

**ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ И ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ**

© 2012 В.В. Щербина, М.В. Бородин, С.А. Смычков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Поступила в редакцию 25.01.2012

В данной работе представлены результаты формирования и исследования планарных волноводных структур, а также периодических доменных структур (ПДС) на основе кристалла ниобата лития. ПДС создавались электронным пучком как в нелегированных подложках X- и Y-срезов ниобата лития, так и в волноводах  $Zn:LiNbO_3$  и  $Ti:LiNbO_3$ , которые предварительно были сформированы на таких подложках. Также был проведен теоретический анализ и оценена эффективность генерации волн терагерцевого диапазона при нелинейном преобразовании света на планарных ПДС в симметричной целевой волноводной структуре, состоящей из двух пластин ниобата лития.

Ключевые слова: планарный волновод, периодические доменные структуры, генерация второй гармоники.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Хорошие электрооптические и нелинейно-оптические свойства обуславливают широкое применение кристаллов ниобата лития для создания интегрально-оптических устройств.

Применение периодических доменных структур (ПДС) позволяет существенно расширить диапазон трансформации кристаллом ниобата лития спектра лазерного излучения и реализовать режим квазисинхронизма как для эффективной генерации второй оптической гармоники (ГВГ) [1], так и для параметрического преобразования частоты в различные спектральные диапазоны [2], в том числе в терагерцевую (ТГц) область [3].

Для реализации задач нелинейной оптики, связанных с преобразованием спектральных характеристик лазерного излучения, требуется высокая стабильность оптических свойств, в частности, для выдерживания условий фазового синхронизма. Одним из способов уменьшения фотоиндуцированных изменений параметров среды является введение соответствующих примесей в состав кристалла. Перспективным для создания нелинейно-оптических элементов является диффузионное легирование ниобата лития такими примесями, как цинк [4] и галлий [5], которые снижают фоторефрактивную чувствительность ниобата лития к излучению видимого диапазона при объемном легировании [6].

В данной работе представлены результаты исследований стойкости планарного волновода

$Zn:LiNbO_3$  к воздействию излучения твердотельного лазера с длиной волны 532 нм, а также результаты исследований характеристик планарных ПДС, созданных электронным пучком в подложках X- и Y-срезов ниобата лития. Проведен теоретический анализ и оценена эффективность генерации волн терагерцевого диапазона при нелинейном преобразовании света на планарных ПДС в симметричной целевой волноводной структуре, состоящей из двух пластин ниобата лития.

**2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Волноводы  $Ti:LiNbO_3$  создавались напылением титана на подложки Y-среза ниобата лития с последующей диффузией при температуре около 1050 °С. Для формирования волноводов  $Zn:LiNbO_3$  использовались подложки X-среза с толщиной от 1 до 2,5 мм, на которых из пленкообразующих растворов осаждались методом вытягивания пленки ZnO [7]. Далее проводилась диффузия при температурах от 800 до 1050 °С в воздушной атмосфере в течение 1-20 часов.

Формирование периодических доменных решеток в нелегированных образцах ниобата лития и в полученных волноводных структурах  $Ti:LiNbO_3$  и  $Zn:LiNbO_3$  проводилось в растровом электронном микроскопе JSM-840A с дополнительно встроенной программой NanoMaker, позволяющей управлять электронным лучом при рисовании по поверхности и контролировать дозы облучения. Доза облучений варьировалась в диапазоне 500-2000 мкКл/см<sup>2</sup> при энергии пучка электронов 25 кэВ и токе ~100 пА; общие поперечные размеры облучаемой области составляли порядка 700x700 мкм<sup>2</sup>. Периоды сформированных структур, имеющих планарный характер, составляли от 4,75 до 7,25 мкм.

