

09

Генерация второй гармоники в отоженных протонообменных периодически поляризованных волноводах в ниобате лития

© А.В. Сосунов¹, Р.С. Пономарев¹, А.Р. Ахматханов², М.А. Чувакова², В.Я. Шур²¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия² Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета, Екатеринбург, Россия

E-mail: avsosunov@psu.ru

Поступило в Редакцию 14 июля 2026 г.

В окончательной редакции 16 августа 2026 г.

Принято к публикации 22 августа 2026 г.

Изготовлены одномодовые отоженные протонообменные волноводы в ниобате лития с периодом регулярной доменной структуры 17.7–18.3 μm . Исследована эффективность генерации второй гармоники в полученных устройствах в диапазоне длин волн накачки 1525–1540 nm. Максимальная нормированная эффективность генерации второй гармоники составила 9.1 %/(W · cm²) на длине волны 767.4 nm. Полученные устройства продемонстрировали стабильность характеристик в течение календарного года, что свидетельствует об их надежности и применимости в современных приложениях.

Ключевые слова: ниобат лития, волновод, регулярная доменная структура, генерация второй гармоники.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.22.63886.20846

Ниобат лития (НЛ) (LiNbO₃) является нелинейно-оптическим сегнетоэлектриком, который широко используется в качестве основного материала в интегральной и нелинейной фотонике. Существование высокой нелинейности второго порядка $\chi^{(2)}$ ($d_{33} = 19.5 \text{ pm/V}$, $\lambda = 1313 \text{ nm}$ [1]) из-за нецентросимметричности кристаллической решетки делает НЛ перспективным материалом для преобразования излучения в телекоммуникационном диапазоне длин волн (1550 nm) наряду с такими популярными оптическими материалами, как Si/SOI или Si₃N₄. Эффективное нелинейно-оптическое преобразование длины волны когерентного излучения активно применяется в квантовой сенсорике для генерации спутанных пар фотонов [2], генерации суперконтинуума [3], генерации частотных гребенок [4], в качестве источника оптической накачки в стандарте частоты [5]. Эти устройства изготавливаются на основе периодически поляризованных волноводов в кристаллах НЛ (рис. 1), в которых период регулярной доменной структуры Λ подбирается таким образом, чтобы выполнялось условие фазового квазисинхронизма [6]:

$$\Lambda = \frac{\lambda_\omega}{2(n_{2\omega} - n_\omega)}, \quad (1)$$

где λ_ω — длина волны накачки, $n_{2\omega}$ — эффективный показатель преломления волноводной моды с удвоенной частотой (второй гармоники), n_ω — эффективный показатель преломления волноводной моды на длине волны накачки.

Так как эффективность нелинейно-оптического преобразования длины волны зависит от интенсивности излучения в кристалле, применение канальных волноводов позволяет существенно повысить эту эффективность за счет лучшей локализации световой волны и увеличения

длины взаимодействия. Периодически поляризованные волноводы в интегральном исполнении позволяют не только повысить эффективность нелинейного преобразования на малых оптических мощностях накачки, но и сделать устройства более компактными, что актуально в практических приложениях [7].

Классическими способами формирования оптических волноводов являются протонный обмен (низкотемпературный процесс при 400 °C) и диффузия Ti (высокотемпературный процесс при 1000 °C) [8]. Типичный контраст показателя преломления этих волноводов составляет $\Delta n \approx 0.02$, что позволяет создавать устройства длиной примерно 0.5–5 см. В настоящей работе мы фокусируемся на изготовлении волноводов методом протонного обмена [9], который позволяет сохранить регулярную доменную структуру в ходе процесса протонного обмена и отжига. Для эффективного преобразования излучения (генерация второй гармоники (ГВГ) или параметрическая генерация света) на прак-

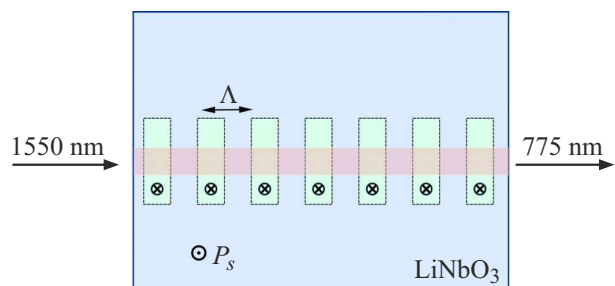


Рис. 1. Схематическое представление периодически поляризованного канального волновода в НЛ для генерации второй гармоники излучения телекоммуникационного диапазона. P_s — вектор спонтанной поляризации. Горизонтальная цветная полоса — оптический волновод.

