

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЛЕГИРОВАННЫХ МЕДЬЮ КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

© 2013 К.М. Мамбетова, С.М. Шандаров

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Поступила в редакцию 26.11.2013

Представлены результаты исследований динамики формирования поля пространственного заряда фоторефрактивной голограммы двумя лазерными пучками с длиной волны 532 нм в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, имеющих X -ориентацию. Из данных по дифракционной эффективности голограмм, регистрируемой лазерным пучком с длиной волны 655 нм, получено, что амплитуда первой пространственной гармоники электрического поля голограммы в образцах, полученных диффузионным легированием, может достигать значений, превышающих 17 кВ/см.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, фоторефрактивный эффект, фотогальванический эффект, эмиссия электронов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сильные электрические поля, формируемые в легированных фотовольтаически активными примесями (Fe, Cu) кристаллах ниобата лития, являются потенциальной основой для создания компактных кристаллических ускорителей, реализующих генерацию электронных пучков и мягкого рентгеновского излучения [1] и оптически управляемую манипуляцию микро- и наночастицами [2]. В работе [3] продемонстрирована возможность создания легированных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, имеющих толщину до 1 мм, методом высокотемпературной диффузии меди из металлических пленок. Для формирования пространственно неоднородных электрических полей в таких образцах и их исследования может быть использован метод записи фоторефрактивных голограмм коротковолновым лазерным излучением и брэгговской дифракции на них лазерного пучка с большей длиной волны, имеющего малую интенсивность и не вносящего заметных возмущений в процессы фотоиндуцированного перераспределения зарядов.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по диффузионному легированию медью пластин LiNbO_3 , имеющих X -ориентацию, и по динамике формирования в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с различным уровнем легирования поля пространственного заряда фоторефрактивной голограммы двумя лазерными пучками с дли-

ной волны 532 нм. Из данных по динамике дифракционной эффективности при считывании голограммы лазерным пучком с длиной волны 655 нм получено, что в исследованных образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, имеющих толщину до 2 мм, амплитуда первой гармоники поля пространственного заряда достигает значений 20 кВ/см.

2. ТЕХНОЛОГИЯ ДИФФУЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

В экспериментах по диффузионному легированию использовались оптически полированные пластины X -среза из конгруэнтного ниобата лития, имеющие толщину $d = 1,8$ мм. Пленки Cu наносились на пластины методом магнетронного распыления и имели толщину от 100 до 900 нм. Далее осуществлялся нагрев образца со скоростью 340 К/час до температуры 1000 °С в трубчатой электропечи и проводилась диффузия, с продолжительностью при данной температуре от 2 до 20 часов и с последующим естественным охлаждением за время ~12 час. Полученные диффузией образцы $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ приобретали светлокоричневую окраску и дополнительное оптическое поглощение, обусловленное центрами Cu^{2+} и Cu^+ . Концентрация ионов Cu^{2+} и Cu^+ оценивалась из известных соотношений [3] по величине оптического поглощения на длинах волн 477 и 1040 нм. Параметры процесса диффузии для сформированных образцов 1–4 приведены в табл. 1. Здесь же приведены значения концентраций центров Cu^{2+} и Cu^+ как для образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ 1–4, так для образца 5 с традиционным способом легирования путем добавления CuO в исходную шихту, имеющего толщину $d = 2,0$ мм. В последнем столбце таблицы приведены значения коэффициента поглощения исследованных образ-

Мамбетова Ксения Мустафиевна, аспирант, младший научный сотрудник кафедры электронных приборов.

E-mail: kseniam-89@mail.ru

Шандаров Станислав Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных приборов.

E-mail: stanislavshandarov@gmail.com

Таблица 1. Параметры исследованных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Номер образца	Толщина пленки Cu, нм	Время диффузии, час	Концентрация ионов меди C_{Cu^+} , $\text{м}^{\text{г}}$	Концентрация ионов меди $C_{\text{Cu}^{2+}}$, $\text{м}^{\text{г}}$	Коэффициент поглощения $\alpha_0^{532\text{нм}}$ для $\lambda_w=532\text{ нм}$, см^{-1}
1	100	2	7.961×10^{-22}	8.709×10^{-22}	0,063
2	200	3	2.052×10^{-23}	1.398×10^{-24}	0,615
3	260	20	7.85×10^{-23}	6.04×10^{-24}	0,88
4	900	9	6.06×10^{-24}	2.83×10^{-25}	7,9
5				7.862×10^{-25}	29,341

цов на длине волны записывающего излучения $\lambda_w = 532\text{ нм}$.