Щербина Веста Вячеславовна, ассистент, аспирант кафедры электронных приборов. E-mail: vesta-87@mail.ru  
Бородин Максим Викторович, ассистент, аспирант кафедры электронных приборов. E-mail: sуртeя06@rambler.ru  
Смычков Станислав Александрович, инженер, аспирант кафедры электронных приборов. E-mail: s.smych@mail.ru

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА $Zn:LiNbO_3$ К ОПТИЧЕСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Стойкость волновода к лазерному излучению оценивалась по величине нелинейной добавки к показателю преломления, возникающей в волноводном слое при неоднородной засветке. Для этого при помощи двухпучкового взаимодействия в волноводе записывалась фоторефрактивная решётка, после чего измерялась эффективность дифракции лазерного пучка на этой решётке. Запись решётки производилась в течение 10 минут, после чего один из входящих пучков перекрывался, и измерялась интенсивность дифрагированного излучения. Для сравнения аналогичные измерения были проведены в волноводе  $Ti:LiNbO_3$ . Эффективность дифракции в планарной волноводной структуре  $Zn:LiNbO_3$  составила 7%, а величина нелинейной добавки  $5,625 \cdot 10^{-6}$ , а для структуры  $Ti:LiNbO_3$  20% и  $9,814 \cdot 10^{-6}$  соответственно. Следовательно, планарная волноводная структура  $Zn:LiNbO_3$  является более стойкой к оптическому излучению, по сравнению со структурой  $Ti:LiNbO_3$ .

Экспериментальная установка для наблюдения изменений интенсивности прошедшего через волновод света во времени состояла из твердотельного лазера с длиной волны 532 нм, коллиматора, стеклянной пластины, волновода  $Zn:LiNbO_3$ , рутиловых призм связи, фотодиодов ФД-24К, цифровых микроамперметров и блока считывания и обработки данных, подключенного к персональному компьютеру. Интенсивность излучения лазера изменялась посредством изменения угла падения лазерного луча на пластину из кварцевого стекла.

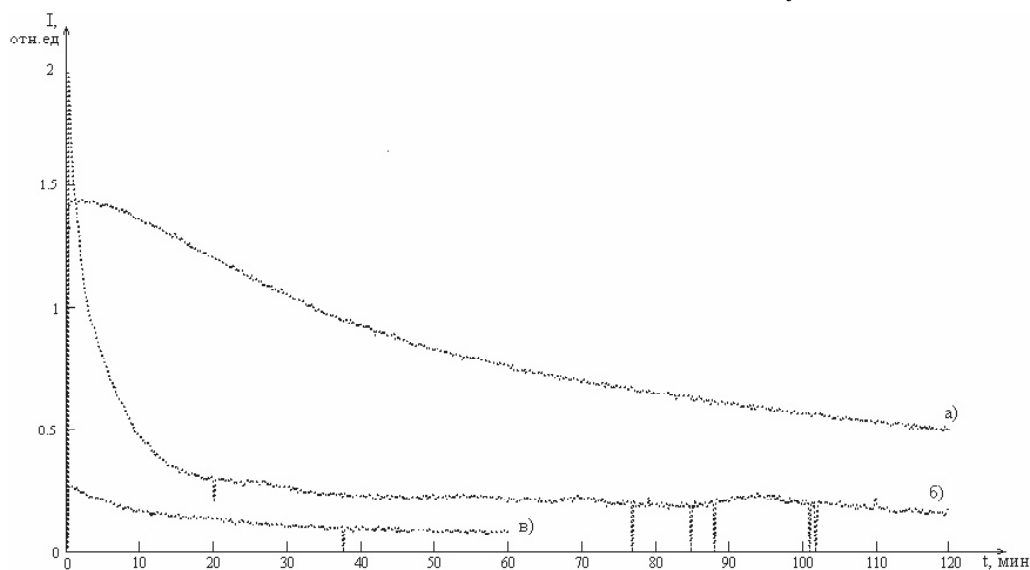
В результате экспериментов, время которых составляло от 600 до 7200 с, были получены зависимости интенсивности излучения на выходе из волновода от времени воздействия при мощностях пучка, падающего на призму ввода, составляющих 4, 18 и 37 мВт (см. рис. 1). При входной мощности 4 мВт в течение 1 часа плавное уменьшение интенсивности выводимого из волновода излучения произошло в 2,88 раза. Для входной мощности 37 мВт выходная интенсивность за час экспозиции упала уже в 8,9 раза.

Свет большой интенсивности приводит к более сильным изменениям показателя преломления, вследствие чего нарушаются оптимальные условия распространения света в волноводе, соответствующие волноводной моде, и его интенсивность падает. Эффект самодефокусировки, усиливающийся с ростом интенсивности, также вносит негативный вклад.

