

УДК 535.3

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОПУСКАЮЩИХ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕДЬЮ МЕТОДОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИФФУЗИИ

*К. М. Мамбетова *, Н. Н. Смаль, С. М. Шандаров, Л. Н. Орликов, С. И. Арестов,
С. В. Смирнов*

Томский госуниверситет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Представлены результаты экспериментальной реализации технологии диффузионного легирования медью конгруэнтных кристаллов ниобата лития X-среза и исследования их фоторефрактивных и фотовольтаических характеристик. Последнее было выполнено методом брэгговской дифракции считывающего пучка с длиной волны 655 нм на динамических объёмных фазовых пропускающих голограммах, записываемых лазерными пучками с длиной волны 532 нм. Показано, что по фотогальваническим характеристикам полученные образцы, имеющие толщину 1,8 мм, близки к монокристаллам, легированным традиционным способом, т. е. путём добавления в исходную шихту монооксида меди.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата лития сильных электрических полей за счёт пьезоэлектрического и фотогальванического эффектов открывает возможности для создания на их основе компактных кристаллических ускорителей электронных пучков, используемых, в том числе, для генерации рентгеновского излучения [1], и оптически управляемых манипуляторов микро- и наночастицами (оптических пинцетов [2–5]). Достижимые значения напряжённости электрического поля при фотовольтаическом механизме его формирования могут варьироваться в широких пределах путём легирования ниобата лития фоторефрактивными и нефоторефрактивными примесями [6]. Наибольшие значения фотовольтаических полей ($50 \div 100$ кВ/см) наблюдаются при легировании монокристаллов LiNbO_3 ионами Fe и Cu [6, 7], значительно увеличивающими его фоторефрактивную чувствительность, определяемую отношением скорости роста амплитуды модуляции показателя преломления фоторефрактивной голограммой Δn на начальном участке её формирования к амплитуде модуляции интенсивности [8]. Как показано в работе [9], в случае $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$ пригодные для записи фоторефрактивных голограмм образцы с толщиной около 1 мм и с общей концентрацией меди от $5,3 \cdot 10^{24}$ до $1,45 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$ могут быть получены методом диффузионного легирования.

Диффузионное легирование позволяет управлять фотовольтаическими и фотопроводящими параметрами образцов в значительных пределах [9], что делает возможным оптимизацию условий оптически управляемого формирования в них сильных электрических полей методами динамической голографии. Для практической реализации кристаллических ускорителей и оптических пинцетов необходимо, чтобы электрическое поле в таких образцах было большим и на их границах с окружающей средой. Как показано в работе [10] для образцов X-среза LiNbO_3 с фотогальваническим механизмом формирования фоторефрактивных голограмм, это имеет место при диэлектрическом характере граничащей с ними среды. Благодаря линейному электрооптическому эффекту анализ формируемых в таких образцах электрических полей, распределение

* kseniam-89@mail.ru

которых определяется координатной зависимостью интенсивности интерференционного светового поля, может быть проведён с использованием дифракции света на соответствующей объёмной фазовой голограмме [7–9].

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по диффузионному легированию медью пластин LiNbO_3 , имеющих X -ориентацию, и по динамике формирования в них поля пространственного заряда фоторефрактивной голограммы двумя лазерными пучками с длиной волны 532 нм. Из данных по динамике дифракционной эффективности при считывании голограммы лазерным пучком с длиной волны 655 нм установлено, что в созданных с помощью диффузии образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, находящихся в воздушной среде при атмосферном давлении, амплитуда поля пространственного заряда достигает значений 30 кВ/см.