Анализ приведенных в табл. 1 данных показывает, что используемая технология диффузионного легирования подложек конгруэнтного ниобата лития позволяет получать образцы $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с толщиной до 1,8 мм с регулируемой концентрацией меди.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В экспериментальной установке для исследования формирования фоторефрактивных голограмм в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза, схема которой представлена на рис. 1, использовался световой пучок одночастотного твердотельного лазера Л1 с длиной волны $\lambda_w = 532\text{ нм}$, мощностью $P_0 = 40\text{ мВт}$ и вектором поляризации, ортогональным плоскости рисунка (плоскости XZ кристалла). После коллиматора КЛ он имел апертуру 4 мм и расщеплялся делительным кубом СК на два пучка с равными значениями интенсивности $I_{p1} = I_s = 390\text{ мВт/см}^2$, которые с помощью призмы П сводились под углом $2\Theta_B^{\text{green}} = 12,5^\circ$ в ис-

следуемом образце симметрично относительно нормали к его входной грани. В этом случае формируемая ими интерференционная картина характеризуется вектором решетки \mathbf{K} , параллельным полярной оси Z кристалла, и имеет пространственный период $\Lambda = 2,44\text{ мкм}$. В результате в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ за счет индуцированного обыкновенными волнами пространственного перераспределения носителей заряда вследствие фотогальванического эффекта и модуляции обыкновенного показателя преломления, обусловленной линейным электрооптическим эффектом, записывается фоторефрактивная голограмма.

Регистрация фоторефрактивной голограммы осуществлялась методом брэгговской дифракции светового пучка, распространяющегося в той же плоскости, что и записывающие пучки (см. рис. 1). Считывающий пучок с длиной волны $\lambda_r = 655\text{ нм}$, излучаемый лазерным диодом Л2 с выходной мощностью $P_{ir} = 6\text{ мВт}$, имел вектор поляризации, также ориентированный перпендикулярно плоскости XZ кристалла, возбуждая в нем обыкновенную волну. При этом угол падения считывающего луча на входную грань об-

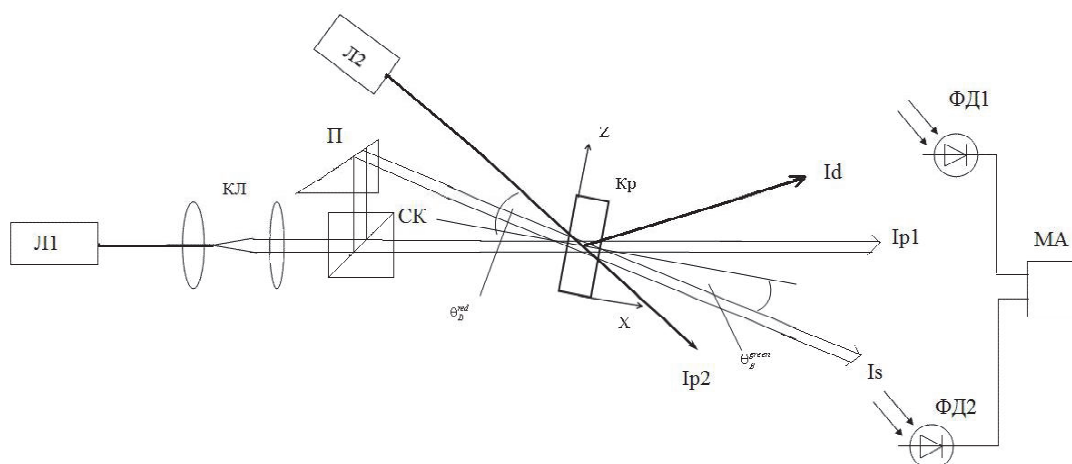


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

разца выбирался равным углу Брэгга $\Theta_B^{red} = 7,7^\circ$ для излучения с используемой длиной волны 655 нм и объемной фазовой решетки с пространственным периодом 2,44 мкм. Временные зависимости мощности прошедшего через исследуемый образец считывающего пучка с интенсивностью $I_{p2}(t)$ и пучка с интенсивностью $I_d(t)$, дифрагированного на записываемой решетке, фиксировались с помощью фотодиодов ФД1 и ФД2 и системы обработки данных МА.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Характерные экспериментальные временные зависимости для мощностей прошедшего через голограмму считывающего пучка $P_{p2}(t)$ и дифрагированного пучка $P_d(t)$, полученные для образцов № 3 и № 5 (см. табл. 1), представлены на рис. 2, а и 2, б, соответственно.

