

Формирование дифракционных оптических структур в поверхностно легированном кристаллах ниобата лития методом поточечного индуцирования

А. Д. Безпалый, А. Е. Мандель, В. И. Быков

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия, e-mail: aleksandr.bezpalyi@tusur.ru*

В работе исследованы возможности формирования дифракционных оптических структур в поверхностно легированных ионами меди кристаллах ниобата лития. Дифракционные структуры формировались с различными характеристиками методом поточечного лазерного индуцирования изменений показателя преломления излучением с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Продемонстрированы результаты дифракции на сформированных структурах с интенсивностью первого дифракционного максимума, превышающего максимум нулевого порядка в несколько раз.

Ключевые слова: дифракционные структуры; поточечное индуцирование; изменение показателя преломления; поверхностный слой; ниобат лития; лазерная интерферометрия.

Formation of diffractive optical structures in surface-doped lithium niobate crystals using the point-by-point inducing method

A. D. Bezpaly, A. E. Mandel, V. I. Bykov

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation,
e-mail: aleksandr.bezpalyi@tusur.ru*

The possibilities of diffractive optical structures formation in lithium niobate crystals surface-doped with copper ions were investigated. Diffractive optical structures were formed with different characteristics by the method point-by-point laser inducing the refractive index changes using radiation with the wavelength of 532 nm. The results of diffraction on formed structures with intensity of the first diffractive maximum exceeding the zero-order maximum by several times are demonstrated.

Keywords: diffractive structures; point-by-point inducing; refractive index change; surface layer, lithium niobite; laser inteferometry.

Введение

В настоящее время разработка и применение дифракционных оптических элементов является перспективным направлением развития лазерной физики [1]. Эти элементы способны управлять амплитудой, фазой и поляризацией проходящего через них светового излучения и являются неотъемлемой частью современных гибридных и полностью оптических систем и устройств фотоники [1–4].

Материалами, на основе которых можно создавать дифракционные структуры являются электрооптические кристаллы, в группу которых входит ниобат лития (LiNbO_3) [2, 5, 6]. На сегодняшний день известно несколько способов создания дифракционных оптических элементов как в ниобате лития, так и в других материалах – это лазерные методы формирования, фотолитография, вырезание механическими способами, ионная имплантация и др. [3–8]. В последние годы

активно исследуется способ формирования дифракционных структур при помощи направленной лазерной записи как в объеме, так и на поверхности кристалла [5, 6, 9, 10]. Создание реконфигурируемых дифракционных структур в кристаллах ниобата лития при помощи лазерного излучения может быть основано на механизмах фоторефрактивного эффекта [5, 6, 9].

Целью данной работы является исследование формирования и характеристик дифракционных оптических структур лазерным излучением в поверхностно легированных медью кристаллах LiNbO_3 .

1. Формирование дифракционных оптических структур

Дифракционные оптические структуры формировались за счет фоторефрактивного эффекта в кристаллическом образце ниобата лития X-среза с размерами $1,25 \times 10 \times 14 \text{ мм}^3$ по осям X, Y и Z, соответственно. Пластина LiNbO_3 термически легировалась ионами меди (Cu). Пленка из Cu наносилась на поверхность подложки методом вакуумного напыления. Термодиффузия проводилась на воздухе в течение 10 часов при температуре 900°C . Толщина поверхностного слоя в образце составляла величину порядка 600 мкм.

Экспериментальная установка для формирования дифракционных структур состояла из непрерывного источника лазерного излучения, линейного позиционера, механического затвора, микрообъектива и анализатора лазерного излучения. В качестве источника излучения использовался непрерывный YAG:Nd^{3+} лазер с удвоением частоты ($\lambda = 532 \text{ нм}$). Световой пучок от источника излучения фокусировался микрообъективом с увеличением $10\times$ на поверхность YZ подложки $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$, размещенной на подвижной платформе. Диаметр светового пятна на поверхности образца составлял не более 50 мкм. Подвижная платформа представляла собой микрометрический позиционер, позволяющий перемещать образец относительно экспонирующего пучка с точностью до 5 мкм.