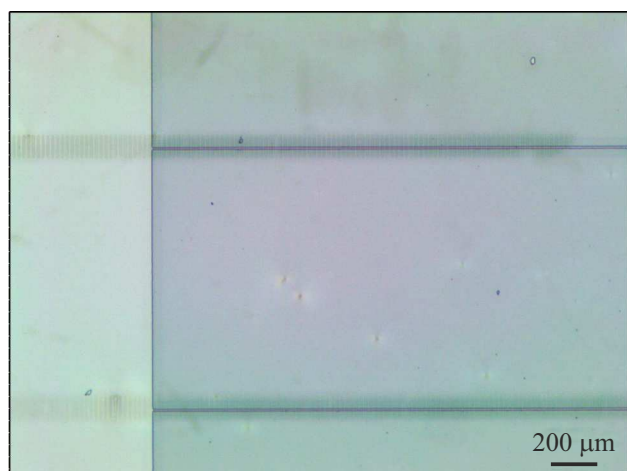


Рис. 2. Оптическое изображение пластины НЛ, покрытого защитной маской оксида кремния с горизонтальными прямоугольными окнами (каналами) над дорожками с регулярной доменной структурой.

тике чаще всего применяются два подхода: протонный обмен с отжигом и обратный протонный обмен [10], при этом нормированная эффективность ГВГ для них составляет до $100\text{--}150\%/(W \cdot \text{cm}^2)$ [10–12]. Разработка и тестирование таких устройств являются критически важной задачей для современной микроэлектроники и фотоники. Поэтому целью настоящей работы является изготовление периодически поляризованных одномодовых протонообменных волноводов в НЛ с периодом регулярной доменной структуры $17.7\text{--}18.3\text{ }\mu\text{m}$, а также исследование эффективности ГВГ в полученных устройствах в диапазоне длин волн накачки $1525\text{--}1540\text{ nm}$.

В качестве исследуемых материалов использовали отполированные с двух сторон до оптического качества пластины НЛ Z-среза производства Jinan Jingzheng Electronics (Китай) размером $10 \times 15 \times 0.5\text{ mm}$.

Методами фотолитографии на поверхности Z+ образца НЛ была сформирована система из семи дорожек с периодическими полосовыми окнами в слое фоторезиста с периодом от 17.7 до $18.3\text{ }\mu\text{m}$. Ширина каждой из дорожек составляла $80\text{ }\mu\text{m}$. Использовался позитивный фоторезист AZ 1518 (Microchemicals, Германия) толщиной $2.2\text{ }\mu\text{m}$, который наносился методом центрифугирования с последующей предварительной термической обработкой (сушкой). После экспонирования и проявки проводилась дополнительная термическая обработка фоторезиста при температуре 110°C с медленным нагревом и охлаждением для улучшения его диэлектрических свойств и адгезии.

Для переключения поляризации окна в слое фоторезиста заполнялись насыщенным водным раствором LiCl, который использовался в качестве жидкого электрода для приложения внешнего электрического поля. Переключение поляризации проводилось импульсами поля от 21 до 22 kV/mm длительностью 50 ms с кон-

тролем процесса переключения методами оптической микроскопии. Поле прикладывалось ко всем дорожкам с периодическими полосовыми окнами в слое фоторезиста одновременно. Контроль качества полученной доменной структуры после переключения поляризации и снятия фоторезиста осуществлялся методом селективного химического травления (плавиковая кислота, 2 min) исходной поверхности Z– пластины с последующей визуализацией рельефа травления с помощью оптического микроскопа.

Для проведения операции протонного обмена на исходной поверхности Z+ пластины методами взрывной (lift-off) фотолитографии создавалась защитная маска из оксида кремния, которая представляла собой прямоугольные окна (каналы) в слое оксида кремния шириной $5\text{ }\mu\text{m}$ и длиной 10 mm . Совмещение фотошаблона и пластины осуществлялось таким образом, чтобы окно в слое оксида кремния располагалось над серединой дорожки с регулярной доменной структурой. Пленка оксида кремния толщиной 660 nm наносилась методом электронно-лучевого распыления на установке вакуумного напыления Auto 500 Edwards (BOC Edwards, Великобритания). Изображение пластины НЛ с маской оксида кремния над регулярной доменной структурой приведено на рис. 2.

