

УДК 535:621.372.8

А.Д. Безпальный, А.О. Верхотуров, В.М. Шандаров

## Волноводные и дифракционные элементы устройств и приборов фотоники, оптически индуцированные в подложках ниобата лития с фоторефрактивным поверхностным слоем

Путем поточечной экспозиции и освещения через амплитудную маску сформированы волновоодно-оптические и фазовые дифракционные структуры в кристаллических образцах ниобата лития с поверхностным легированием фоторефрактивными примесями.

**Ключевые слова:** фоторефрактивный эффект, ниобат лития, поточечное экспонирование, волноводный элемент, дифракционная решетка.

Кристаллы ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) широко используются в интегральной и нелинейной оптике, благодаря уникальному сочетанию оптических, электрооптических, акустооптических, нелинейно-оптических и механических свойств [1]. Значительный интерес представляет и фоторефрактивная чувствительность материала при его легировании в процессе выращивания кристалла некоторыми примесями, например железом (Fe) и медью (Cu) [1]. Легированные кристаллические образцы пригодны для голографической записи, с помощью световых полей в них могут формироваться фазовые дифракционные решетки и более сложные голографические структуры, что важно в плане создания оптоэлектронных и полностью оптических элементов фотоники. Различные примеси могут вводиться в образцы  $\text{LiNbO}_3$  и через поверхность путем твердотельной диффузии, ионообменных реакций и ионной имплантации [2, 3]. Это позволяет изменять физические свойства материала в приповерхностной области в широких пределах. Так, приповерхностный слой может приобретать волновоодно-оптические или лазерные свойства [2, 4, 5], могут изменяться его акустические характеристики и оптическое поглощение [1]. Введение примесей через поверхность позволяет обеспечить их более высокую концентрацию без ухудшения механических свойств материала в приповерхностном слое в сравнении с легированием в процессе роста. Кроме того, при этом возможно легирование разных областей поверхности образца разными примесями или их комбинациями [6].

Целью данной работы является исследование формирования и характеристик волновоодно-оптических структур и одномерных дифракционных решеток в образцах  $\text{LiNbO}_3$  с поверхностным легированием фоторефрактивными примесями, с использованием процедур поточечного последовательного экспонирования фоточувствительной области лазерным излучением и ее параллельного экспонирования через одномерный амплитудный транспарант.

**Исследование оптически индуцированных волноводных структур.** Волновоодно-оптические каналные структуры формировались в образце  $\text{LiNbO}_3$  Y-срезы с размерами  $30 \times 3 \times 15$  мм<sup>3</sup> по осям X, Y и Z. Приповерхностная область легирована ионами Cu путем термической диффузии при температуре 900 °C из пленки, нанесенной на поверхность образца распылением в вакууме. Толщина легированного слоя составляет около 100 мкм. Присутствие меди не приводит к значительному возрастанию темновой проводимости  $\text{LiNbO}_3$ , что обеспечивает долговременное хранение в таком материале оптически индуцированных элементов. Источником излучения служил YAG:Nd<sup>3+</sup> лазер с удвоением частоты, работающий в непрерывном режиме. Длина волны света и мощность излучения составляли  $\lambda = 532$  нм и  $P = 10$  мВт. Лазерный пучок фокусировался на поверхность образца линзой с фокусным расстоянием  $\sim 7$  см, диаметр пучка в области перетяжки по уровню половинной интенсивности составлял 70 мкм.

Вследствие фоторефрактивного эффекта показатель преломления  $\text{LiNbO}_3$  в экспонированной области понижается [1, 7], поэтому волновоодно-оптический эффект может проявляться в промежутке между такими областями. В экспериментах они представляли собой параллельные полосы, ориентированные параллельно оси X, создаваемые поточечным экспонированием поверхности кристалла (плоскость, перпендикулярная оси Y) сфокусированным световым пучком. Каждая из двух полосок состояла из 20 точек, центры которых отстояли на 25 мкм. Расстояние между центрами полосок оценивалось в 90 мкм при диаметре экспонирующего пучка в области перетяжки по уровню

половинной интенсивности в 70 мкм. Время экспонирования каждой точки при мощности излучения 10 мВт изменялось в разных экспериментах от 2 до 10 с. Смещение образца относительно светового пучка осуществлялось с помощью линейного позиционера, обеспечивающего точность перемещения 5 мкм.

