

# Генерация второй гармоники в гребенчатых волноводах в периодически поляризованном ниобате лития

В.В.Дюделев, А.Р.Ахматханов, Е.Д.Грешняков, С.Х.Абдулразак, В.Е.Бугров, Е.А.Когновицкая, В.И.Кучинский, В.Я.Шур, Г.С.Соколовский

*Продемонстрирована генерация второй гармоники излучения инфракрасного (980–1140 нм) полупроводникового лазера в гребенчатых волноводах с большим скачком показателя преломления в периодически поляризованных нелинейных кристаллах  $\text{LiNbO}_3$ . Гребенчатые волноводы были изготовлены методом прецизионного выпиливания алмазной микропилы. Измерены спектральные зависимости мощности ГВГ и распределения интенсивностей в ближнем поле излучений второй гармоники и накачки. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности создания перестраиваемых источников лазерного излучения видимого диапазона за счет ГВГ в гребенчатых волноводах в периодически поляризованных нелинейных кристаллах с полупроводниковой накачкой.*

**Ключевые слова:** ГВГ, периодически поляризованный кристалл, гребенчатый волновод, полупроводниковый лазер.

## 1. Введение

Перестраиваемые источники видимого излучения находят применение во многих перспективных областях науки и техники, среди которых можно выделить биомедицину [1], флуоресцентную микроскопию [2], спектроскопию [3]. Эффективность и компактность полупроводниковых лазеров делает их использование для этих целей наиболее предпочтительным. К сожалению, значительная часть видимого диапазона остаётся недоступной для прямой генерации излучения полупроводниковыми лазерами. Альтернативным подходом является удвоение частоты излучения с помощью волноводных нелинейных периодически поляризованных кристаллов. Как показано в недавних работах [4, 5], реализация перестройки частоты второй гармоники в многомодовых волноводах, наведённых в нелинейных периодически поляризованных кристаллах, связано с выполнением условий фазового квазисинхронизма для различных волноводных мод фундаментальной волны и волны второй гармоники. При этом спектральный диапазон перестройки находится в прямой зависимости от величины скачка показателя преломления между сердцевинной и обкладками волновода, увеличение которого позволяет расширить диапазон пе-

рестройки. Опубликован ряд работ по созданию гребенчатых волноводов на основе периодически поляризованного ниобата лития (PPLN) для эффективной ГВГ [6–10]. В этих работах сначала создавался тонкий слой PPLN с помощью ионной имплантации [6] или соединения пластины PPLN с пластиной ниобата лития другой ориентации или с пластиной танталата лития с последующим утоньшением PPLN-пластины шлифовкой и полировкой [7–10]. Гребенчатые волноводы выпиливались дисковой микропилы из планарного волновода. Рассмотренные подходы позволяли получать большой скачок показателя преломления между гребенчатым волноводом и окружающей средой (воздухом), однако скачок показателя преломления между волноводом и подложкой оставался сравнительно малым и не превышал нескольких сотых. Эта проблема решалась путём формирования гребенчатых волноводов методом реактивного ионного травления [11] и вырезания PPLN-волноводов дисковой микропилы [12].

Целью настоящей работы является разработка технологии создания волноводов с большим скачком показателя преломления между сердцевинной и оболочкой в периодически поляризованных кристаллах для нелинейного преобразования частоты излучения полупроводниковых лазеров и исследование ГВГ в гребенчатых PPLN-волноводах, изготовленных с помощью дисковой микропилы.

## 2. Экспериментальные образцы

Пластины PPLN изготавливались приложением электрического поля к системе полосовых электродов с периодом 10 мкм, нанесенных на одну из поверхностей пластины ниобата лития диаметром 76 мм и толщиной 0.5 мм. После создания регулярной доменной структуры пластина разрезалась на пластинки с размерами  $5 \times 5$  мм. Для склеивания PPLN-пластины и подложки (монокристаллическая пластина ниобата лития) использовался клей ультрафиолетового отверждения (УФ клей), служивший нижней границей волновода с показателем преломления  $n \approx 1.46$ . Таким образом, скачок показателя преломления в на-

**В.В.Дюделев, В.И.Кучинский, Г.С.Соколовский.** Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: v.dudelev@mail.ru

**А.Р.Ахматханов, Е.Д.Грешняков, В.Я.Шур.** Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

**С.Х.Абдулразак, В.Е.Бугров.** Санкт-Петербургский национальный университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49

**Е.А.Когновицкая.** Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Россия, 197022 С.-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Поступила в редакцию 11 апреля 2018 г., после доработки – 15 июня 2018 г.