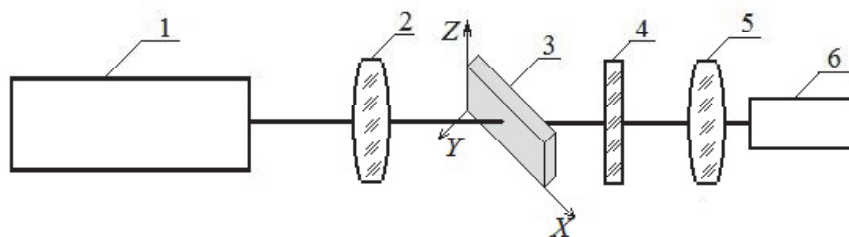
### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ

Визуализация планарных ПДС методом ГВГ-микроскопии, являющимся неразрушающим и пригодным для подложек как Y-, так и X-срезов, проводилась при прохождении через поверхности образцов, имеющих две оптически полированные грани, пучка лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 1053$  нм, длительностью импульсов 10 нс и энергией 200 мкДж. Лазерный пучок расширялся системой из оптических линз и засвечивал необходимый участок кристалла. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.

Изображения как отдельных ПДС и их фрагментов, так и совокупности нескольких струк-



**Рис. 1.** Зависимость интенсивности излучения на выходе из волновода от времени: а — входная мощность излучения 4 мВт; б — входная мощность излучения 18 мВт; в — входная мощность излучения 37 мВт

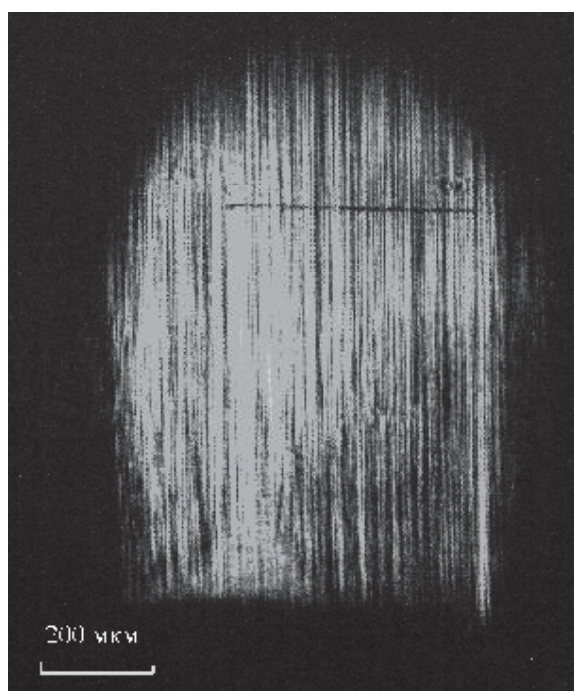


**Рис. 2.** Экспериментальная установка для исследования периодических доменных структур методом ГВГ-микроскопии:

1 - лазер; 2 – линза; 3 – кристалл ниобата лития с периодическими доменными структурами; 4 – светофильтр; 5 – объектив; 6 – цифровая камера- окуляр DCM 310

тур наблюдались на длине волны 526.5 нм на фоне несинхронной ГВГ в объеме кристалла при засветке соответствующей части его поверхности. Изображение отдельной планарной ПДС, представленное на рис. 3, получено на второй гармонике пучка накачки с помощью микроскопического объектива с увеличением 8Ч и цифровой камеры-окуляра DCM 310.

В волноводах  $Zn:LiNbO_3$  визуализация ПДС производилась путем ввода лазерного излучения в волновод. Для пучка накачки с длительностью импульсов 10 нс и энергией 200 мкДж, возбуждаемого на моде  $TE_0$  ( $\lambda = 1053$  нм), на этих структурах наблюдалась квазисинхронная волноводная ГВГ на модах  $TE_0$ - $TE_2$ . При волноводном распространении за счет рассеиваемого на доменных структурах света также удалось получить изображения структур (рис. 4).