Формирование одномодовых протонообменных волноводов проводили в закрытом циркониевом реакторе в расплаве чистой бензойной кислоты при температуре 190°C в течение 2 h с последующим отжигом на воздухе при температуре 350°C в течение 6 h . После завершения операции протонного обмена осуществлялось формирование входной и выходной граней элемента, перпендикулярных направлению оптического волновода, за счет прецизионной резки пластины с помощью дисковой пилы DAD3220 (Disco, Япония) по краю маски оксида кремния с последующей полировкой торцов. В результате был изготовлен образец с семью канальными периодически поляризованными протонообменными одномодовыми волноводами.

Исследование эффективности ГВГ проводили на измерительном стенде (рис. 3) с ручной системой выравнивания волокна относительно торца чипа. Разрешение использованных линейных микропозиционеров составляло 500 nm . Для ввода излучения использовали стандартные оптические волокна SMF-28, для вывода излучения — многомодовые оптические волокна MMF-50. В качестве источника излучения (1) применялся перестраиваемый лазер Golight OS-TL в диапазоне длин волн $1525\text{--}1575\text{ nm}$ с выходной оптической мощностью 10 mW , также использовались эрбиевый оптический усилитель Connet Laser с шестикратным усилением сигнала (2) и блоком питания (3), механический контроллер поляризации излучения FiberPRO для формирования ТМ-моды излучения и минимизации оптических потерь (4), микропозиционеры Suruga Seiki для подвода оптических волокон (5) к торцу исследуемого образца (8), боковая и вертикальная камеры технического

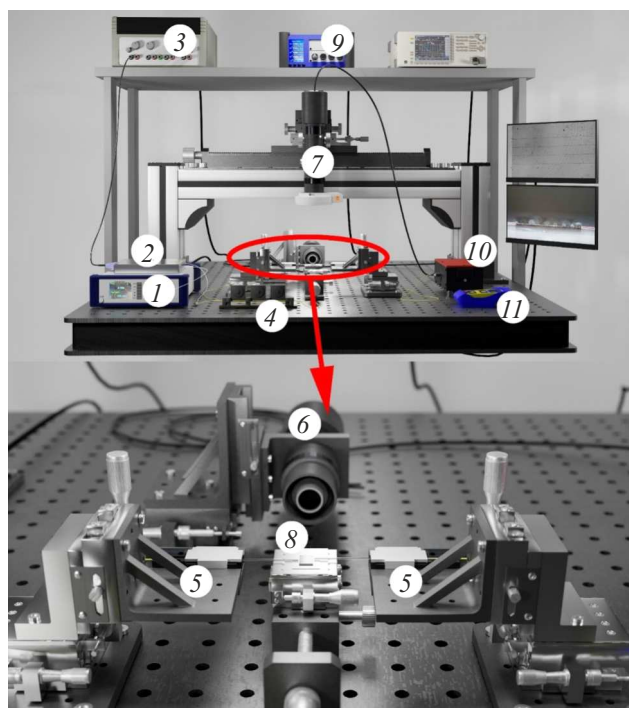


Рис. 3. Стенд для измерения эффективности ГВГ.

зрения (6, 7) применялись для визуального контроля перемещения оптических волокон, в качестве детектора сигнала использовался измеритель оптической мощности Dimension Alpha (9), детектирование спектральной линии ГВГ проводилось с помощью спектрометра Авеста ASP-150T в диапазоне длин волн 190–1100 nm (10), оптическая мощность ГВГ в видимом спектре измерялась с помощью измерителя OzOptics POM-300 (11).

Нормированную эффективность ГВГ η_{norm} рассчитывали согласно уравнению

$$\eta_{norm} = \frac{P_{2\omega}}{(P_{\omega} - P_{loss})^2 L^2} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $P_{2\omega}$ — оптическая мощность ГВГ, P_{ω} — оптическая мощность накачки, P_{loss} — общие интегральные оптические потери, включающие потери в волноводе и потери на ввод-вывод излучения на длине волны накачки, L — длина периодически поляризованного волновода.

Результаты измерений параметров ГВГ в периодически поляризованных протонообменных волноводах представлены в таблице. Показано, что изменение периода регулярной доменной структуры на $1\mu\text{m}$ приводит к сдвигу длины волны ГВГ на $1\text{--}2\text{nm}$. На рис. 4 представлена спектральная характеристика ГВГ канального волновода с максимальной нормированной эффективностью $9.1\%/(W \cdot \text{cm}^2)$. В спектре ГВГ наблюдается узкая полоса с длиной волны 767.4nm и полушириной 0.22nm (рис. 4, а).

