением с $\lambda = 532$ нм в течение 30 с

Величины изменений показателя преломления в индуцированных областях при различном времени экспонирования кристалла лазерным излучением рассчитывались по формуле [17]

$$\Delta n = (\lambda \cdot \Delta\phi) / (2\pi \cdot d), \quad (1)$$

где λ – длина волны источника излучения интерферометра, $\Delta\phi$ – фазовый сдвиг интерференционных полос; d – толщина поверхностного слоя кристалла.

Полученные значения рассчитаны для изменений обыкновенного показателя преломления Δn_o при индуцировании волноводных структур излучением с разными длинами волн (рис. 4). При воздействии излучения с $\lambda = 532$ нм величина Δn_o изменяется от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ во временном интервале экспонирования от 1 до 25 с (рис. 4, а). Излучение с $\lambda = 633$ нм изменяет показатель преломления Δn_o до $6 \cdot 10^{-4}$ в течение 125 с времени экспонирования (рис. 4, б).

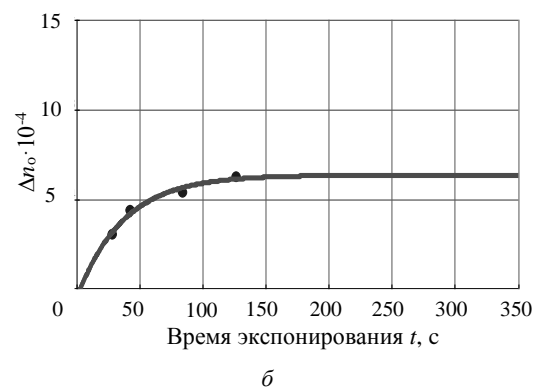


Рис. 4. Экспериментальные зависимости изменений обыкновенного показателя преломления Δn_o от времени воздействия лазерного излучения на поверхность кристалла при поточечном индуцировании канальных волноводных структур: а – $\lambda = 532$ нм; б – $\lambda = 633$ нм

Как видно из графиков рис. 4, а, величина индуцированных изменений показателя преломления Δn_o достигает насыщения за 25 с при экспонировании

кристалла светом из зеленой области спектра. Для достижения максимальной величины изменений Δn_o экспонированием света из красной области

спектра требуется в 5 раз больше времени – 125 с. Время, в течение которого происходят линейные изменения показателя преломления Δn_0 (при используемой в экспериментах плотности мощности лазерного излучения), составляет первые 5 с при экспонировании на длине волны $\lambda = 532$ нм и первые 35 с на длине волны $\lambda = 633$ нм.

Заключение

Таким образом, экспериментально определены изменения показателя преломления поверхностного слоя ниобата лития при поточечном индуцировании канальных волноводных структур. Данные результаты показывают, что модуляцию параметров канальных волноводных структур можно осуществлять не только путем изменения пространственного шага экспонирующего пятна, но и вариацией длительности воздействия лазерного излучения на кристалл. Это дает возможность создавать канальные волноводы с величиной изменения показателя преломления Δn , задаваемой в процессе их формирования. Полученные результаты могут быть использованы при реализации интегрально-оптических схем гибридных и полностью оптических устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 3.1110.2017/4.6 в рамках Госзадания вузу).