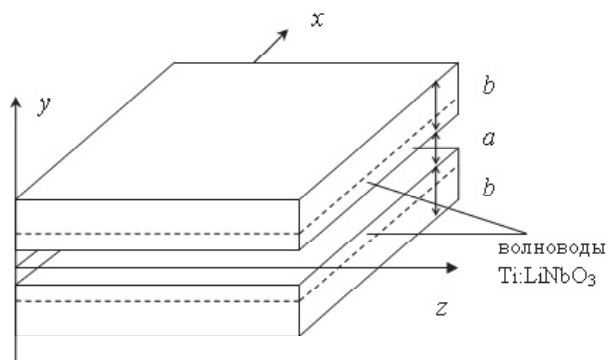
**Рис. 3.** Изображение планарной ПДС с пространственным периодом 6,7 мкм, сформированной на подложке X-среза конгруэнтного ниобата лития

### 5. АНАЛИЗ ГЕНЕРАЦИИ ВОЛН ТЕННАЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ СВЕТА В СИММЕТРИЧНОЙ ЩЕЛЕВОЙ ВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРЕ НА НИОБАТЕ ЛИТИЯ

В симметричной щелевой волноводной структуре, состоящей из пластин с планарными волноводами  $Ti:LiNbO_3$  Y-среза (в которых сформированы ПДС с необходимым периодом), разделенных воздушным зазором  $a$  и имеющих толщину  $b$  (рис. 5) была рассмотрена квазисинхронная генерация ТГц излучения. Предполагалось, что световые волны с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  распространяются как  $TE$ -моды в планарных волноводах в направлении оси  $x$ , генерируя на ПДС моду  $TE_0$  рассматриваемой симметричной структуры, с разностной частотой, соответствующей ТГц диапазону. На рис. 6 представлено нормированное на единичную амплитуду при  $y = 0$  поперечное распределение светового поля  $E_{z_2}(y)$  для моды  $TE_0$ , возбуждаемой на частоте 1 ТГц ( $\lambda_{THz} = 300$  мкм) в структуре с пластинами, имеющими толщину  $b = 30$  мкм. Из рис. 6 следует, что вблизи границ пластин, на которых находятся титан-диффузионные волноводы, зна-



**Рис. 4.** Фотография рассеянного на периодической доменной структуре света, полученное на второй гармонике пучка накачки с помощью микроскопического объектива и веб-камеры



**Рис. 5.** Симметричная щелевая волноводная структура для излучения ТГц диапазона, состоящая из двух пластин ниобата лития, содержащих оптические волноводы Ti:LiNbO<sub>3</sub>

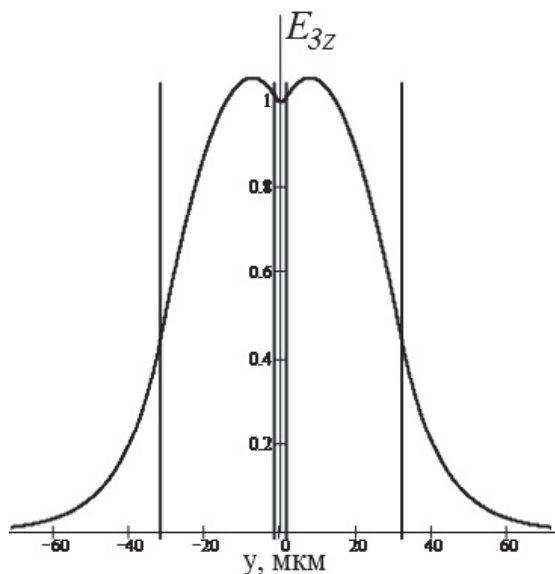
чения ТГц поля близки к максимальным. Таким образом, в рассматриваемой щелевой симметричной структуре достигается концентрация светового поля, позволяющая увеличить эффективность преобразования  $\eta$  оптических волн накачки в излучение ТГц диапазона.

Оптические волноводы, которые могут быть сформированы диффузией титана в обоих, или в одной из пластин, не оказывают существенного влияния на распространение излучение ТГц диапазона. Использование известного волнового уравнения позволило нам получить дисперсионное уравнение для четных и нечетных ТЕ мод, а также поперечное распределение светового поля для четных ТЕ мод в рассматриваемой структуре.