Получение такой узкой линии открывает возможности для применения периодически поляризованных волноводов в НЛ для квантовой сенсорики и метрологии. Применение спектрометра позволяло быстро определить работоспособность сформированных периодически поляризованных волноводов. Затем с помощью измерителя оптической мощности в видимом диапазоне длин волн измеряли интенсивность линии путем сканирования длины волны накачки. Зависимость эффективности ГВГ от длины волны второй гармоники для канального волновода (с максимальной эффективностью) представлена на рис. 4, б. Многопиковая спектральная зависимость обусловлена функционированием волновода в многомодовом (три волноводные моды) режиме на длине волны ГВГ. На рис. 4, с показана квадратичная зависимость ГВГ от мощности накачки. Таким образом, эффективность ГВГ определялась как с помощью спектрометра, так и с помощью измерителя оптической мощности при изменении длины волны. Такой подход обеспечил надежный и быстрый анализ характеристик изготовленных устройств. Полученная нормированная эффективность ГВГ по порядку величин сопоставима с мировыми аналогами [10]. Однако, очевидно, что высокие оптические потери в системе и параметры используемого оборудования требуют дальнейшего совершенствования для достижения η_{norm} до $90\text{--}100\%/(W \cdot \text{cm}^2)$. Следует отметить, что изготовленные устройства демонстрировали стабильность и функциональность в течение календарного года, что подтверждает возможность их применения в реальных практических приложениях.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края

Параметры ГВГ в протонообменных волноводах в НЛ

Номер волновода	P_{ω} , mW	L , cm	P_{loss} , mW	P_{loss} , %	$P_{2\omega}$, nW	Λ , μm	λ , nm	η_{norm} , $\%/(W \cdot \text{cm}^2)$
1	65	0.5	50.0	83	36 ± 2	17.7	762.5	0.10 ± 0.01
2				Поврежден				
3	65	0.5	52.1	87	320 ± 16	17.9	762.5	2.1 ± 0.1
4	65	0.5	56.0	93	70 ± 4	18.0	764.0	1.8 ± 0.1
5	66	0.5	50.0	83	400 ± 20	18.1	766.0	1.6 ± 0.1
6	65	0.5	53.7	90	900 ± 45	18.2	767.4	9.1 ± 0.5
7	65	0.5	53.7	90	530 ± 27	18.3	768.5	5.3 ± 0.3

