

09

Интегрально-оптические свойства волноводов в кристаллах восстановленного ниобата лития

© А.В. Сосунов¹, А.В. Шипицын¹, И.В. Петухов¹, А.А. Мололкин², М.А. Базалевский²¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия²Университет науки и технологий „МИСИС“, Москва, Россия

E-mail: avsosunov@psu.ru

Поступило в Редакцию 11 августа 2025 г.

В окончательной редакции 1 октября 2025 г.

Принято к публикации 1 октября 2025 г.

Изучаются структура и электрооптические свойства волноводов в восстановленном ниобате лития для задач повышения технологичности и стабильности интегрально-оптических схем. Установлено повышение оптических потерь за счет увеличения дефектности материала в ходе восстановительного отжига. Также наблюдается снижение электрооптического коэффициента на 13.6 % по сравнению с таковым для образцов конгруэнтного ниобата лития. Поиск компромиссного решения между электрооптическими и пьезоэлектрическими свойствами восстановленного ниобата лития для его эффективного использования в задачах интегральной фотоники и оптоэлектроники является в дальнейшем ключевой задачей.

Ключевые слова: восстановленный ниобат лития, волновод, электрооптическая чувствительность, оптические потери.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.03.62180.20470

Ниобат лития (НЛ) является пиро-, пьезо- и сегнето-электриком и широко используется в качестве материала подложки в интегральной фотонике и оптоэлектронике. НЛ применяется при изготовлении модуляторов фазы и амплитуды излучения [1,2], датчиков электрического напряжения [3] и систем навигации [4]. Также огромный потенциал применения имеют тонкие пленки НЛ [5].

Интегрально-оптические схемы на основе НЛ имеют существенный недостаток, связанный с проблемой дрейфа рабочей точки [3,4,6–10]. Решение этой проблемы весьма актуально для фотонных вычислений, квантовых коммуникаций и датчиков физических величин [11–13]. Дрейф рабочей точки главным образом обусловлен электрическими неоднородностями в приповерхностном слое кристалла НЛ из-за его пьезоэлектрических свойств [6].

Одним из решений по снижению пьезоэлектрического эффекта в НЛ является восстановительный отжиг [10]. Поэтому целью работы является анализ структуры и электрооптических свойств восстановленного НЛ для оценки его применимости в интегрально-оптических устройствах.

В качестве исследуемых материалов использовали пластины НЛ X-среза производства АО „Фомос-Материалы“ (Россия) размером $10 \times 15 \times 1$ мм, отполированные с двух сторон. Восстановительный отжиг проводили в вакуумной печи при температуре 700°C в течение 2 ч. Электросопротивление образцов измеряли с помощью универсального электрометрического вольтметра В7Э-42 с диапазоном измерения сопротивления до $10^{18} \Omega$. В качестве электродов использова-

ли прижимные медные пластины. Верхний электрод имел прямоугольную форму размером 10×2 мм, а нижний — форму круга диаметром 11 мм. Образец помещали между двумя этими электродами и измеряли электросопротивление R , которое затем пересчитывали в удельное электросопротивление образца ρ по формуле

$$\rho = \frac{RS}{l}, \quad (1)$$

где S — площадь верхнего электрода, l — толщина образца.