Формирование дифракционных структур проводилось путем последовательного поточечного облучения поверхности экспериментального образца. Для прерывания процесса засветки кристалла излучение лазера перекрывалось механическим затвором. Время засветки одним световым пятном составляло от 1 до 5 секунд. Затем образец перемещался на расстояние от 25 до 100 мкм, после чего экспозиция его поверхности возобновлялась. Таким образом, были сформированы дифракционные структуры в виде точек, отдельно отстоящих друг от друга на различных расстояниях вдоль осей Y и Z кристалла.

Распределение изменений показателя преломления Δn в областях сформированных структур исследовались при помощи метода лазерной интерферометрии. Интерференционные изображения в области сформированных дифракционных структур были получены при помощи интерферометра Маха-Цендера. Источником излучения в интерферометре являлся He-Ne лазер с поляризацией, соответствующей необыкновенной волне кристалла. Полученные интерферограммы до и после формирования дифракционных структур фиксировались анализатором лазерного излучения. Обработка интерферограмм и расчет пространственного распределения Δn_e проводились в программе «Визуализатор волнового фронта» [11].

Пример интерференционного изображения в области сформированной структуры и профиль распределения $\Delta n_e(z)$ приведены на рис. 1.

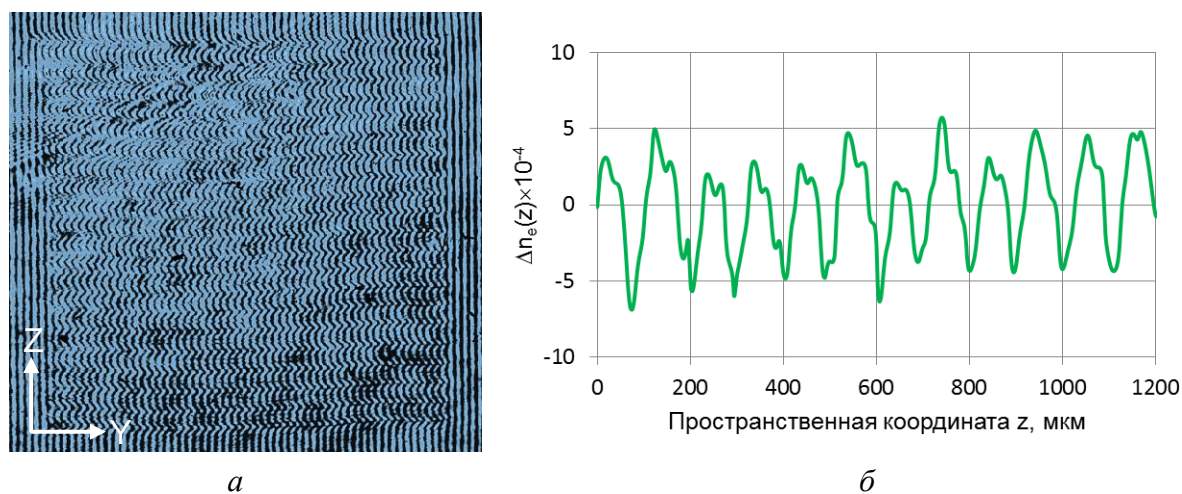


Рис. 1. Результат сформированной дифракционной структуры: *а* – интерференционное изображение в области наведенных изменений показателя преломления; *б* – профиль распределения $\Delta n_e(z)$

Рисунок 1 показывает, что полученный в процессе экспонирования кристалла профиль $\Delta n_e(z)$ имеет разницу между положительными и отрицательными изменениями показателя преломления порядка 10^{-3} . При увеличении времени экспонирования экспериментального образца излучением YAG:Nd³⁺ лазера с $\lambda = 532$ нм и поляризацией, направленной вдоль оптической оси Z кристалла, изменения показателя преломления Δn_e достигали величины вдвое большей, чем представлено на рис. 2, *б*. Это повлияло на результаты исследования дифракции на сформированных дифракционных структурах, представленных в разд. 2.