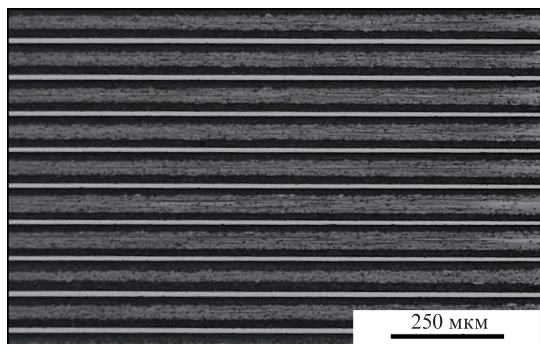


Рис.1. Изображение гребенчатых волноводов (вид сверху), полученное при помощи оптической микроскопии в отражённом свете.

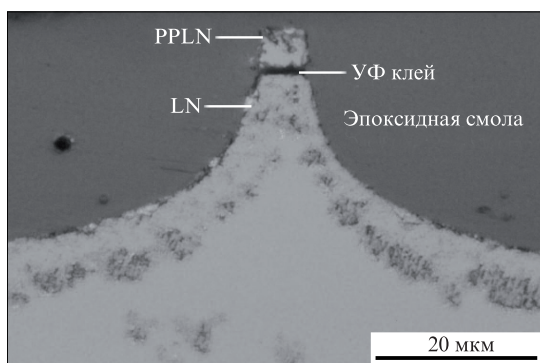


Рис.2. Волновод в эпоксидной смоле (вид с торца). Оптическая микроскопия в отражённом свете; LN – ниобат лития.

правлении, перпендикулярном плоскости пластины PPLN, составлял  $\sim 0.77$  для излучения второй гармоники ( $n = 2.23$  – показатель преломления ниобата лития на  $\lambda = 530$  нм) и  $\sim 0.69$  для излучения накачки ( $n = 2.15$  – показатель преломления ниобата лития на  $\lambda = 1060$  нм).

Толщина слоя клея составляла  $\sim 2$  мкм. Для полимеризации клея проводилась его засветка УФ излучением ( $\lambda = 365$  нм) при внешнем давлении. Затем осуществлялась односторонняя шлифовка алмазными порошками и полировка слоя PPLN до толщины 5 мкм. При выпиливании гребенчатых волноводов с помощью дисковой микропилы для предотвращения сколов на пластину PPLN наносился слой эпоксидной смолы с показателем преломления  $n \approx 1.57$ . На рис.1 представлен вид сверху образца PPLN с гребенчатыми волноводами с большим скачком показателя преломления. Изображения получены при помощи оптической микроскопии в отраженном свете.

Входные и выходные торцы волноводов формировались за счёт поперечных резов глубиной 500–600 мкм (рис.2). Были изготовлены волноводы со следующими параметрами слоя PPLN: толщина до 5 мкм, ширина до 8 мкм, длина 5 мм, период доменной структуры 10 мкм.

### 3. Эксперимент

Нами были проведены исследования ГВГ излучения полупроводникового лазера в изготовленных гребенчатых волноводах в PPLN. Использовался полупроводниковый лазер во внешнем резонаторе, построенном по схеме Литтрова [13]. Длина волны излучения перестраивалась в широком спектральном диапазоне (980–1140 нм). Лазер был снабжен волоконным выводом, что значительно упрощало ввод излучения в гребенчатый волновод в

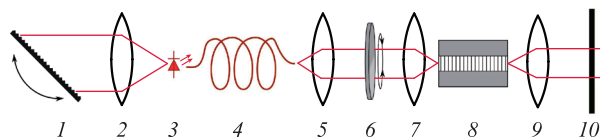


Рис.3. Оптическая схема экспериментальной установки: 1 – дифракционная решетка 1200 штр./мм; 2,5,7 – асферические линзы ( $30^\circ$ ), Newfocus; 3 – лазерный диод; 4 – оптическое волокно Panda 980; 6 – ахроматическая полуволновая пластина, Thorlabs; 8 – PPLN с гребенчатым волноводом; 9 – микроскопический объектив ( $8^\times$ ), ЛОМО; 10 – цветной фильтр СЗС 22.

