

Оптическое формирование канальных волноводов и планарных дифракционных решеток в фоторефрактивном приповерхностном слое ниобата лития

А. Д. Безпалый,* А. О. Верхотуров,† В. М. Шандаров‡

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
радиотехнический факультет,
кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
Россия, 634050, Томск, пр-т Ленина, д. 40*

В работе экспериментально исследуется оптическое индуцирование волноводных и дифракционных элементов в образцах ниобата лития с поверхностным легированием фоторефрактивными примесями. Путем дифракции света визуализировано пространственное распределение неоднородностей показателя преломления в экспонированных областях поверхности кристаллических подложек. Для формирования канальных волноводных элементов использовался метод поточечного экспонирования поверхности образца. Для создания одномерных дифракционных решеток поверхность образца экспонировалась лазерным излучением через амплитудный транспарант.

PACS: 42.25.Fx, 42.65.Hw, 42.65.Tg УДК: 535:621.372.8

Ключевые слова: волноводные элементы, дифракционные структуры, ниобат лития, оптическое индуцирование, экспонирование, зондирование.

ВВЕДЕНИЕ

Легирование многих материалов различными примесями приводит к существенной модификации их физических свойств. Так, введение ионов, склонных к перезарядке, в электрооптические кристаллы ниобата лития (LiNbO_3), танталата лития (LiTaO_3), стронций-бариевого ниобата ($\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$) и некоторые другие может на несколько порядков увеличить их фоторефрактивную чувствительность [1, 2]. Легирование кристаллов может осуществляться в процессе их выращивания, однако повышение концентрации вводимых примесей ограничено ухудшением механических свойств объемных образцов вследствие возрастания числа дефектов и возникновения упругих напряжений. Современные технологии твердотельной диффузии, ионного обмена и ионной имплантации позволяют значительно повысить степень легирования поверхностного слоя материала, дополнительно делая возможным введение разных примесей (или их комбинаций) в разные области поверхности образца [3–5]. Результатом является возможность варьирования физических свойств приповерхностной области материала в широких пределах.

Целью данной работы является исследование возможности оптического индуцирования волноводных и дифракционных элементов в образцах LiNbO_3 с поверхностным легированием фоторефрактивными примесями и изучение их характеристик. Для формирования канальных волноводных элементов использовался метод поточечного экспонирования поверхности образца. Для создания одномерных дифракционных решеток

поверхность образца экспонировалась лазерным излучением через одномерный амплитудный транспарант, как описано в [6].

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР

Канальные оптические волноводы формировались путем поточечного экспонирования поверхности пластины LiNbO_3 Y -срезы с размерами $30 \times 3 \times 15$ мм³ по осям $X \times Y \times Z$ при смещении образца относительно светового пучка. Приповерхностная область пластины легирована ионами меди путем твердотельной диффузии, толщина легированного слоя составляет около 100 мкм. Источниками света являлись YAG:Nd^{3+} и полупроводниковый лазеры, работающие в непрерывном режиме, с длинами волн излучения $\lambda = 532$ нм и $\lambda = 450$ нм. Поляризация экспонирующего излучения соответствовала обыкновенной волне кристалла, а его интенсивность составляла $I = 0.35$ кВт/см².

Экспонированные области представляли собой две параллельные полосы, сформированные из 30 (рис. 1а) и 20 (рис. 1б) перекрывающихся точек для каждой полосы. Время экспонирования точки в разных экспериментах изменялось от 5 до 12 с при диаметре светового пучка по уровню половинной интенсивности в 70 мкм (при $\lambda = 532$ нм) и 50 мкм (при $\lambda = 450$ нм).

Индукцированные в легированной поверхностной области LiNbO_3 неоднородности зондировались нефокусированным (рис. 1) и фокусированным (рис. 2) лазерными пучками с длиной волны излучения $\lambda = 633$ нм. Световые картины на выходной плоскости образца (при зондировании нефокусированным пучком с диаметром 0.7 мм) и в дальней зоне дифракции (в случае фокусированного пучка) изучались с помощью видеокамеры. Результаты оптического зондирования полу-