1. ТЕХНОЛОГИЯ ДИФФУЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

В экспериментах использовались оптически полированные пластины X -среза из конгруэнтного ниобата лития, имеющие размеры $1,8 \times 9,0 \times 23,7$ мм по осям x , y и z соответственно. До нанесения на них плёнок Cu были измерены спектры оптического пропускания этих образцов в диапазоне $320 \div 1100$ нм с помощью спектрофотометра GENESYS 2. Плёнки Cu наносились на оптически полированную поверхность пластины методом магнетронного распыления и имели толщину от 100 до 900 нм. Далее осуществлялся нагрев образца со скоростью 340 К/ч до температуры 1000°C в трубчатой электропечи на карбидокремниевых нагревателях. Диффузия происходила при данной температуре в течение интервала времени от 2 до 20 часов, с последующим естественным охлаждением за время порядка 12 ч. Все операции по отжигу образцов проводились в воздушной атмосфере. После диффузии остатки плёнки удалялись с пластин оптической полировкой. Параметры процесса диффузии для четырёх сформированных образцов приведены в табл. 1.

Полученные образцы $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ имели равномерную светло-коричневую окраску и оптическое пропускание в диапазоне от 430 нм, уменьшенное по сравнению с исходными из-за примесного поглощения центрами Cu^{2+} и Cu^+ . Из измерений пропускания рассчитывались спектральные зависимости коэффициента поглощения образцов α_o^λ для излучения, соответствующего обыкновенным (о) волнам, вектор поляризации которых в образце X -среза ориентирован вдоль кристаллофизической оси y . Это позволило оценить концентрацию в образцах ионов Cu^{2+} и Cu^+ , перезарядка которых и определяет фотовольтаические и фотопроводящие свойства легированных медью кристаллов ниобата лития, по приведённым в [9] соотношениям

$$c_{\text{Cu}^+} = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \alpha_o^{477\text{нм}}, \quad c_{\text{Cu}^{2+}} = 6,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2} \alpha_o^{1040\text{нм}}, \quad (1)$$

по величине оптического поглощения на длинах волн 477 и 1040 нм. Найденные таким образом концентрации центров Cu^{2+} и Cu^+ , а также коэффициент оптического поглощения на длине волны 532 нм для сформированных диффузионным легированием образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ приведены в табл. 1.

Анализ полученных данных (табл. 1) показывает, что используемая нами 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 путём варьирования параметров технологического процесса концентрацией меди.

Таблица 1. Параметры сформированных диффузионным легированием на подложках X-среза образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$

Номер образца	Толщина плёнки Cu, нм	Время диффузии, ч	Концентрация ионов меди c_{Cu^+} , м^{-3}	Концентрация ионов меди $c_{\text{Cu}^{2+}}$, м^{-3}	Коэффициент поглощения $\alpha_o^{532\text{нм}}$ для $\lambda_w = 532 \text{ нм}$, см^{-1}
1	100	2	$7,961 \cdot 10^{22}$	$8,709 \cdot 10^{22}$	0,063
2	200	3	$2,052 \cdot 10^{23}$	$1,398 \cdot 10^{24}$	0,615
3	260	20	$7,850 \cdot 10^{23}$	$6,040 \cdot 10^{24}$	0,880
4	900	9	$6,060 \cdot 10^{24}$	$2,830 \cdot 10^{25}$	7,900