PPLN. Эффективность ввода излучения составляла  $\sim 50\%$ . Поляризация подстраивалась при помощи ахроматической полуволновой пластинки. Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис.3.

Была измерена спектральная зависимость мощности ГВГ  $P_{SH}$  в гребенчатых волноводах в PPLN. Мощность накачки  $P_p$  во всем исследованном спектральном диапазоне составляла 50–60 мВт. Зависимость мощности ГВГ от длины волны представлена на рис.4. Ширина спектра перестройки составила  $\sim 10$  нм с максимумом мощности на длине волны 537.45 нм

Измерение зависимости мощности излучения второй гармоники от мощности излучения накачки осуществлялось с помощью измерителя мощности Newport 841-PE с измерительной головкой 818-UV. При измерении мощности излучения второй гармоники использовался цветной фильтр СЗС 22, который полностью отсекал излучение накачки. Зависимость мощности излучения второй гармоники на  $\lambda = 537.95$  нм от мощности излучения накачки в двойном логарифмическом масштабе представлена на рис.5. Линейная аппроксимация показывает, что мощность второй гармоники пропорциональна мощности накачки в степени  $1.88 \pm 0.03$ .

Как было показано в [4, 5], перестройка длины волны генерации в волноводных периодически поляризованных нелинейных кристаллах возможна при выполнении условий фазового квазисинхронизма между различными волноводными модами второй гармоники и накачки. Из-за дисперсии показателя преломления нелинейного кристалла, в общем случае препятствующей синхронизации фаз, в многомодовом периодически поляризованном вол-

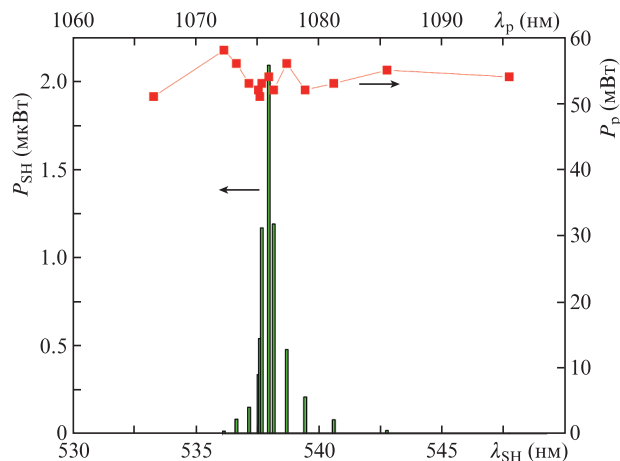


Рис.4. Спектральные зависимости мощности излучения второй гармоники в гребенчатых волноводах в PPLN (вытянутые прямоугольники) и мощности накачки (квадраты, верхняя шкала длин волн).

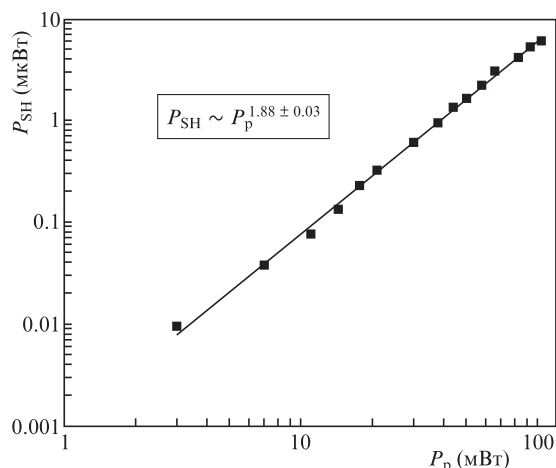


Рис.5. Зависимость мощности излучения второй гармоники на  $\lambda = 537.95$  нм от мощности излучения накачки и её аппроксимация степенной зависимостью с показателем степени  $1.88 \pm 0.03$ .

новоде синхронизация низшей ИК моды с высшей модой видимого излучения обеспечивает уменьшение различий между эффективными показателями преломления и «синий» сдвиг генерируемого излучения относительно периода поляризации. Аналогично, большое различие эффективных показателей преломления для высших ИК мод и низшей видимой моды приводит к «красному» сдвигу генерируемого излучения.