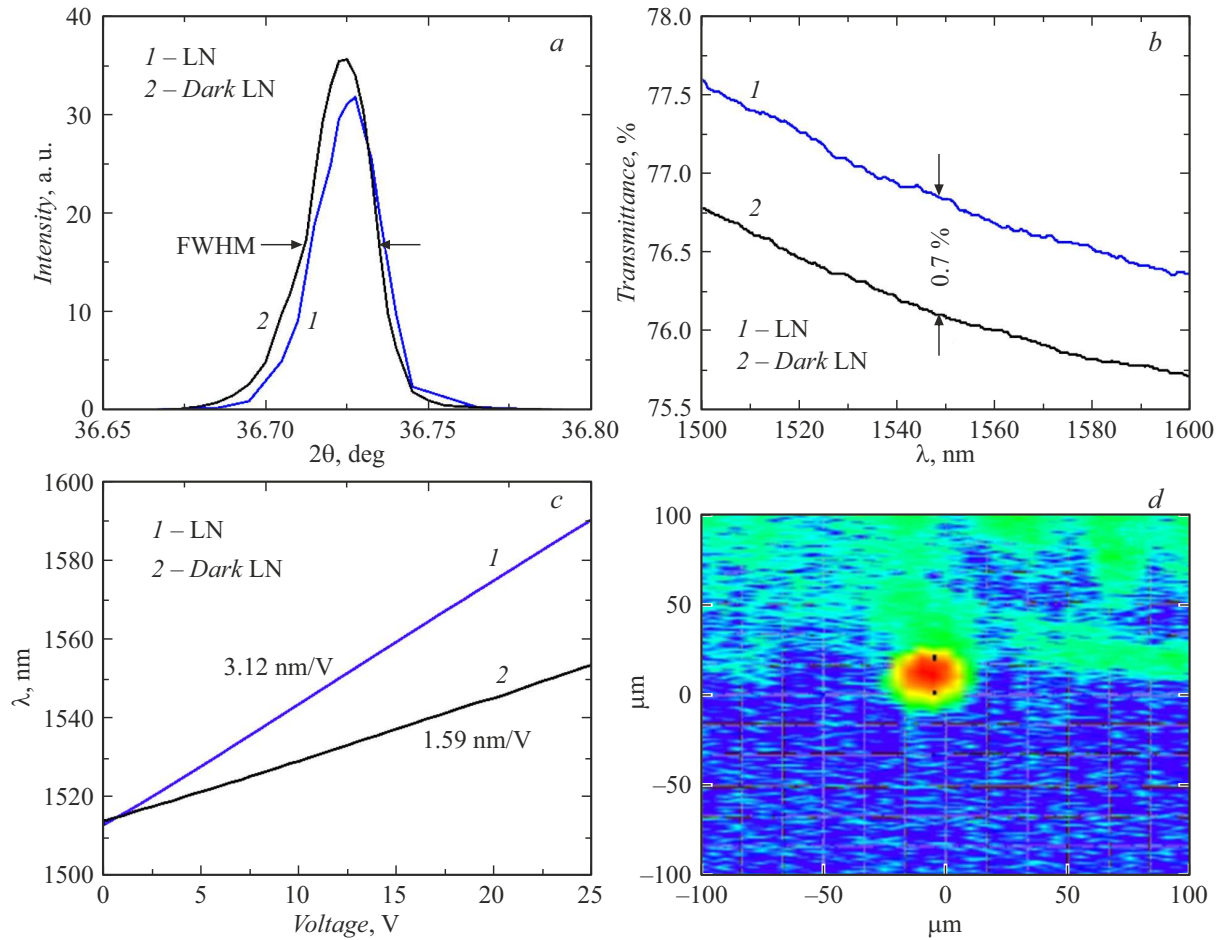
Структуру образцов изучали с помощью дифракционного структурного анализа на длине волны K_β -линии кобальтового излучения $\lambda = 1.62075 \text{ \AA}$. Кристаллографическая плоскость отражения для НЛ X-среза — (110).

Спектр пропускания исследуемых образцов в диапазоне длин волн $1500\text{--}1600 \text{ nm}$ оценивали с помощью ИК-фурье-спектрометра Spectrum Two (PerkinElmer) с разрешением 1.0 cm^{-1} в направлении кристаллофизической оси X.

Одной из важнейших характеристик интегрально-оптических устройств являются вносимые оптические потери α в волноводах, которые определяются экспоненциальным законом затухания мощности излучения

$$P(z) = P_0 e^{-\alpha z}, \quad (2)$$

где $P(z)$ — оптическая мощность на расстоянии z , P_0 — начальная оптическая мощность, α — коэффициент вносимых оптических потерь. В данном случае речь идет о протонообменных волноводах. Вносимые оптические потери зависят от концентрации дефектов в объеме волноводного слоя и коэффициента пропускания.



Сравнительный анализ свойств восстановленного и стандартного НЛ. *a* — уширение дифракционного максимума; *b* — спектр пропускания 1500–1600 нм; *c* — электрооптическая чувствительность; *d* — фундаментальная мода на длине волны 1550 нм для волновода, сформированного в кристалле восстановленного НЛ.

Для оценки структурных изменений в кристалле после технологических воздействий широко применяется дифракционный структурный анализ. Ширина дифракционного максимума на полувысоте (FWHM) позволяет судить о степени дефектности кристаллической решетки материала.

Вносимые оптические потери оценивали в канальных одномодовых волноводах методом волокно–волокно (fiber-to-fiber) на длине волны 1550 нм с использованием многоканального измерителя оптической мощности PM2000 (FiberPro, Inc.). Процесс изготовления канальных волноводов, фотолитография и этап стыковки кристалл–оптическое волокно в представленном кратком сообщении опускаются.

Электрооптический эффект характеризуется линейным изменением показателя преломления Δn_z при приложении внешнего электрического поля E_z вдоль полярной оси кристалла Z (эффект Поккельса):

$$\Delta n_z = -\frac{1}{2}n_e^3 r_{33} E_z, \quad (3)$$

где n_e — необыкновенный показатель преломления, r_{33} — максимальный электрооптический коэффициент.