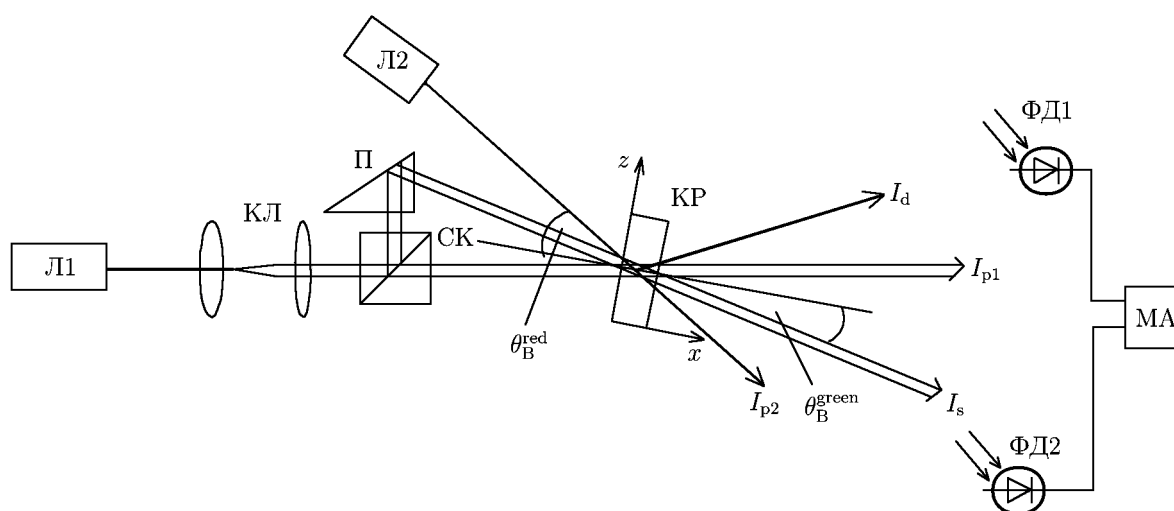


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки для исследования формирования фоторефрактивных голограмм в полученных диффузионным легированием образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза представлена на рис. 1. Луч света от одночастотного твёрдотельного лазера Л1 с длиной волны $\lambda_w = 532 \text{ нм}$, мощностью $P_0 = 40 \text{ мВт}$ и вектором поляризации, ортогональным плоскости рисунка (т. е. плоскости xz кристалла), имеющий после коллиматора КЛ апертуру 4 мм, расщепляется светоделительным кубом СК на два пучка с равными значениями интенсивности $I_{p1} = I_s = 390 \text{ мВт/см}^2$. Эти пучки с помощью призмы П сводились под углом $2\theta_B^{\text{green}} = 12,5^\circ$ (θ_B^{green} — угол Брэгга для излучения с длиной волны 532 нм) в исследуемом образце КР симметрично относительно нормали к его входной грани. Формируемая ими при этом интерференционная картина характеризуется параллельным полярной оси z вектором решётки $\mathbf{K}$ и имеет пространственный период $\Lambda = 2\pi/|\mathbf{K}| = 2,44 \text{ мкм}$. В данном случае фоторефрактивная голограмма в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ записывается обыкновенными волнами за счёт пространственного перераспределения носителей заряда вследствие фотогальванического эффекта и модуляции обыкновенного показателя преломления, обусловленной линейным электрооптическим эффектом.

Считывание фоторефрактивной голограммы в процессе её формирования осуществлялось методом брэгговской дифракции светового пучка с длиной волны $\lambda_r = 655 \text{ нм}$, излучаемого лазерным диодом Л2 с выходной мощностью $P_{\text{Л}} = 6 \text{ мВт}$ и распространяющегося в той же плоскости

(рис. 1), что и записывающие пучки. Вектор поляризации считывающего луча также ориентировался перпендикулярно этой плоскости, возбуждая в кристалле обыкновенную волну. Встроенная в корпус лазерного диода Л2 линза подстраивалась таким образом, чтобы угловая расходимость излучаемого им пучка в плоскости xz образца была минимальной. При этом угол падения считывающего луча на его входную грань выбирался равным углу Брэгга $\theta_B^{\text{red}} = 7,7^\circ$ для излучения с используемой длиной волны 655 нм и голографической решётки с пространственным периодом $\Lambda = 2,44$ мкм, а его точная подстройка осуществлялась по максимуму интенсивности I_d дифрагированного пучка при юстировке установки. Временные зависимости мощности прошедшего через исследуемый образец считывающего пучка с интенсивностью $I_{p2}(t)$ и пучка с интенсивностью $I_d(t)$, дифрагировавшего на записываемой решётке, фиксировались с помощью фотодиодов ФД1 и ФД2 и системы обработки данных МА, включающей два цифровых микроамперметра типа В7-40/1, интерфейс и персональный компьютер.