Литература

1. Toney J.E. Lithium niobate photonics. – Boston; London: Artech House, 2015. – 268 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. Reconfigurable directional coupler in lithium niobate crystal fabricated by three-dimensional femtosecond laser focal field engineering / Q. Zhang, M. Li, J. Xu, Z. Lin, H. Yu, M. Wang, Z. Fang, Y. Cheng, Q. Gong, and Y. Li // Photonics Research. – May 2019. – Vol. 7, No. 5. – P. 503–507.
4. 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.
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. Low-loss LiNbO₃ tapered-ridge waveguides made by optical-grade dicing / N. Courjal, F. Devaux, A. Gerthoffer, C. Guyot, F. Henrot, A. Ndao, M.-P. Bernal // Optics Express. – 2015. – Vol. 23. – P. 13983–13990.
7. 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.
8. Chen F. Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 106, No. 8. – P. 081101.
9. Das B.K. Distributed Feedback-Distributed Bragg Reflector Couple Cavity Laser With a Ti:(Fe):Er:LiNbO₃ Waveguide // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29. – P. 165–167.
10. Electro-optical tunable waveguide embedded multi-scan 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. Optically Induced Channel Waveguide Structures with Spatial Modulation of Parameters in the Surface Layer of Lithium Niobate / A.D. Bezpaly, V.M. Shandarov, A.E. Mandel, V.I. Bykov, K.M. Mambetova // Russian Phys. J. – July 2019. – Vol. 62, Is. 3. – P. 387–392.
12. Безпаль А.Д. Канальные волноводные структуры, оптически индуцированные в кристалле ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем / А.Д. Безпаль, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 14–16.
13. 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.
14. 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.
15. 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. – V. 95. – P. 537–543.
16. Оптическое формирование канальных волноводов и планарных дифракционных решеток в фоторефрактивном приповерхностном слое ниобата лития / А.Д. Безпаль, А.О. Верхотуров, В.М. Шандаров // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. – 2016. – № 5. – С. 165308.
17. Visualizations of Light-induced Refractive Index Changes in Photorefractive Crystals Employing Digital Holography / J.-L. Zhao, P. Zhang, J.-B. Zhou, D.-X. Yang, D.-S. Yang, E.-P. Li // Chin. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 20, No. 10. – P. 1748–1751.

Безпаль Александр Дмитриевич

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

Быков Виталий Иванович

Канд. физ.-мат. наук, доцент каф. электронных приборов (ЭП) ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: vitalii.i.bykov@tusur.ru

Мандель Аркадий Евсеевич

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

Краковский Виктор Адольфович

Д-р техн. наук, доцент, профессор каф. СВЧКР ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-18
Эл. почта: office1@crystall.ru

Bezpal A.D., Bykov V.I., Mandel A.E., Krakovskiy V.A.
Refractive index changes induced in the surface layer of a lithium niobate crystal during the channel waveguide formation for optoelectronic devices

This article presents the results of experimental studies of refractive index changes induced point-by-point in the surface-doped lithium niobate crystal during the formation of channel optical waveguide structures. Refractive index changes were obtained by a focused laser beam during the crystal surface exposure and investigated using a Jamin interferometer.

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

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-33-36

References

1. Toney J.E. *Lithium niobate photonics*. Boston-London, Artech House, 2015, 268 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. Zhang Q., Zhang Q., Li M., Xu J., Lin Z., Yu H., Wang M., Fang Z., Cheng Y., Gong Q., and Li Y. Reconfigurable directional coupler in lithium niobate crystal fabricated by three-dimensional femtosecond laser focal field engineering. *Photonics Research*, May 2019, vol. 7, no. 5, pp. 503–507.
4. 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.
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. 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.
7. 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.
8. Chen F. Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, no. 8, p. 081101.
9. 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.
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. Bezpal A.D., Shandarov V.M., Mandel A.E., Bykov V.I., Mambetova K.M. Optically Induced Channel Waveguide Structures with Spatial Modulation of Parameters in the Surface Layer of Lithium Niobate. *Rus. Phys. J.*, July 2019, vol. 62, is. 3, pp 387–392.
12. Bezpal A.D., Shandarov V.M., Mandel A.E. Channel Waveguide Structures Optically Induced in a Lithium Niobate Crystal with the Photorefractive Surface Layer. *Proceedings of TUSUR University*, 2018, № 3, pp. 14–16.

13. Bezpal 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.

14. 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.

15. 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.

16. Bezpal A.D., Verkhoturov A.O., Shandarov V.M. Optical formation of channel waveguides and planar diffraction gratings within photorefractive surface layer of lithium niobate. *Memoirs of the Faculty of Physics*, 2016, no. 5, pp. 165308.

17. Zhao J.-L., Zhang P., Zhou J.-B., Yang D.-X., Yang D.-S., Li E.-P. Visualizations of Light-induced Refractive Index Changes in Photorefractive Crystals Employing Digital Holography. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, vol. 20, no. 10, pp. 1748–1751.

Alexander D. Bezpal

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

Vitaliy I. Bykov

Candidate of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Electronic Devices, TUSUR
 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
 Phone: +7 (382-2) 41-33-69
 Email: vitalii.i.bykov@tusur.ru

Arkady E. Mandel

Doctor of Science in 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

Viktor A. Krakovskiy

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR
 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
 Phone: +7 (382-2) 70-15-18
 Email: office1@crystall.ru