Отметим, что скорость роста дифракционной эффективности данных голограмм, определяемой как $\eta(t) = P_d(t) / (P_{p2}(t) + P_d(t))$ и представленной на рис. 3, для образца № 5 с максимальным уровнем легирования существенно выше, чем в образце № 3.

С использованием известных соотношений [4] временная эволюция амплитуды первой пространственной гармоники поля пространственного заряда может быть выражена через дифракционную эффективность $\eta(t)$ в следующем виде

$$E_m(t) = -\frac{2\lambda_r \cos\theta_B^{red\ in}}{\pi d n_0^3 r_{eff}} \arcsin \sqrt{\eta(t)},$$

где $\theta_B^{red\ in}$ – угол Брэгга для считывающего пучка внутри образца, а n_0 и r_{eff} – обыкновенный показатель преломления и эффективная электрооптическая постоянная, учитывающая дополнительный пьезоэлектрический вклад в фоторефрактивный отклик. Результаты расчета зависимостей $E_m(t)$ из приведенных выше данных представлены на рис. 4.

Как следует из рисунка, амплитуда поля пространственного заряда в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 3, полученном диффузионным легированием, достигает значения 17,4 кВ/см за время, составляющее около 2000 с. Для кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 5 с традиционным способом легирования при используемых условиях формирования фоторефрактивных голограмм время достижения макси-

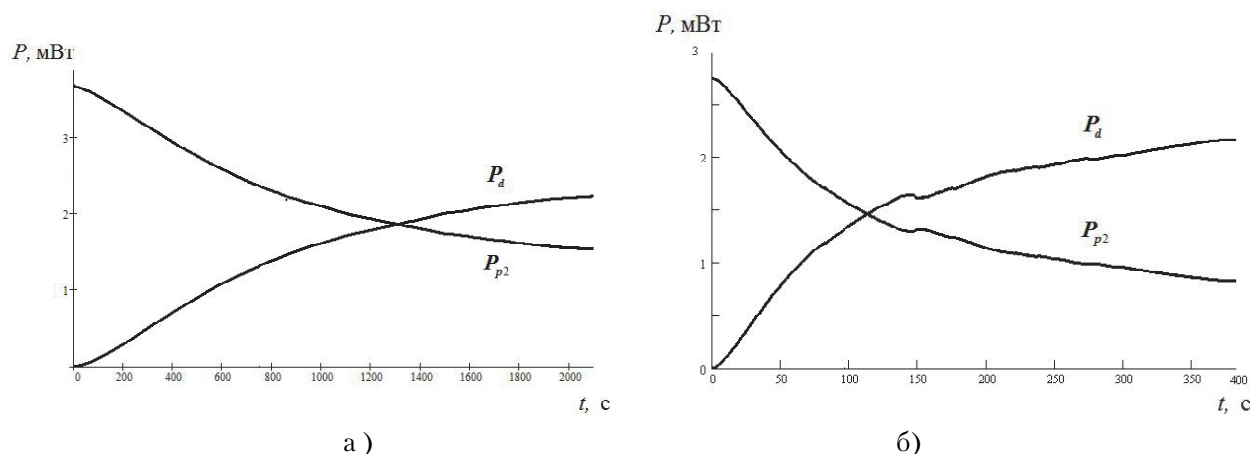


Рис. 2. Экспериментальные временные зависимости мощностей прошедшего (P_{p2}) и дифрагированного (P_d) пучков с длиной волны 655 нм, считывающих динамические фоторефрактивные голограммы, формируемые записывающими лазерными пучками с длиной волны 532 нм в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 3 (а) и № 5(б)