Перед каждым экспериментом исследуемые образцы подвергались отжигу при температуре 190°C для стирания записанных в них ранее фоторефрактивных голограмм. Включению записывающих голограмму пучков I_{p1} и I_s в момент времени $t = 0$ предшествовало включение считывающего пучка I_{p2} ; временные интервалы между отсчётами мощностей пучков $P_{p2}(t)$ и $P_d(t)$ составляли 0,1 с.

Следует отметить, что считывающее излучение с $\lambda_r = 655$ нм оказывает слабое влияние на формирование фоторефрактивных голограмм записывающими пучками с $\lambda_w = 532$ нм вследствие сильного уменьшения фотовольтаических постоянных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с длиной волны [7].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характерные экспериментальные временные зависимости для мощностей прошедшего через голограмму считывающего пучка $P_{p2}(t)$ и дифрагировавшего пучка $P_d(t)$, полученные для образца № 4 (см. табл. 1), представлены на рис. 2. На начальном участке, после включения записывающих пучков в момент времени $t = 0$, интенсивность дифрагировавшего пучка растёт со временем по квадратичному закону, что может быть использовано для определения фотовольтаической постоянной β_{31} исследуемого образца [11]. Далее, в течение около 25 с, наблюдается участок её быстрого роста, а при $t > 400$ с происходит почти полная перекачка мощности считывающего пучка в дифрагировавший.

Кинетика роста дифракционной эффективности формируемой объёмной фазовой голограммы для описанного выше эксперимента с образцом № 4, определяемая, как и в работе [9], соотношением

$$\eta(t) = \frac{P_d(t)}{P_{p2}(t) + P_d(t)}, \quad (2)$$

представлена точками на рис. 3 для всей исследованной временной области, а также на рис. 4 для её начального участка. Из рис. 3 следует, что в образце № 4 достигается дифракционная эффективность фоторефрактивной голограммы 94 %, а для записи голограммы с $\eta = 10$ %, при используемых световых пучках с длиной волны 532 нм и интенсивностью 390 мВт/см² каждый, требуется 5 с.

Сплошная кривая на рис. 4 представляет собой аппроксимацию (по методу наименьших квадратов) экспериментальной временной зависимости дифракционной эффективности фоторефрактивной голограммы на её начальном этапе функцией

$$\eta_{\text{in}}(t) = bt^2 + ct^3 \quad (3)$$

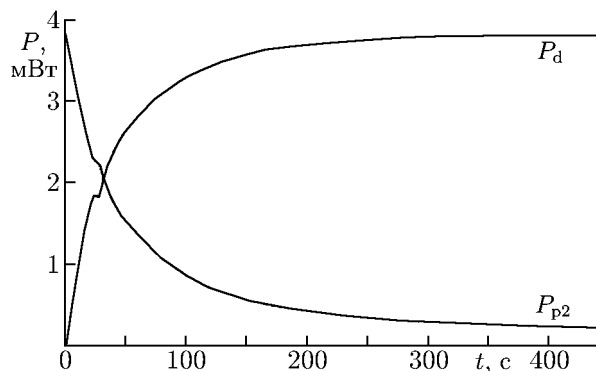


Рис. 2. Экспериментальные временные зависимости мощностей прошедшего (P_{p2}) и дифрагировавшего (P_d) пучков с длиной волны 655 нм, считающих динамическую фоторефрактивную голограмму, формируемую записывающими лазерными пучками с длиной волны 532 нм в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 4

