

УДК 535.44

Д.О. Анисимов, М.В. Бородин, А.Ю. Печенкин,  
С.А. Смычков, С.Ф. Халикулова, В.В. Щербина

## Планарные оптические волноводы Zn:LiNbO<sub>3</sub> для интегральной и нелинейной оптики

Представлены результаты исследований планарных оптических волноводов, созданных высокотемпературной диффузией в подложки Y- и X-срезов ниобата лития из пленок оксида цинка. Сформированные волноводные структуры Zn:LiNbO<sub>3</sub> использовались для синтеза в них планарных доменных решеток прямым электронно-лучевым облучением подложки. Методом генерации второй оптической гармоники на этих решетках оценены их характеристики.

**Ключевые слова:** ниобат лития, планарный оптический волновод, доменные структуры, генерация второй гармоники.

### Введение

Кристалл ниобата лития является одним из наиболее широко применяемых в настоящее время сегнетоэлектрических материалов, универсальным для оптических применений благодаря возможности управления его свойствами в широких пределах путем варьирования состава [1]. Это особенно привлекательно для реализации устройств интегральной оптики [2]. К числу свойств ниобата лития, сильно зависящих от состава, относится фоторефрактивная чувствительность. Важной задачей для реализации большинства приложений, таких как нелинейная оптика и модуляция оптического излучения, является поиск путей его подавления, т.е. «нефоторефрактивных составов» [1]. К «нефоторефрактивным» примесям, создающим необходимое для обеспечения волноводного эффекта увеличение показателя преломления ниобата лития, относится Zn [3]. При создании оптических волноводов Zn:LiNbO<sub>3</sub> используются методы диффузии из паров Zn [4], металлических пленок Zn [5] и оксидных пленок ZnO [6].

Периодические доменные структуры (ПДС) в нелинейных сегнетоэлектрических кристаллах позволяют существенно расширить диапазон трансформации ими спектра лазерного излучения и используются в режиме квазисинхронизма как для эффективной генерации второй оптической гармоники (ГВГ) [7], так и для параметрического преобразования частоты в различные спектральные диапазоны, в том числе в терагерцевую область [8]. Электрически индуцируемая дифракция Брэгга на ПДС находит применение в широкополосных устройствах управления параметрами лазерного излучения [9]. Высококачественные ПДС для реализации нелинейно-оптических и модулирующих устройств могут быть сформированы в кристаллах ниобата лития и оптических волноводах на их основе электронным облучением подложки в растровом электронном микроскопе [10].

В настоящем статье представлены результаты исследований по формированию планарных оптических волноводов высокотемпературной диффузией Zn в подложки Y- и X-срезов ниобата лития из пленок оксида цинка. Полученные волноводные структуры Zn:LiNbO<sub>3</sub> использовались далее для создания в них планарных ПДС прямым электронно-лучевым облучением подложки. Оптические исследования ПДС проведены методом микроскопического наблюдения ГВГ как при их облучении объемным пучком накачки, так и при его волноводном распространении.

### Формирование планарных волноводов Zn:LiNbO<sub>3</sub>

Для формирования планарных волноводов использовались подложки конгруэнтного ниобата лития X- и Y-срезов, которые имели толщину от 1 до 2 мм и поперечные размеры по полярной оси Z – от 5 до 10 мм, а вдоль направления распространения света (оси Y или X, соответственно) – от 10 до 20 мм. Пленки ZnO на LiNbO<sub>3</sub> получали из пленкообразующих растворов методом вытягивания. В качестве исходных веществ были выбраны соль нитрата цинка и салициловая кислота (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)COOH), растворитель – 96%-й (мас.) этанол. Установлено, что необходимое значение вязкости раствора (1,96 мм<sup>2</sup>/с) для получения качественных пленок достигается при соотношении Zn<sup>2+</sup>: C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)COO<sup>-</sup> = 1:2; вязкость растворов измеряли на вискозиметре типа ВПЖ-2 при комнатной температуре. Полученные оксидные пленки были однородными, размер зерна по поверхности изме-

нялся в пределах 10–17 нм, высота кристаллитов не превышала 20 нм. Толщина пленок составляла ~86 нм.

Пластины ниобата лития с нанесенными на них пленками ZnO помещались в трубчатую печь СУОЛ-25 для проведения диффузии. Нагрев образцов осуществлялся со средней скоростью 35 °С/мин, температуры отжига составляли от 870 до 1050 °С, начальная скорость снижения температуры не превышала 15 °С/мин. Используемые при создании волноводов Zn:LiNbO<sub>3</sub> типичные параметры диффузационного процесса, для некоторых образцов с условной нумерацией 1–5 приведены в таблице, наряду с данными по количеству волноводных ТЕ-мод, экспериментально наблюдавшихся в них на трех длинах волн.