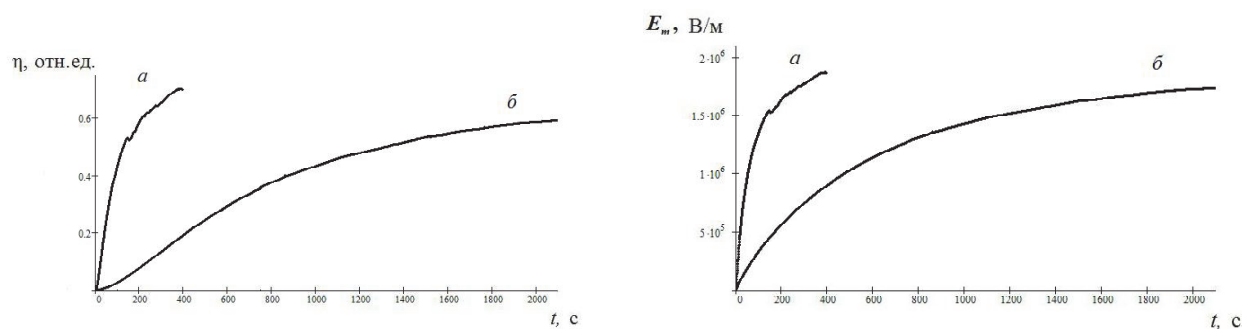


Рис. 3. Временные зависимости дифракционной эффективности для фоторефрактивных голограмм в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 5 (а) и № 3(б)

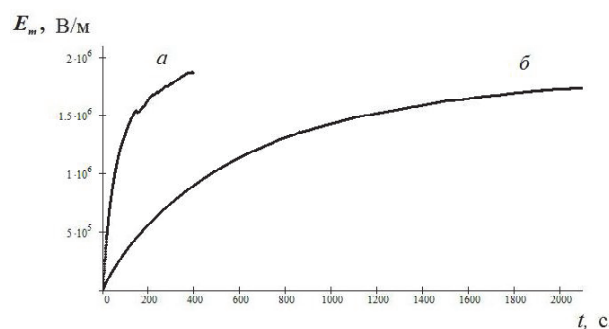


Рис. 4. Динамика роста амплитуды поля пространственного заряда фоторефрактивных голограмм в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 5 (а) и № 3(б)

мального значения амплитуды электрического поля, равного 18,7 кВ/см, составляет около 400 с.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в настоящей работе эксперименты показали, что технология диффузионного легирования подложек конгруэнтного ниобата лития позволяет получать образцы $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза с толщиной до 1,8 мм с регулируемой путем варьирования параметров технологического процесса концентрацией меди. Фоторефрактивные характеристики и фотовольтаические свойства этих образцов могут быть изучены по брэгговской дифракции считывающего пучка с длиной волны из красной области видимого спектра на объемных фазовых голограммах, формируемых коротковолновым лазерным излучением. Из данных по дифракционной эффективности голограмм, регистрируемой лазерным пучком с длиной волны 655 нм, получено, что амплитуда первой пространственной гармоники электрического поля голограммы в образцах, полученных диффузионным легированием, может достигать зна-

чений, превышающих 17 кВ/см. Это делает возможным их использование для практической реализации кристаллических ускорителей электронов, компактных генераторов рентгеновского излучения и оптических пинцетов.

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ на 2013 год (проект 7.2647.2011) и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-02-90038-Бел_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pyroelectric and photogalvanic crystal accelerators / N.V. Kukhtarev, T.V. Kukhtereva, G. Stargell, J.C. Wang // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. P. 014111.
2. Optical trapping and manipulation of metallic micro/nanoparticles via photorefractive crystals / X. Zhang, J. Wang, B. Tang, X. Tan, R.A. Rupp, L. Pan, Y. Kong, Q. Sun, J. Xu. // Opt. Express, 2009. V. 17. Pp. 9981-9988.
3. Photorefractive properties of LiNbO_3 crystals doped by copper diffusion / J. Hukriede, K. Buse, E. Krätzig // Phys. Rev. B, 2001, v. 61, p. 4615- 4620.
4. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах / В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. Томск: ТУСУР, 2007, 242 с.

INVESTIGATION OF THE FORMATION OF STRONG ELECTRIC FIELDS IN THE COPPER-DOPED LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

© 2013 K.M. Mambetova, S.M. Shandarov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

The results of investigations for the formation dynamics of space charge field of a photorefractive hologram by two laser beams with a wavelength of 532 nm in the X-cut $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ crystals are presented. From the data on the diffraction efficiency of holograms readable by a laser beam with a wavelength of 655 nm, it was found that the amplitude of the first spatial harmonics of the electric field of the hologram in the samples obtained by the diffusion doping can reach the values exceeding 17 kV / cm.

Key words: ferroelectric, photorefractive effect, electron emission, photovoltaic effect.

Ksenia Mambetova, Graduate Student, Associate Research Fellow at the Electronic Devices Department.

E-mail: kseniam-89@mail.ru

Stanislav Shandarov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head at the Electronic Devices Department.

E-mail: stanislavshandarov@gmail.com