*E-mail: id_alex@list.ru

†E-mail: verhoturov.ao@gmail.com

‡E-mail: shandarov@hotmail.com

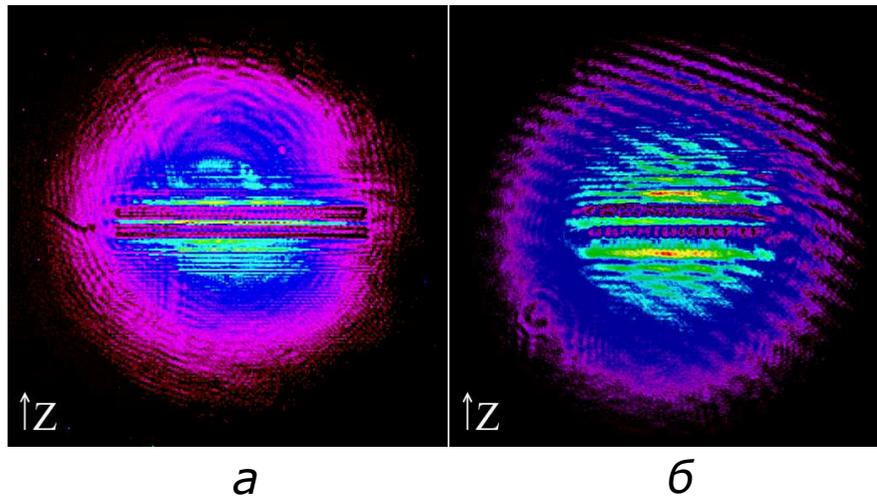


Рис. 1: Световые картины, полученные при оптическом зондировании экспонированных областей: *a* — излучением с $\lambda = 532$ нм; *б* — излучением с $\lambda = 450$ нм

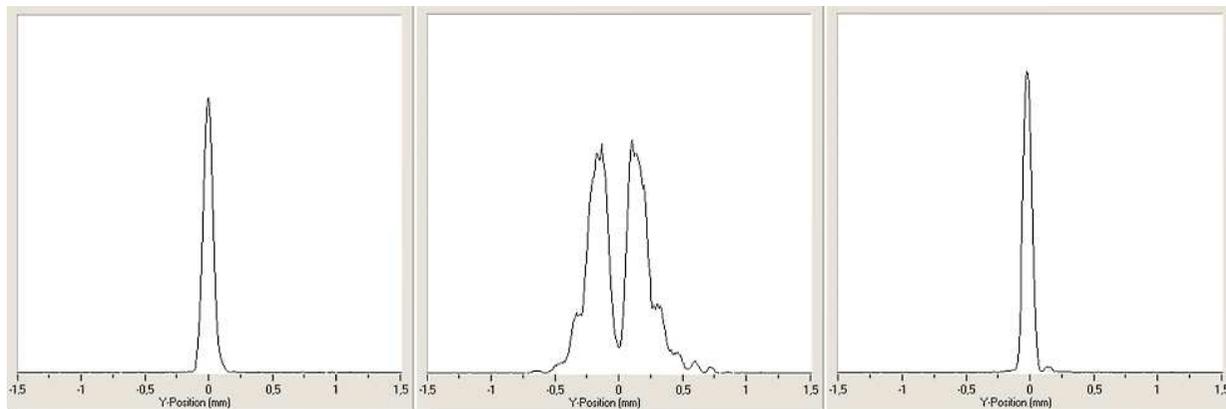


Рис. 2: Профили интенсивности светового пучка при оптическом зондировании экспонированной области: *a* — фокусированный пучок в оптически однородной области; *б* — пучок зондирует экспонированную область; *в* — пучок между экспонированными полосками

ченных канальных волноводных структур представлены на рис. 1.

Характер локальных изменений показателя преломления в экспонированных областях кристалла исследовался при зондировании этих областей фокусированным световым пучком с поперечными размерами, сопоставимыми с размерами индуцированных неоднородностей.

Результаты зондирования областей, экспонированных излучением с $\lambda = 532$ нм, световым пучком, направленным по оси Y , иллюстрируются профилями интенсивности световых картин: в оптически однородной области кристалла (рис. 2*а*), в области с пониженным показателем преломления (рис. 2*б*), и в волноводной области (рис. 2*в*).

Излучение, подаваемое на оптически однородную область кристалла, имеет гауссово распределение (рис. 2*а*), но при зондировании экспонированных областей профиль интенсивности светового пучка изме-

няется: при наведении на оптическую неоднородность уровень интенсивности заметно падает (рис. 2*б*), а в области между экспонированными полосками происходит локализация света в направлении оси Z (рис. 2*в*). Можно отметить, что сканирование световым пучком канальных оптических волноводов использовалось в [7] для модуляции параметров прямолинейных волноводов. При использовании поточечного экспонирования топология индуцированных волноводных структур может быть усложнена, что определяется формой пути светового пятна на поверхности образца.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Одномерные дифракционные решетки формировались в образце LiNbO_3 Y -среза с поверхностью, легированной ионами Fe и Cu. Размеры образца по осям

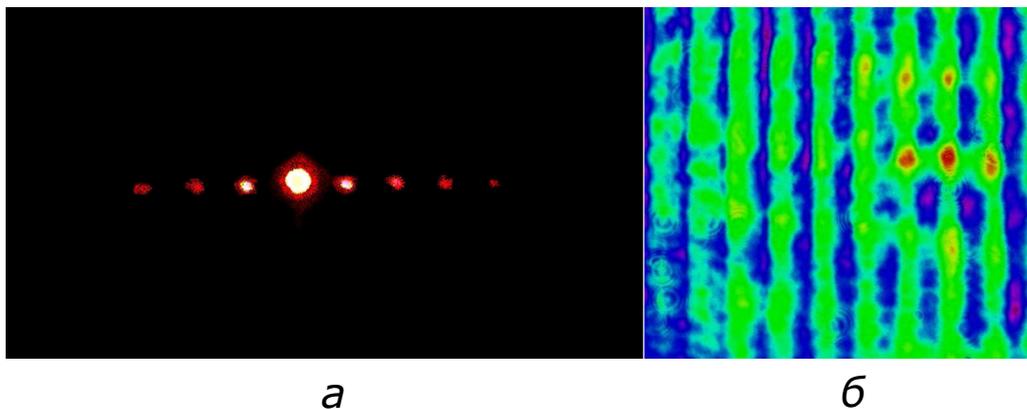


Рис. 3: Картины, соответствующие дифракции света ($\lambda = 633$ нм) на индуцированной планарной одномерной решетке в исследуемом образце: *a* — в дальней зоне; *b* — на выходной плоскости образца