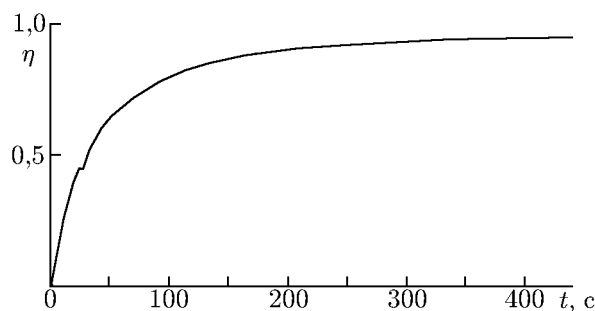


Рис. 3. Временная зависимость дифракционной эффективности, рассчитанная с помощью формулы (2) для динамической фоторефрактивной голограммы в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 4 по экспериментальным данным, представленным на рис. 2

с коэффициентами $b = 8,95 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-2}$ и $c = -10,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-3}$. Используя приведённые в [11, 12] соотношения для временной зависимости дифракционной эффективности голограммы при фотогальваническом механизме её формирования, для $\eta(t) \ll 1$ и интервала времени, малого по сравнению с временем максвелловской релаксации, коэффициент b находится с помощью формулы

$$b = \left(\frac{2\pi}{\lambda_r} \frac{n_o^3 d}{\cos \gamma} \frac{r_{\text{eff}}}{\varepsilon_{\text{eff}}} \beta_{31} \right)^2 I_{p1} I_s, \quad (4)$$

где n_o и d — обыкновенный показатель преломления и толщина образца и γ — угол между считывающим и дифрагировавшим лучами в кристалле. В эффективных параметрах голограммы в формуле (4), электрооптической постоянной для дифракции обыкновенных волн и диэлектрической проницаемости учитывается дополнительный пьезоэлектрический вклад. С использованием известных соотношений [13] они могут быть записаны в виде $r_{\text{eff}} = r_{13}^S + p_{13}^E e_{33} / c_{33}^E$ и $\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_3^S + (e_{33})^2 / c_{33}^E$ соответственно, где r_{13}^S и ε_3^S — компоненты электрооптического тензора и тензора диэлектрической проницаемости зажатого кристалла, c_{33}^E и p_{13}^E — компоненты тензоров модулей упругости и фотоупругих постоянных электрически закороченного кристалла и e_{33} — пьезоэлектрическая константа кристалла. Для приведённых выше значений b , λ_r , I_{p1} и I_s , а также угла Брэгга θ_B^{red} для считывающего пучка вне кристалла, толщины образца $d = 1,8$ мм и материальных параметров ниобата лития $n_o = 2,26$; $\varepsilon_3^S = 2,47 \cdot 10^{-10} \text{ Ф/м}$; $e_{33} = 1,33 \text{ Кл/м}^2$; $c_{33}^E = 24,24 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; $r_{13}^S = 8,6 \cdot 10^{-12} \text{ м/В}$ [14] и $p_{13}^E = 0,133$ [15], из соотношения (4) можно оценить значение фотовольтаической постоянной образца $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 4 на длине волны записывающих пучков $\lambda_w = 532$ нм как $\beta_{31} = 3,28 \cdot 10^{-9} \text{ А/Вт}$.

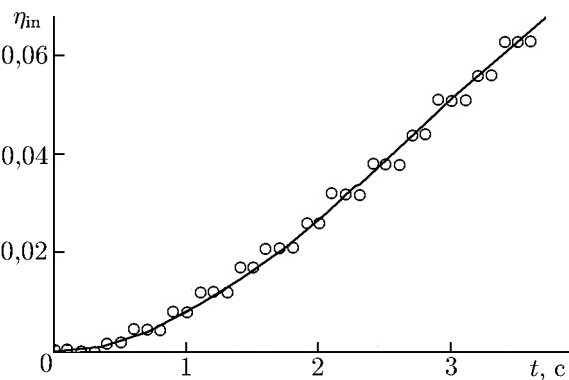


Рис. 4. Временная зависимость дифракционной эффективности, рассчитанная с помощью формулы (2) для динамической фоторефрактивной голограммы на начальном участке её формирования в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ № 4 по экспериментальным данным, представленным на рис. 2. Точки — эксперимент, сплошная кривая — расчёт по формуле (3) при $b = 8,95 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-2}$ и $c = -10,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-3}$