Для визуального контроля индуцированных в LiNbO<sub>3</sub> оптических неоднородностей использовался метод их зондирования нефокусированным и фокусированным лазерными пучками (рис. 1). При зондировании экспонированной области с помощью анализатора лазерных пучков изучались световые картины на выходной плоскости образца (при использовании нефокусированного пучка) и в дальней зоне дифракции (в случае фокусированного пучка).

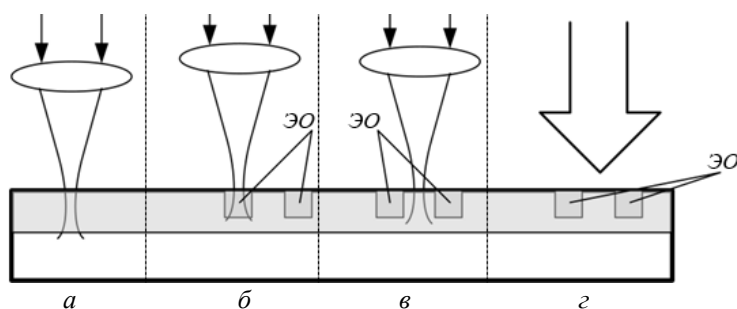


Рис. 1. Схема взаимного расположения светового поля и экспонированных областей (ЭО) при оптическом зондировании фокусированным и нефокусированным пучками:

*а* – фокусированный пучок в оптически однородной области; *б* – в экспонированной области; *в* – между экспонированными областями; *г* – параллельный пучок в области наведенной структуры

Рисунок 2, *а* иллюстрирует результаты зондирования экспериментального образца световым пучком с диаметром 0,55 мм (по уровню половинной интенсивности) в области наведенной канальной волноводной структуры. Источником излучения являлся He-Ne лазер с длиной волны света  $\lambda = 633$  нм и поляризацией, соответствующей необыкновенной волне кристалла. Две параллельные темные полосы в центральной части картины соответствуют экспонированным областям с пониженным показателем преломления. Светлая полоса между ними – волноводная область.

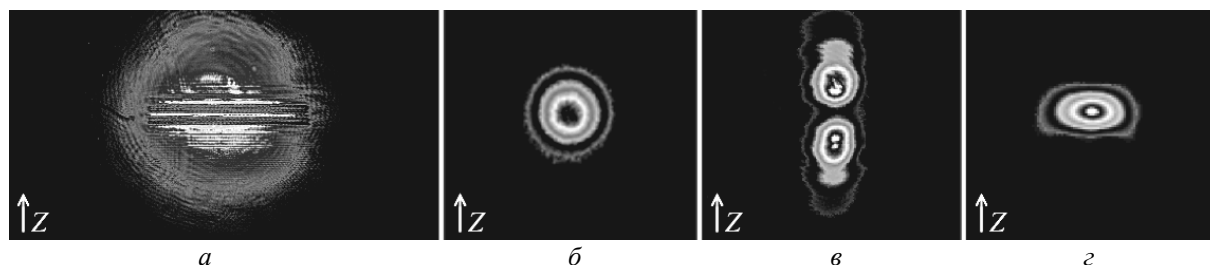


Рис. 2. Световые картины, полученные при оптическом зондировании: *а* – параллельный пучок в области наведенной структуры; *б* – фокусированный пучок в оптически однородной области;

*в* – пучок зондирует экспонированную область; *г* – пучок между экспонированными полосками

Для изучения локальных изменений показателя преломления, возникающих при экспонировании образца, область сформированных структур зондировалась фокусированным световым пучком. В этом случае диаметр пучка сравним с масштабом оптической неоднородности, поэтому дифрагированное световое поле меняет свой профиль в направлении нормали к границам этой неоднородности, т.е. в поперечном направлении относительно волноводной полоски. На рис. 2, *б-г* представлены световые картины в дальней зоне дифракции, иллюстрирующие изменение поперечного распределения интенсивности фокусированного лазерного пучка с диаметром 80 мкм (по уровню половинной интенсивности). Картины соответствуют зондированию образца в направлении оси *Y* в оптически однородной области (см. рис. 2, *б*), в экспонированной области (рис. 2, *в*) и в области между экспонированными полосками (см. рис. 2, *г*). В оптически однородной области световая картина имеет круговую симметрию (см. рис. 2, *б*), но эта симметрия не сохраняется при зондировании образца в оптически неоднородных областях. Область между экспонированными полосками играет в этом случае роль фокусирующей цилиндрической линзы при распространении света в направле-