Нами были измерены распределения интенсивностей в ближнем поле на выходной грани волновода излучений второй гармоники и накачки для различных длин волн (рис.6). Хорошо видно, что перестройка длины волны ГВГ обеспечивается за счёт существенного изменения распределения интенсивности волноводных мод. Проведенные исследования также выявили существенную «утечку» излучения через нижнюю границу волновода, что указывает на недостаточную толщину слоя УФ клея. При этом, как видно из рис.6, во всём диапазоне перестройки поддерживается малое число волноводных мод фундаментального излучения (излучение накачки), что, по-видимому, существенно сужает диапазон перестройки длины волны ГВГ в исследованных образцах.

#### 4. Выводы

Нами были изготовлены экспериментальные образцы гребенчатых волноводов в PPLN с большим скачком показателя преломления между сердцевинной и обкладками (около 0.77 для излучения второй гармоники и около 0.69 для излучения накачки) и проведены эксперименты по ГВГ в этих волноводах. Показано, что в многомодовом периодически поляризованном волноводе с большим

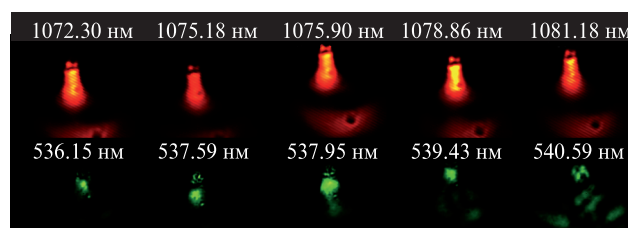


Рис.6. Распределения интенсивности в ближнем поле излучений второй гармоники и накачки для различных длин волн.

скачком показателя преломления между сердцевинной и обкладками синхронизация низшей моды накачки с высшей модой второй гармоники обеспечивает уменьшение различия между эффективными показателями преломления и «синий» сдвиг генерируемого излучения относительно периода поляризации. Аналогично, большое различие между эффективными показателями преломления высших ИК мод и низшей видимой моды приводит к «красному» сдвигу генерируемого излучения. Разработанная технология изготовления гребенчатых волноводов может найти широкое применение для создания на их основе лазерных источников видимого света, перестраиваемых в широком спектральном диапазоне.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» Уральского федерального университета при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-02-00865).

1. Telford W.G. *Methods Cell. Biol.*, **102**, 375 (2011).
2. Claxton N.S., Fellers T.J., Davidson M.W. <http://olympusfluoview.com/theory/LSCMIntro.pdf>.
3. Sumpf B., Maiwald M., Sowoidnich K., Kronfeldt H.-D. *Proc. SPIE*, **8718**, 87180D (2013).
4. Fedorova K.A., Sokolovskii G.S., Battle P.R., Livshits D.A., Rafailov E.U. *Opt. Lett.*, **40**, 835 (2015).
5. Fedorova K.A., Sokolovskii G.S., Battle P.R., Livshits D.A., Rafailov E.U. *Laser Phys. Lett.*, **9**, 790 (2012).
6. Ai L., Wang L., Tan Y., Akhmedaliev S., Zhou S., Chen F. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **35**, 2476 (2017).
7. Nishida Y., Miyazawa H., Asobe M., Tadanaga O., Suzuki H. *Electron. Lett.*, **39**, 609 (2003).
8. Nishikawa T., Ozawa A., Nishida Y., Asobe M., Hong F.-L., Hänsch T.W. *Opt. Express*, **17**, 17793 (2009).
9. Kretzschmar N., Eismann U., Sievers F., Chevy F., Salomon C. *Opt. Express*, **25**, 14843 (2017).
10. Fedorova K.A., Sokolovskii G.S., Khomylev M., Livshits D.A., Rafailov E.U. *Opt. Lett.*, **39**, 6672 (2014).
11. Courjal N., Devaux F., Gerthoffer A., Guyot C., Henrot F., Ndao A., Bernal M.-P. *Opt. Express*, **23**, 13983 (2015).
12. Chauvet M., Henrot F., Bassignon F., Devaux F., Gauthier-Manuel L., Pêcheur V., Maillotte H., Dahmani B. *J. Opt.*, **18**, 085503 (2016).
13. Vinokurov D.A., Deryagin A.G., Dyudelev V.V., Kuchinskii V.I., Lyutetskii A.V., Pikhtin N.A., Sokolovskii G.S., Stankevich A.L., Tarasov I.S. *Techn. Phys. Lett.*, **34**, 187 (2008).