Таким образом, измеряя электрооптическую чувствительность интерферометра N

$$\Delta \lambda = N \Delta V, \quad (4)$$

где $\Delta \lambda$ — изменение длины волны, ΔV — изменение приложенного напряжения, можно рассчитать электрооптический коэффициент r_{33} восстановленного НЛ.

В настоящей работе электрооптический коэффициент r_{33} восстановленного НЛ рассчитывали с помощью электрооптического интерферометра путем измерения его электрооптической чувствительности при подаче постоянного напряжения в диапазоне от 0 до 25 В с шагом 0.5 В на систему емкостных управляющих электродов, изготовленных из материала титан–золото в диапазоне длин волн от 1500 до 1600 нм. Регистрацию спектра интерферометра проводили с помощью спектроанализатора YOKOGAWA AQ6370D.

Результаты измерений структурных и электрооптических свойств восстановленного НЛ представлены на рисунке.

Восстановительный отжиг НЛ приводит к снижению пирозлектрического эффекта за счет повышения прово-

димости материала [11]. Удельное электросопротивление образцов снижается с 10^{14} до $10^8 \Omega \cdot \text{см}$ в зависимости от времени или температуры отжига. В настоящей работе ρ составило $1.2 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{см}$ для исходной пластины НЛ и $5.7 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{см}$ восстановленного образца НЛ. Процесс восстановления НЛ характеризуется формированием центров окраски (черный НЛ) в связи с удалением молекулярного O_2 и Li_2O с формированием дефектов Nb_{Li} и четырех электронов, образующихся при разрыве ковалентной связи между ионами Nb и O [11]. Образование дефектов Nb_{Li} характеризуется уширением дифракционного максимума (см. рисунок, *a*), что приводит к увеличению оптических потерь с 10 до 20 dB. При этом спектры пропускания в диапазоне 1500–1600 nm практически совпадают, разница менее 1% (см. рисунок, *b*), что полностью согласуется с результатами [14]. Это означает, что основной вклад в оптические потери вносят именно дефекты. Изображение поля фундаментальной моды волновода приведено на рисунке, *d*.

Электрооптические свойства НЛ напрямую зависят от валентного состояния Nb. Максимальный электрооптический отклик НЛ проявляется при преобладании Nb^{5+} и снижается при появлении $\text{Nb}^{4+}/\text{Nb}^{3+}$, что связано с дефектами и неидеальной структурой кристалла [11].

В настоящей работе для оценки этой зависимости был выполнен расчет электрооптического коэффициента r_{33} восстановленного НЛ. В основе расчета лежал метод нахождения полуволнового напряжения V_π электрооптического интерферометра на основе НЛ. Для нахождения r_{33} была использована формула, связывающая электрооптические свойства с геометрическими параметрами устройства [15]:

$$r_{33} = \frac{\lambda d}{2n_e^3 \Gamma L V_\pi}, \quad (5)$$

где λ — рабочая длина волны, d — расстояние между электродами, n_e — показатель преломления НЛ [2], L — длина активной области волноводов, Γ — интеграл перекрытия. Значения интеграла перекрытия специальным образом не рассчитывали, поскольку он обусловлен исключительно геометрией электрооптического интерферометра. В настоящей работе были изготовлены интерферометры с идентичной геометрией (величина интеграла перекрытия одинаковая) как на основе стандартных необработанных пластин НЛ, так и на основе восстановленного НЛ. Основное различие между материалами заключается в электронной структуре, обусловленной частичным изменением валентности Nb, что мало влияет на интеграл перекрытия оптического и электрического полей.

Полученное в результате расчетов значение электрооптического коэффициента r_{33} составило 26.7 pm/V. Данный результат оказался на 13.6% ниже, чем значение $r_{33} = 30.9 \text{ pm/V}$, которое является эталонным для необработанного конгруэнтного НЛ [2], что хорошо видно по уменьшению электрооптической чувствительности интерферометра, изготовленного на основе восстанов-

ленного НЛ (см. рисунок, *c*). Полученные результаты согласуются с данными других авторов. В частности, исследования показывают, что при восстановленном отжиге и уменьшении содержания кислорода в кристалле увеличивается доля Nb^{4+} , что сопровождается снижением электрооптического коэффициента и нелинейно-оптических характеристик НЛ [16,17]. Наблюдаемое снижение электрооптического коэффициента не является критическим, а поиск оптимального решения между оптическими потерями, электрооптическими свойствами и стабильностью работы интегрально-оптических устройств является ключевой задачей для последующих исследований.