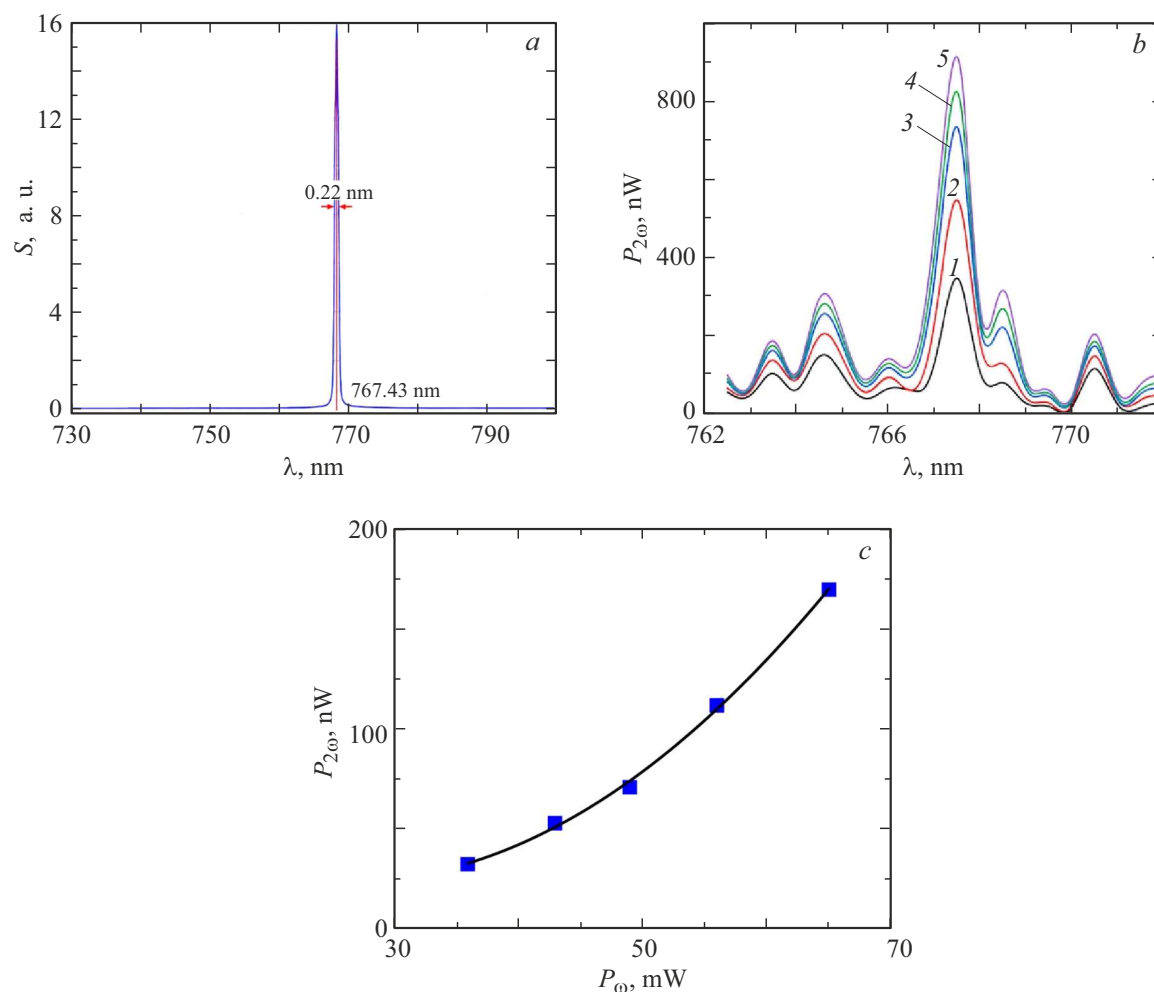


Рис. 4. Спектральные характеристики ГВГ на длине волны накачки 1535 nm. *a* — результаты измерения с помощью спектрометра. *b* — эффективность ГВГ при различной мощности накачки перестраиваемого лазера в диапазоне 1525–1540 nm. Мощность накачки, mW: 1 — 36, 2 — 43, 3 — 49, 4 — 56, 5 — 65. *c* — квадратичная зависимость ГВГ от мощности накачки.

(грант № С26-37) (формирование волноводов и тестирование устройств) и Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание FEUZ-2023-0017) (фотолитография и создание регулярной доменной структуры) с использованием оборудования УЦКП „Современные нанотехнологии“ УрФУ (рег. № 2968).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] I. Shoji, T. Kondo, A. Kitamoto, M. Shirane, R. Ito, J. Opt. Soc. Am. B, **14**, 2268 (1997). DOI: 10.1364/JOSAB.14.002268
- [2] V. Esfandyarpour, C. Langrock, M. Fejer, Opt. Lett., **43**, 5655 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.005655
- [3] C.R. Phillips, C. Langrock, J.S. Pelc, M.M. Fejer, I. Hartl, M.E. Fermann, Opt. Express, **19**, 18754 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.018754
- [4] R. Ikuta, M. Asano, R. Tani, T. Yamamoto, N. Imoto, Opt. Express, **26**, 15551 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.015551
- [5] Q. Hao, S. Yang, H. Zhang, S. Fan, S. Nie, Y. Bai, X. Wang, J. Ruan, S. Zhang, Opt. Contin., **4**, 466 (2025). DOI: 10.1364/OPTCON.543623
- [6] D.S. Hum, M.M. Fejer, C.R. Phys., **8**, 180 (2007). DOI: 10.1016/j.crhy.2006.10.022
- [7] C. Wang, C. Langrock, A. Marandi, M. Jankowski, M. Zhang, B. Desiatov, M.M. Fejer, M. Lončar, Optica, **5**, 1438 (2018). DOI: 10.1364/OPTICA.5.001438
- [8] M. Bazzan, C. Sada, Appl. Phys. Rev., **2** (4), 040603 (2015). DOI: 10.1063/1.4931601
- [9] A.V. Sosunov, V.A. Demin, E.V. Miasnikova, D.N. Masalkin, A.R. Kornilicyn, M. Kuneva, A.R. Akhmatkhanov, V. Ya. Shur, Phys. Status Solidi A, **223**, e202500535 (2026). DOI: 10.1002/pssa.202500535
- [10] K.R. Parameswaran, R.K. Route, J.R. Kurz, R.V. Roussev, M.M. Fejer, M. Fujimura, Opt. Lett., **27**, 179 (2002). DOI: 10.1364/OL.27.000179
- [11] E.J. Lim, M.M. Fejer, R.L. Byer, Electron. Lett., **25**, 174 (1989). DOI: 10.1049/el:19890127
- [12] S. Suntsov, C.E. Rüter, D. Brüske, D. Kip, Opt. Express, **29**, 11386 (2021). DOI: 10.1364/OE.416723