нии оси  $Y$ , т.е. обладает волноводными свойствами при распространении света в направлении  $X$ . Следует отметить, что метод поточечного экспонирования использовался ранее при продольно-однородной оптической модуляции параметров прямолинейных фоторефрактивных канальных волноводов в  $\text{LiNbO}_3$  [8], однако он применим и для создания и модуляции волноводных элементов более сложной топологии. В материалах, не обладающих фоторефрактивными свойствами, также используется подобный подход поточечного экспонирования, но при этом требуются лазерные источники, работающие в режиме генерации световых импульсов фемтосекундной длительности с энергией импульса в единицы миллиджоулей [9].

**Исследование оптически индуцированных дифракционных элементов.** Одномерные фазовые дифракционные решетки формировались в кристаллическом образце  $\text{LiNbO}_3$   $Y$ -срезы с размерами  $13 \times 2 \times 8$  мм<sup>3</sup> по осям  $X \times Y \times Z$ , легированном комбинацией ионов Fe и Cu путем термической диффузии из пленок на поверхности образца. Глубина проникновения ионов Fe составляла около 25 мкм (при температуре диффузии 1000 °C), а ионов Cu – около 50 мкм (при температуре диффузии 900 °C). Это определялось разной величиной коэффициентов диффузии данных элементов в  $\text{LiNbO}_3$  [2]. В качестве источника излучения использовался  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  лазер с удвоением частоты, работающий в непрерывном режиме (длина волны света  $\lambda = 532$  нм). Мощность излучения менялась в экспериментах от 10 до 50 мВт, его поляризация соответствовала обыкновенной волне в кристалле.

Фазовые решетки в фоторефрактивном образце можно сформировать, используя разные оптические схемы для обеспечения периодического распределения интенсивности света в среде. Это двухпучковая голографическая схема, однолучевая схема с амплитудным транспарантом, расположенным непосредственно у экспонируемой поверхности образца, а также проекционная оптическая схема с возможностью масштабирования изображения амплитудного транспаранта на этой поверхности [10]. Амплитудный транспарант (АТ) позволяет обеспечить как не обязательно периодическую топологию дифракционной структуры в целом, так и близкий к ступенчатому виду профиль показателя преломления ее элемента [5]. В экспериментах использовалась схема формирования дифракционных решеток с амплитудным транспарантом у поверхности образца, обеспечивающая лучшую временную и температурную стабильность световой картины в процессе формирования фоторефрактивной решетки по сравнению с двухлучевой голографической схемой [10]. Роль АТ играла амплитудная дифракционная решетка с пространственным периодом 40 мкм на поверхности стандартной пластины фотошаблона. Она получена путем вакуумного напыления пленки хрома (Cr) и последующей фотолитографии. Ширина полосок Cr и расстояние между ними одинаковы (20 мкм). Ориентация АТ соответствовала параллельности вектора амплитудной решетки и оптической оси кристалла  $\text{LiNbO}_3$ , соответствующей направлению фотовольтаического тока при фоторефрактивном эффекте. Схема эксперимента по формированию фазовых дифракционных решеток в образце  $\text{LiNbO}_3$  представлена на рис. 3.

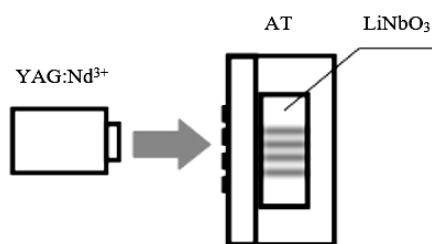


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для формирования в фоторефрактивном образце дифракционных элементов:  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  – непрерывный твердотельный лазер, АТ – амплитудный транспарант,  $\text{LiNbO}_3$  – кристалл ниобата лития