**Параметры диффузии и волноводов Zn:LiNbO<sub>3</sub>**

Образец	Параметры диффузии (время, температура)	Срез	Число ТЕ-мод, нм		
			526,5	632,8	1053
1 (+Y)	2 ч (2 цикла по 1 ч), 870 °С	Y	2	3	1
1 (–Y)	2 ч (2 цикла по 1 ч), 870 °С	Y	2	3	1
2	2 ч, 930 °С	Y	2	2	1
3	3 ч (3 цикла по 1 ч), 880 °С	X	3	3	1
4	5 ч (2 цикла: 4 ч и 1 ч), 870 °С	X	3	3	2
5	3 ч (3 цикла по 1 ч), 900 °С	X	2	2	1

В образце 1 Y-среза, имеющего обе оптически полированные поверхности, пленки осаждались из раствора естественным образом на каждую из них, и волновод формировался как на поверхности с нормалью +Y, так и на поверхности с нормалью –Y.

Для исследования характеристик полученных волноводов после отжига производились оптические измерения спектра эффективных показателей преломления волноводных мод и показателя преломления подложки методом призменного ввода-вывода излучения. Эксперименты показали, что импульсное излучение с длиной волны 1053 нм при некоторых углах ввода приводит к ГВГ в исследованных волноводах Zn:LiNbO<sub>3</sub>, которая фиксировалась по *t*-линиям, выводимым из волновода выходной призмой связи на длинах волн 532 и 526,5 нм соответственно. Измеренные углы ввода свидетельствуют о том, что при некоторых из них ГВГ обусловлена несинхронным волноводным процессом, когда возбуждаемая в волноводе ТЕ-мода ИК-диапазона является волной накачки. Другие углы, при которых наблюдается волноводная ГВГ, обусловлены тем, что наводимая при отражении волны накачки от границы раздела призмы ввода с поверхностью волновода нелинейная поляризация находится в синхронизме с волноводной модой на частоте второй гармоники. Данная методика позволяет определять спектр эффективных показателей преломления волновода сразу для двух длин волн (1053 и 526,5 нм), при использовании излучения с единственной длиной волны 1053 нм.

### Формирование планарных ПДС в волноводах Zn:LiNbO<sub>3</sub>

Проведенные измерения эффективных показателей преломления позволили рассчитать периоды ПДС, необходимых для получения квазисинхронной ГВГ в этих волноводах, составляющих от 6,60 до 6,85 мкм. Для создания ПДС электронным пучком использовалась методика, описанная в работе [10], на растровом электронном микроскопе JSM-840A. Структуры формировались при нанесении серий периодических локальных облучений при энергии электронного луча 25 кэВ и токе 100 пА. Периоды исследованных структур, имеющих планарный характер, составляли от 4,75 до 7,25 мкм. Доза облучения для различных структур изменялась от 500 до 2000 мкКл/см<sup>2</sup> при поперечных размерах облучаемой области порядка 700×700 мкм<sup>2</sup>.

### Генерация второй гармоники на ПДС в структурах Zn:LiNbO<sub>3</sub>

Оптические исследования планарных ПДС проводились методом ГВГ-микроскопии [11]. Поверхность образца засвечивалась широким пучком лазерного излучения ( $\lambda=1053$  нм) с длительностью импульсов 10 нс и энергией 200 мкДж. Изображение всех сформированных ПДС, а также отдельные изображения каждой из структур были получены на длине волны 526,5 нм с помощью микроскопической системы и сопряженного с ней цифрового видеоокуляра.

Эффективная волноводная ГВГ на ПДС с пространственным периодом 6,6 мкм наблюдалась в волноводе 3 (см. таблицу) при накачке (1053 нм) на моде TE<sub>0</sub>. Излучение на длине волны 526,5 нм фиксировалось с помощью выводной призмы из рутила в виде совокупности *t*-линий на модах TE<sub>0</sub>–TE<sub>2</sub>, а также по рассеянию в излучательные моды микроскопической системой, сопряженной с видеоокуляром.

### Заключение

Таким образом, разработана технология формирования оптических волноводов  $Zn:LiNbO_3$  диффузией из пленок оксида цинка в подложки Y- и X-срезов ниобата лития и показана возможность использования таких волноводов в устройствах нелинейной оптики.