Эффективность преобразования в излучение ТГц диапазона в волноводных структурах определяется интегралом перекрытия полей взаимодействующих волноводных мод и выполнением условий синхронизма. Нами получены соотношения для расчета эффективности нелинейного преобразования  $\eta = P_{THz} / (P_1 P_2)$ , соответствующие одномодовому возбуждению оптических и ТГц волноводов, обеспечивающему взаимодействие двух волн оптического диапазона (с мощностями  $P_1$  и  $P_2$ ) в рассматриваемой структуре. Расчеты показали, что для структуры с пластинами, имеющими толщину 30 мкм, эффективность составляет  $1.20 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}^{-1}$ . При аналогичных расчетах для структуры с волноводными пластинами с толщиной 15 мкм, эффективность увеличивается до значения  $\eta = 3.11 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}^{-1}$ . В расчетах ширина световых пучков вдоль оси  $z$  принималась равной 100 мкм, длина взаимодействия  $L = 10 \text{ мм}$ .

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе показано, что использование легирования цинком вме-



**Рис. 6.** Распределение электромагнитного поля для моды ТЕ<sub>0</sub>, возбуждаемой на частоте 1 ТГц в щелевой симметричной структуре (рис. 1) с пластинами из ниобата лития Y-среза, имеющими толщину  $b = 30 \text{ мкм}$  и разделенными воздушным зазором  $a = 3 \text{ мкм}$ . Вертикальные линии соответствуют границам пластин ниобата лития

сто титана для создания волноводов на ниобате лития приводит к снижению фоторефрактивных свойств материала. Также приведены результаты исследований характеристик ПДС, созданных электронным пучком в подложках X- и Y-срезов ниобата лития. Проведен теоретический анализ и оценена эффективность генерации волн терагерцевого диапазона при нелинейном преобразовании света на планарных ПДС в симметричной щелевой волноводной структуре, состоящей из двух пластин ниобата лития.

*Авторы благодарят Л.С. Коханчик за изготовление ПДС, С.А. Кузнецову за изготовление пленок, а также С.М. Шандарова за постановку задачи и полезные консультации.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Houe M., Townsend P.D.* An introduction to methods of periodic poling for second-harmonic generation // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V.28. P. 1747–1763.
2. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically-poled LiNbO<sub>3</sub>/ *L.I. Myers, R.C. Eckardt, M.M. Fejer, R.L. Byer, W.R. Bosenberg, J.W. Pierce*// J. Opt. Soc. Am. B. 1995. V.12. P. 2102–2116.
3. *Kitaeva G. Kh.* Terahertz generation by means of optical lasers // Laser Phys. Lett., 2008. V.5. P. 559–576.
4. *Young W.M., Fejer M.M., Dignonnet 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.
5. *Huang W.H., Wang W.S.* Gallium in-diffusion for the fabrication of lithium niobate optical waveguides // IEEE Phot. Technol. Lett., 2007. Vol.19. №20. P.1679-1681.
  6. *Сидоров Н.В., Волк Т.Р., Маерин Б.Н., Калинин В.Т.* Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003. 255 с.
  7. *Анисимов Д.О., Бородин М.В., А.Ю. Печёнкин и др.* Планарные оптические волноводы Zn:LiNbO<sub>3</sub> для интегральной и нелинейной оптики // Доклады ТУ-СУР, 2010, №2(22), Ч.2, С.58-61.

## FORMATION AND INVESTIGATION OF PLANAR WAVEGUIDE AND PERIODIC DOMAIN STRUCTURES IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

© 2012 V.V. Shcherbina, M.V. Borodin, S.A. Smychkov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

This paper presents the results of investigation and formation of planar waveguide structures, as well as periodic domain structures (PDS) on the basis of a crystal of lithium niobate. PDS were formed by the electron beam as in undoped substrates of X- and Y-cut lithium niobate and in Zn: LiNbO<sub>3</sub> and Ti: LiNbO<sub>3</sub> waveguides, which had been previously formed on such substrates. The theoretical analysis was conducted and the efficiency of generation of waves at terahertz nonlinear conversion of light on the PDS in a symmetric planar waveguide slot structure consisting of two plates of lithium niobate was evaluated.

Key words: planar waveguide, periodic domain structure, second harmonic generation.

---

*Vesta Shcherbina, Assistant Lecturer, Graduate Student.*

*E-mail: vesta-87@mail.ru*

*Maxim Borodin, Assistant Lecturer, Graduate Student.*

*E-mail: crypter06@rambler.ru*

*Stanislav Smychkov, Engineer, Graduate Student.*

*E-mail: s.smy@mail.ru*