Для оценки параметров полученных структур использовался метод дифракции света. Лазерное излучение в виде коллимированного пучка с диаметром 2 мм распространялось в направлении нормали к плоскости  $Y$  кристалла. Изучались дифракционные картины в дальней зоне и ближней зоне (на выходной плоскости образца). Величина изменения показателя преломления материала в экспонированной области может быть оценена по измеренной дифракционной эффективности фазовой решетки, определяемой отношением интенсивности дифракционного максимума к интенсивности падающего светового пучка. При насыщаемом характере фоторефрактивной нелинейности временная зависимость дифракционной эффективности одномерной фазовой решетки  $\eta(t)$  в приближении гармонического характера пространственной зависимости показателя преломления определяется соотношением [1]:

$$\eta(t) = \sin^2 \left( \frac{\pi L \Delta n_S}{\lambda \cos(\theta)} \cdot (1 - \exp(-t/\tau)) \right), \quad (1)$$

где  $L$  – толщина решетки;  $\Delta n_S$  – максимальное изменение показателя преломления;  $\lambda$  – длина волны света в кристалле;  $\theta$  – угол Брэгга;  $\tau$  – постоянная, характеризующая скорость формирования фоторефрактивной решетки. Зависимость интенсивности первого дифракционного максимума от времени экспонирования изучалась с помощью фотодиодов в дальней зоне (измерения его интенсивности осуществлялись в отсутствие транспаранта АТ, при разных временах экспонирования).

На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость дифракционной эффективности фазовой решетки от времени экспонирования при световой мощности формирующего пучка 10 мВт и его диаметре 1,1 мм. Время формирования структуры при таких условиях составило около 1 мин, после чего величина интенсивности первого дифракционного максимума практически не изменялась. Здесь же приведены теоретические зависимости  $\eta(t)$  для разных значений  $\tau$  при  $L = 50$  мкм,  $\Delta n_S = 2 \cdot 10^{-5}$ .

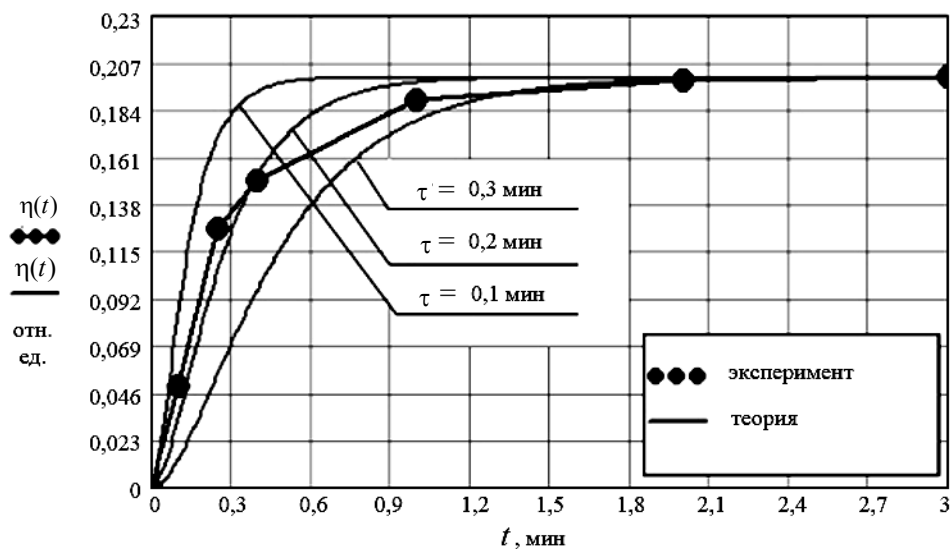


Рис. 4. Теоретические кривые и экспериментальная зависимость дифракционной эффективности фазовой решетки от времени формирования при мощности формирующего лазерного пучка 10 мВт

Дифракционные картины в ближней зоне (непосредственно на выходной поверхности образца) изучались с помощью анализатора лазерных пучков. На рис. 5 представлены дифракционная картина в дальней зоне и картина светового поля на выходной плоскости образца. Изображения получены при зондировании фоторефрактивной решетки излучением He-Ne лазера (ширина пучка 2 мм, световая мощность 0,5 мВт, поляризация излучения соответствует обыкновенной волне в кристалле). В дифракционной картине в дальней зоне видны максимумы не только первого порядка. Причиной является близкая к постоянному уровню интенсивность света на поверхности образца в области окон АТ. Попытки формирования дифракционных решеток в той же схеме в нелегированных образцах  $\text{LiNbO}_3$  показали, что при одинаковых экспериментальных условиях эффект оптического индуцирования подобных структур в этих образцах не наблюдается.