Экспериментально установлено [16], что фотовольтаическая постоянная пропорциональна коэффициенту поглощения α на используемой длине волны, т. е. $\beta_{31} = \alpha\kappa_1$, где κ_1 — константа, зависящая от природы фотовольтаического примесного центра и длины волны и не зависящая от геометрии кристалла и концентрации примеси. Для кристаллов ниобата лития, легированных Cu, на длине волны 514,5 нм авторами [16] получено значение $\kappa_1 = 5,5 \cdot 10^{-10}$ А · см/Вт. Из найденных нами значений β_{31} и $\alpha = 7,9$ см $^{-1}$ (см. табл. 1) получаем, что для образца № 4 на длине волны 532 нм $\kappa_1 = 4,2 \cdot 10^{-10}$ А · см/Вт. С учётом возрастания параметра κ_1 с укорочением длины волны [16] можно сделать вывод, что образцы LiNbO $_3$:Cu, полученные диффузионным легированием, по фотогальваническим характеристикам близки к монокристаллам, легированным традиционным способом, т. е. путём добавления в исходную шихту CuO.

Как известно [8, 9], эффективность дифракции Брэгга на пропускающей объёмной фазовой решётке определяется амплитудой возмущений показателя преломления среды Δn_m и в рассматриваемом случае её динамика описывается соотношением

$$\eta(t) = \sin^2 \left[\frac{\pi d}{\lambda_r \cos \theta_B^{\text{red in}}} \Delta n_m(t) \right], \quad (5)$$

где $\theta_B^{\text{red in}}$ — угол Брэгга для считывающего пучка внутри образца, а связь $\Delta n_m(t)$ с динамикой амплитуды поля пространственного заряда голограммы $E_m(t)$ с учётом дополнительного вклада в фоторефрактивный отклик пьезоэлектрического и фотоупругого эффектов [13] определяется выражением

$$\Delta n_m(t) = -\frac{n_o^3}{2} r_{\text{eff}} E_m(t). \quad (6)$$

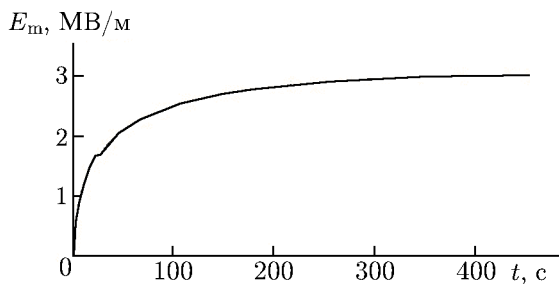


Рис. 5. Динамика изменения амплитуды поля пространственного заряда для фоторефрактивной голограммы в образце LiNbO $_3$:Cu № 4, рассчитанная с использованием соотношений (5) и (6) по данным для временной зависимости дифракционной эффективности, представленным на рис. 3

Результаты расчёта временной эволюции амплитуды поля пространственного заряда $E_m(t)$ в образце № 4 из соответствующей зависимости $\eta(t)$ (см. рис. 4), выполненные с использованием соотношений (5) и (6) и приведённых выше данных, представлены на рис. 5. Как следует из этого рисунка, амплитуда поля пространственного заряда в данном образце LiNbO $_3$:Cu, полученным диффузионным легированием, достигает значения 30 кВ/см. Этому значению соответствует амплитуда возмущений показателя преломления среды $\Delta n_m = 1,61 \cdot 10^{-4}$.