2. Исследование дифракции на сформированных структурах

Для исследования дифракции на сформированные структуры направлялось коллимированное излучение He-Ne лазера. Анализ дифракции световых полей проводился путем измерения интенсивности дифракционных максимумов в дальней зоне. В качестве измерителя мощности использовался прибор Thorlabs PM100D. Полученные дифракционные картины показали, что пространственно-периодическая модуляция показателя преломления в наведенной структуре приводит к различной форме дифракционных изображений в дальней зоне.

На рис. 2 приведены изображения дифракционных полей в дальней зоне, полученных на структурах, индуцированных с шагом 25 мкм вдоль оси Y и 100 мкм вдоль оси Z . Размеры дифракционных структур составили 2×2 мм², а время формирования – 1700 с и 3400 с, соответственно.

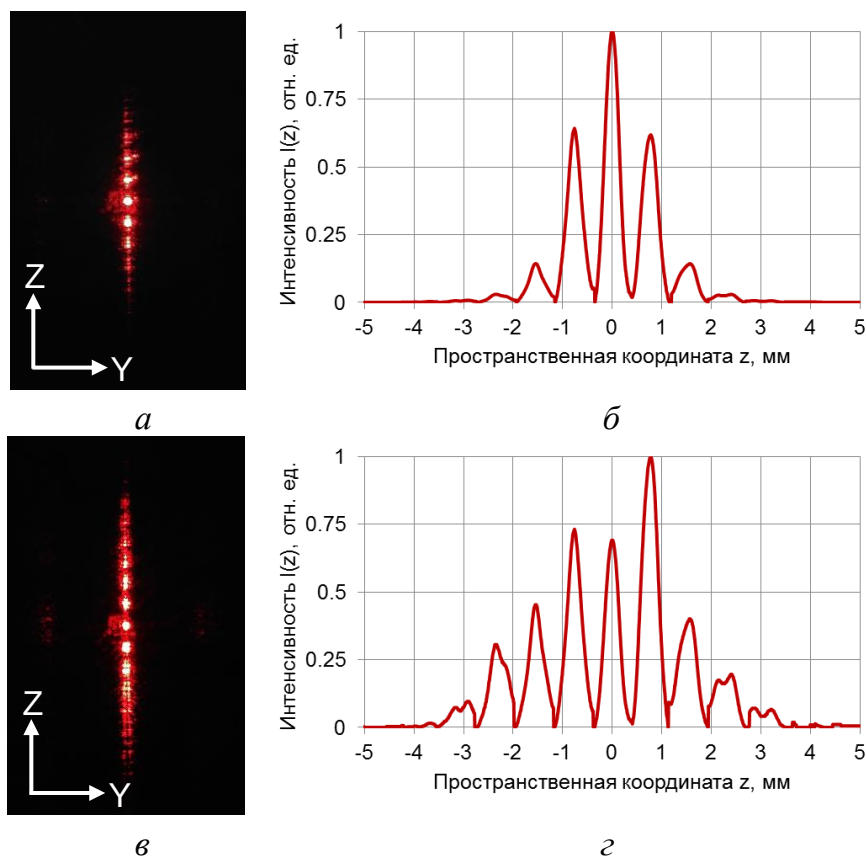


Рис. 2. Изображения дифракционных полей в дальней зоне, полученные на дифракционных структурах, сформированных: *а* – 1-секундным экспонированием; *б* – 2-секундным экспонированием; *б* и *з* – профили распределения интенсивности

Эффективность дифракционных максимумов η в экспериментах рассчитывалась по формуле [12]:

$$\eta = \frac{I_{\partial_n}}{I_{np} + I_{\partial}}, \quad (1)$$

где I_{∂_n} – интенсивность n -го дифракционного максимума; I_{np} – интенсивность основного прошедшего максимума; I_{∂} – суммарная интенсивность дифракционных максимумов.