Работа выполнена при поддержке программ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» и ФАНИ (ГК 02.740.11.0553). Авторы благодарят С.А. Кузнецова, В.В. Козика и С.М. Шандарова за постановку задачи и консультации и Л.С. Коханчик за формирование ПДС.

### Литература

- Сидоров Н.В. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны / Н.В. Сидоров, Т.Р. Волк, Б.Н. Маврин, В.Т. Калинников. – М.: Наука, 2003. – 255 с.
- Волноводная оптоэлектроника / Под ред. Т. Тамира. – М. : Мир, 1991. – 575 с.
- Атучин В.В., Белейчева Т.Г. Металл-диффузионные оптические волноводы на ниобате лития: технологии, математическое моделирование. – Владивосток: Морской гос. ун-т им. адм. Г.И. Невельского, 2009. – 279 с.
- Shiller F., Herreros B., Lifante G. Optical characterization of vapor Zn-diffused waveguides in lithium niobate // J. Opt. Soc. Am. A. – 1997. – Vol. 14. – P. 425–429.
- Nevado R., Lifante G. Characterization of index profile of Zn-diffused  $LiNbO_3$  waveguides // J. Opt. Soc. Am. A. – 1999. – Vol. 16. – P. 2574–2580.
- Young W.M., Fejer M.M., Digonnet M.J.F. et al. Fabrication, characterization and index profile modeling of high – damage resistance Zn – diffused waveguides in congruent and  $MgO$ :Lithium niobate // J. Lightwave Technol. – 1992. – Vol. 10, № 9. – P. 1238–1246.
- Feier M.M., Magel G.A., Jundt D.H., Byer R.L. Quasi-phase matched second harmonic generation: tuning and tolerances // IEEE J. Quant. Electron. – 1992. – Vol. 28. – P. 2631–2654.
- Kitaeva G. Kh. Terahertz generation by means of optical lasers // Laser Phys. Lett. – 2008. – Vol. 5. – P. 559–576.
- Yamada M. Electrically induced Bragg-diffraction grating composed of periodically inverted domains in lithium niobate crystals and its application devices // Rev. Sci. Instrum. – 2000. – Vol. 71. – P. 4010–4016.
- Коханчик Л.С., Бородин М.В., Шандаров С.М. и др. Периодические доменные структуры, сформированные электронным лучом в пластинах  $LiNbO_3$  и планарных волноводах  $Ti:LiNbO_3$  Y-ориентации // ФТТ. – 2010. – Т. 52. – С. 1602–1609.
- Soergel E. Visualization of ferroelectric domains in bulk single crystals // Appl. Phys. B. – 2005. – Vol. 81. – P. 729–752.

---

### Анисимов Дмитрий Олегович

Аспирант каф. электронных приборов ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 41-38-87  
Эл. адрес: dimon1a@rambler.ru

### Бородин Максим Викторович

Аспирант каф. электронных приборов ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 41-38-87  
Эл. адрес: cgypter@ed.tusur.ru

### Печенкин Александр Юрьевич

Студент каф. электронных приборов ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 41-38-87  
Эл. адрес: Alex-tusur@yandex.ru

### Смычков Станислав Александрович

Магистр 2-го курса каф. электронных приборов ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 41-38-87  
Эл. адрес: S.smy@sibmail.com

**Халикулова Светлана Фархадовна**

Студентка 2-го курса Национального исследовательского Томского государственного университета

Тел.: (382-2) 42-08-02

Эл. адрес: Konphetko@sibmail.com

**Щербина Веста Вячеславовна**

Аспирант каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-87

Эл. адрес: vesta-87@mail.ru

Anisimov D.O., Borodin M.V., Pechenkin A.Ju., Smychkov S.A., Halikulova S.F., Shcherbina V.V.  
**Planar optical waveguides Zn: LiNbO<sub>3</sub> for an integrated and nonlinear optics**

The results of investigations of planar optical waveguides created by high-temperature diffusion of Zinc oxide films in the substrates of Y-and X-cut lithium niobate are presented. The shaped waveguide structures Zn: LiNbO<sub>3</sub> have been used for the synthesis of these planar domain gratings by direct electron-beam irradiation of the substrate. The characteristics of the gratings have been determined as a result of the second-harmonic generation on the gratings. By method of optical second harmonic generation on these lattices are evaluated by their performance.

**Keywords:** lithium niobate, planar optical waveguide, domain structure, second-harmonic generation.