Рис. 5. Дифракционные картины при оптическом зондировании индуцированной в кристалле одномерной решетки:  $a$  – в дальней зоне;  $b$  – на выходной плоскости образца

Таким образом, экспериментально продемонстрировано формирование волноводных и фазовых дифракционных структур в кристаллических образцах  $\text{LiNbO}_3$  с легированием приповерхностной области фоторефрактивными примесями. Подобные структуры допускают многократную оптическую реконфигурацию топологии, что представляет интерес в плане их использования в полностью оптических устройствах фотоники.

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878.2014/К).

#### Литература

1. Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. – СПб.: Наука. С.-Петербургское отд., 1992. – 320 с.
2. Kip D. Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications // *Appl. Phys. B.* – 1998. – Vol. 67. – P. 131–150.
3. Chen F. Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 106, № 8. – P. 081101.
4. Lallier E. Laser Oscillation of Single Mode Channel Waveguide in Nd:MgO:LiNbO<sub>3</sub> / E. Lallier, J.P. Pocholle, M. Papuchon et al. // *Electronics Letters.* – 1989. – Vol. 25. – P. 1491–1492.
5. Das B.K. Distributed Feedback-Distributed Bragg Reflector Couple Cavity Laser With a Ti:(Fe):Er:LiNbO<sub>3</sub> Waveguide / B.K. Das, R. Ricken, V. Quiring et al. // *Optics Letters.* – 2004. – Vol. 29. – P. 165–167.
6. Тренихин П.А. Линейная и нелинейная дифракция световых пучков в фоторефрактивных фотонных решетках и сверхрешетках в ниобате лития / П.А. Тренихин, Д.А. Козорезов, К. Хаунхорст, Д. Кип, К.В. Шандарова, В.М. Шандаров // *Доклады ТУСУРа.* – 2010. – Т. 22, № 2. – С. 84–87.
7. Стурман Б. И. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления / Б.И. Стурман, В.М. Фридкин. – М.: Наука, 1992. – 208 с.
8. Kanshu A. Optically-induced defect states in photonic lattices: formation of defect channels, directional couplers, and disordered lattices leading to Anderson-like light localization / A. Kanshu, C.E. Rüter, D. Kip and V.M. Shandarov // *Appl. Phys. B.* – 2009. – Vol. 95, № 3. – P. 537–543.
9. Chen Feng. Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond laser micromachining / Chen Feng and Javier R. Vazquez de Aldana // *Laser & Photonics Reviews.* – 2014. – Vol. 8. – P. 251–275.
10. Davydov S.A. Quasi-one-dimensional Photonic Lattices and Superlattices in Lithium Niobate: Linear and Nonlinear Discrete light Diffraction / S.A. Davydov, P.A. Trenikhin, V.M. Shandarov et al. // *Physics of wave phenomena.* – 2010. – Vol. 18, № 1. – P. 1–6.
11. Ярив А. Оптические волны в кристаллах: пер. с англ. / А. Ярив, П. Юх. – М.: Мир, 1997. – 616 с.

---

#### Безпальный Александр Дмитриевич

Магистрант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР) ТУСУРа

Тел.: +7-953-914-66-06

Эл. почта: id\_alex@list.ru

#### Верхотуров Антон Олегович

Магистрант каф. СВЧиКР

Эл. почта: verhoturov.ao@gmail.com

#### Шандаров Владимир Михайлович

Д-р физ.-мат. наук., профессор, главный науч. сотрудник

Научно-образовательного центра «Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии» ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 70-15-18

Эл. почта: ShandarovVM@svch.rk.tusur.ru

Bezpalnyi A.D., Verhoturov A.O., Shandarov V.M.

#### Waveguide and diffraction elements of photonic devices and structures optically induced in lithium niobate wafers with photorefractive surface layer

Both, the optical waveguide elements and the phase diffraction structures have been formed in crystalline lithium niobate samples with surface doping by photorefractive impurities using the point-by-point exposure and the surface illumination through the amplitude mask.

**Keywords:** photorefractive effect, lithium niobate, point-by-point exposure, waveguide element, diffraction grating.