В экспериментах на полученных структурах были зарегистрированы дифракционные максимумы 1-го порядка с эффективностью η от 18 % до 25 % вдоль оси Z кристалла (рис. 2, *б* и 2, *з*). Наличие дифракционных максимумов с низкой величиной $\eta \approx 0,3$ % вдоль оси Y кристалла связана с тем, что распределение изменений показателя в продольном направлении близко к однородному. С увеличением шага экспонирования вдоль оси Y кристалла до 60 мкм эффективность дифракционных максимумов 1-го порядка увеличивается до $\eta \approx 6,5\%$, и появляются дифракционные максимумы 2-го порядка.

Подобные структуры были получены в поверхностно легированном медью кристалле ниобата лития Y -среза. Шаг экспонирования при формировании данных структур составлял 60 мкм и 70 мкм вдоль осей X и Z экспериментального

образца, соответственно. Анализ дифракционных картин в дальней зоне на полученных структурах показал, что интенсивность дифракционных максимумов первого порядка может превышать интенсивность основного максимума до 10 раз.

Заключение

Полученные нами результаты свидетельствуют о возможности формирования методом поточечного индуцирования в поверхностно легированных кристаллах ниобата лития X- и Y-срезов дифракционных структур с различными характеристиками. Поточечное индуцирование позволяет изменять показатель преломления Δn_e в экспериментальных образцах на величину порядка 10^{-3} . Изменение условий формирования дифракционных структур позволило варьировать эффективностью дифракционных максимумов первых порядков и с превышением интенсивности основного до 10 раз.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации программы развития ТУСУР на 2021–2030 годы в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (подпроект №8 «Пр2030-Наука СЧ/СП1/Б/8»).

Библиографические ссылки

1. Дифракционные элементы в оптических системах среднего и двойного ИК-диапазона / Г. И. Грейсух [и др.] // Фотоника. 2020. Т. 14, № 2. С. 160–169.
2. Qi Y., Li Yang. Integrated lithium niobate photonics // Nanophotonics. 2020. Vol. 9, No 6. P. 1287–1320.
3. Сойфер В. А. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники / В. А. Сойфер, В. В. Котляр, Л. Л. Досколович // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33, № 4. С. 352–368.
4. Direct Laser Writing of Diffractive Structures on Bi-Layer Si/Ti Films Coated on Fused Silica Substrates / D. A. Belousov [et al.] // Photonics. 2023. Vol. 10, iss. 7. 771. P. 1–14.
5. Local Photorefractive Modification in Lithium Niobate Using Ultrafast Direct Laser Write Technique / D. Paipulas [et al.] // JLMN-Journal of Laser Micro. Nanoengineering. 2016. Vol. 11, No 2. P. 246–252.
6. Direct Laser Writing: Versatile Tool for Microfabrication of Lithium Niobate / V. Mizeikis [et al.] // Journal of Laser Micro Nanoengineering. 2012. Vol. 7, No. 3. P. 345–350.
7. Laser technologies in micro-optics. Part 1. Fabrication of diffractive optical elements and photomasks with amplitude transmission / V. P. Veiko [et al.] // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2017. Vol. 53, No. 5. P. 474–483.
8. Fabrication of hybrid optical line generator by direct machining. / T. Saastamoinen [et al.] // Opt. Express. 2018. Vol. 26, No. 3. P. 2335–2340.
9. Photorefractive direct laser writing / L. Vittadello [et. al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. P. 125103-1–125103-9.
10. Laser-writing inside uniaxially birefringent crystals: fine morphology of ultrashort pulse-induced changes in lithium niobate / P. Karpinski [et al.] // Optics Express. 2016. Vol. 24, No. 7. P. 7456–7476.
11. Визуализатор волнового фронта: свид. 2021661646 Рос. Федерация. №2021660493/69 / А. Д. Безпальй, В. В. Капустин, А. Е. Мандель; заявл. 07.07.2021; опубл. 14.07.2021. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: <https://fips.ru/EGD/8370d7dd-4cbb-4092-85b3-a68a2cd95ab1>
12. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах: монография / С. М. Шандаров [и др.]. Томск: ТУСУР, 2012. 242 с.