Несмотря на ухудшение основных электрооптических свойств восстановленного НЛ, он имеет большой потенциал при изготовлении интегрально-оптических устройств с повышенной стабильностью характеристик. В дальнейшем планируются разработка и тестирование опытных образцов датчика электрического напряжения.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания № FSNF-2024-0001 (основная часть) и госзадания № FSME-2023-0003 (подготовка экспериментальных образцов восстановленного ниобата лития).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Sosunov, R. Ponomarev, A. Zhuravlev, S. Mushinsky, M. Kuneva, *Photonics*, **8**, 571 (2021). DOI: 10.3390/photonics8120571
- [2] В.М. Петров, П.М. Агрозов, В.В. Лебедев, И.В. Ильичев, А.В. Шамрай, *УФН*, **191** (7), 760 (2021). DOI: 10.3367/UFN.2020.11.038871 [V.M. Petrov, P.M. Agruzov, V.V. Lebedev, I.V. Il'ichev, A.V. Shamray, *Phys. Usp.*, **64** (7), 722 (2021). DOI: 10.3367/UFN.2020.11.038871].
- [3] R. Zeng, B. Wang, B. Niu, Z. Yu, *Sensors*, **12**, 11406 (2021). DOI: 10.3390/s120811406
- [4] E. Karagöz, F.Y. Aşık, M. Gökkavas, E.E. Akbaş, A. Yertutanol, E. Özbay, S. Özcan, *Photonics*, **11**, 1057 (2024). DOI: 10.3390/photonics11111057
- [5] A. Boes, L. Chang, C. Langrock, M. Yu, M. Zhang, Q. Lin, M. Loncar, M. Fejer, J. Bowers, A. Mitchel, *Science*, **379**, eabj4396 (2023). DOI: 10.1126/science.abj4396
- [6] J.P. Salvestrini, L. Guilbert, M. Fontana, M. Abarkan, S. Gille, *J. Lightwave Technol.*, **29** (10), 1522 (2011). DOI: 10.1109/JLT.2011.2136322
- [7] J. Shi, Z. Ye, Z. Liu, Z. Yan, K. Jia, L. Zhang, D. Ge, S. Zhuett, *Opt. Lett.*, **50** (5), 1703 (2025). DOI: 10.1364/OL.549975
- [8] S. Wang, H. Wang, C. Li, C. Zhuang, R. Zeng, *High Volt.*, **7** (5), 840 (2022). DOI: 10.1049/hve2.12198
- [9] M. Wang, J. Li, H. Yao, X. Li, J. Wu, K.S. Chiang, K. Chen, *Opt. Express*, **30** (22), 39706 (2022). DOI: 10.1364/OE.474594

- [10] S.M. Kostritskii, Yu.N. Korkishko, V.A. Fedorov, A.V. Yatsenko, *Ferroelectrics*, **574** (1), 170 (2021). DOI: 10.1080/00150193.2021.1888062
- [11] A. Dhar, N. Singh, R.K. Singh, R. Singh, *J. Phys. Chem. Solids*, **74** (1), 146 (2013). DOI: 10.1016/j.jpcs.2012.08.011
- [12] Z. Lin, Y. Gao, L. Zhou, H. Yuan, Y. Zhu, Z. Lin, W. Zhang, Y. Huang, X.-L. Cai, Z. Yuan, *Opt. Quantum*, **3** (2), 195 (2025). DOI: 10.1364/OPTICAQ.551726
- [13] O. Alibart, V. D'Auria, M. De Micheli, F. Doutre, F. Kaiser, L. Labonté, T. Lunghi, E. Picholle, S. Tanzilli, *J. Opt.*, **18** (10), 104001 (2016). <https://arxiv.org/pdf/1608.01100>
- [14] S. Bredikhin, S. Scharner, M. Klingler, V. Kveder, B. Red'kin, W. Weppner, *J. Appl. Phys.*, **88** (10), 5687 (2000). DOI: 10.1063/1.1318367
- [15] E. Udd, *Fiber optic sensors*, 2nd ed. (Wiley, 2011).
- [16] I.V. Kityk, M. Makowska-Janusik, M.D. Fontana, M. Aillerie, F. Abdi, *J. Phys. Chem. B*, **105** (49), 12242 (2001). DOI: 10.1021/jp004384r
- [17] M. Yeh, D.R. Barton, G. Smith, A.M. Day, A. Raun, D. Renaud, D.R. Assumpcao, E.L. Hu, M. Lončar, *Interface-mediated dc electro-optic instability in lithium niobate nanophotonics*, preprint (2025). DOI: 10.21203/rs.3.rs-5775859/v1