X, Y, Z составляли $13 \times 2 \times 8$ мм³. В качестве источников излучения использовались полупроводниковый лазер ($\lambda = 450$ нм) и YAG:Nd³⁺ лазер ($\lambda = 532$ нм). Поляризация света при индуцировании структур соответствовала обыкновенной волне в кристалле. Интенсивность излучения составляла 35 Вт/см². Для исследования характеристик полученных элементов использовался метод дифракции света.

Формирование одномерных дифракционных решеток осуществлялось путем экспонирования поверхности образца через амплитудный транспарант (АТ). Это позволяет получить близкий к ступенчатому виду профиль показателя преломления дифракционного элемента. Транспарант АТ, представляющий собой дифракционную решетку с пространственным периодом 40 мкм на стандартной пластине фотошаблона, размещался на поверхности кристаллического образца.

Экспериментальные зависимости дифракционной эффективности решеток от времени экспонирования образца, при использовании двух источников излучения, представлены на рис. 3. Время формирования структуры определялось стационарным значением интенсивности первого дифракционного максимума. При используемой интенсивности света оно составляет около 5 мин для излучения с длиной волны $\lambda = 450$ нм, а для излучения с длиной волны 532 нм около 15 мин. Установлено, что максимальная величина дифракционной эффективности полученных решеток при экспонировании образца излучением YAG:Nd³⁺ лазера выше,

чем при использовании излучения полупроводникового лазера. Это может быть связано с различием эффективной толщины легированных областей для излучения с разными длинами волн, поскольку измеренная величина поглощения света при $\lambda = 450$ нм превышает таковую для $\lambda = 532$ нм.

Результаты оптического зондирования полученных структур излучением He-Ne лазера ($\lambda = 633$ нм, выходная мощность 1 мВт, поляризация соответствует необыкновенной волне кристалла) иллюстрируются световыми картинками, соответствующими дальней зоне дифракции (рис. 3*a*) и ближней зоне (выходной поверхности кристалла) (рис. 3*b*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в экспериментах изучены особенности формирования канальных волноводно-оптических структур и планарных дифракционных элементов в образцах LiNbO₃ с легированием поверхностной области фоторефрактивными примесями.

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

[1] Блистанов А. А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСИС, 2000.

[2] Петров М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, С.-Петербургское отд-ние, 1992.

[3] Kip D. Appl. Phys. B. **67**. P. 131. (1998).

[4] Chen F. J. Appl. Phys. **106**. N. 8. P. 081101. (2009).

[5] Das B. K. Optics Letters. **29**. P. 165. (2004).

[6] Тренихин П. А. Доклады ТУСУРа. **22**. № 2. С. 84. (2010).

[7] Kanshu A. Appl. Phys. B. **95**. № 3. P. 537. (2009).

Optical formation of channel waveguides and planar diffraction gratings within photorefractive surface layer of lithium niobate

A. D. Bezpaly^a, A. O. Verkhoturov^b, V. M. Shandarov^c

Tomsk State University of control System and Radioelectronics, Faculty of Radioengineering, Tomsk 634050, Russia.

E-mail: ^aid_alex@list.ru, ^bverhoturov.ao@gmail.com, ^cshandarov@hotmail.com

The optical induction of waveguide and diffraction elements in lithium niobate samples with surface doping by photorefractive impurities is experimentally investigated in the research. The spatial distribution of refractive index inhomogeneities in the exposed areas of crystal wafer surface has been visualized using the light diffraction method. Channel waveguide elements are formed by point-by-point exposure of sample's surface method. And the one-dimensional diffraction gratings are created by the sample surface exposure with laser radiation through the amplitude mask.

PACS: 42.25.Fx, 42.65.Hw, 42.65.Tg.

Keywords: waveguide elements, diffraction structures, lithium niobate, optical induction, exposure, probing.

Сведения об авторах

1. Безпальный Александр Дмитриевич — магистрант, лаборант-исследователь; тел.: (382) 270–15–18, e-mail: id_alex@list.ru.
2. Верхотуров Антон Олегович — магистрант, техник лаборатории; тел.: (382) 270–15–18, e-mail: verhoturov.ao@gmail.com.
3. Шандаров Владимир Михайлович — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, профессор; тел.: (382) 270–15–18, e-mail: shandarov@hotmail.com.