Как показано в работе [9], максимальные достигаемые значения Δn_m в образцах LiNbO $_3$:Cu с толщиной 1 мм, созданных диффузионным ле-

гированием, растут с увеличением концентрации $c_{\text{Cu}^{2+}}$ двукратно ионизированных центров, играющих роль ловушек для фотовозбуждённых электронов. Количественное сопоставление показывает, что при значениях $c_{\text{Cu}^{2+}}$, близких к измеренной нами концентрации $c_{\text{Cu}^{2+}} = 2,83 \cdot 10^{25}$ м $^{-3}$ для образца № 4 (см. табл. 1), полученные авторами [9] значения Δn_m примерно в 2,5 раза выше, чем найденное нами. Такие различия могут быть связаны, в первую очередь, с низкой точностью определения коэффициента поглощения на длине волны 477 нм, вычислявшегося по измеренному с помощью спектрофотометра пропусканию образца № 4, которое составляло малую величину $T = 0,003$, близкую к предельной чувствительности используемого прибора GENESYS 2. Второй причиной может быть значительное затухание записывающих пучков в нашем образце ($\alpha_o^{532\text{нм}} = 7,9$ см $^{-1}$), толщина которого составляла 1,8 мм. В этом случае используемое в расчётах

временной эволюции функций $\Delta n_m(t) \propto E_m(t)$ соотношение (5), не учитывающее зависимости рассматриваемых величин от координаты x в кристалле, может давать для них заниженную оценку.

Эксперименты, проведённые с образцом № 3 (см. табл. 1) и аналогичные описанным выше, позволили получить для него максимальные значения $\eta = 86\%$, $E_m = 24,1$ кВ/см и $\Delta n_m = 1,3 \times 10^{-4}$. По данным авторов [9], при концентрации $c_{\text{Cu}^{2+}} = 6,04 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ в образце $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ могут формироваться фоторефрактивные голограммы с $\Delta n_m = 1,75 \cdot 10^{-4}$. Наблюдаемое здесь различие значений Δn_m , не превышающее 35 %, находится в пределах погрешности используемых нами экспериментальных методик.

Такие же оценки для образцов № 1 и № 2 (см. табл. 1) дают возможные значения $\Delta n_m = 4,06 \times 10^{-5}$ и $\Delta n_m = 2,52 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Достижимые значения амплитуды поля пространственного заряда в этих образцах являются достаточно малыми и могут быть оценены из формулы (6) как $E_m = 7,3$ и $0,45$ кВ/см. В связи с этим подробных экспериментальных исследований формирования фоторефрактивных голограмм в данных образцах не проводилось.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые нами 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 путём 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 объёмных фазовых голограммах, формируемых коротковолновым лазерным излучением. Результаты таких экспериментов для считывающего излучения с $\lambda_r = 655$ нм при длине волны записывающих пучков 532 нм показали, что в образце с концентрацией Cu около $3,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ для записи голограммы с дифракционной эффективностью $\eta = 10\%$ при используемых световых пучках с длиной волны 532 нм и интенсивностью 390 мВт/см^2 каждый требуется 5 с. Максимальное значение η составляет 94 %. Измерения фотовольтаической постоянной β_{31} данного образца и оценка константы κ_1 , зависящей от природы фотовольтаического примесного центра и длины волны и не зависящей от геометрии кристалла и концентрации примеси, позволяют сделать вывод, что образцы $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, полученные нами диффузионным легированием, по фотогальваническим характеристикам близки к монокристаллам, легированным традиционным способом, т. е. путём добавления в исходную шихту CuO.

Из проведённых экспериментов также следует, что амплитуда поля пространственного заряда в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, полученных диффузионным легированием, при концентрации Cu около $3,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, может достигать значений 30 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 (грант 12-02-90038-Бел_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kukhtarev N. V., Kukhtereva T. V., Stargell G., Wang J. C. // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. Art. no. 014111.
2. Zhang X., Wang J., Tang B., et al. // Opt. Express. 2009. V. 17, No. 12. P. 9981.

3. Kukhtarev N., Kukhtareva T., Okafor F. // J. Holography Speckle. 2009. V. 5, No. 3. P. 268.
4. Esseling M., Holtmann F., Woerdemann M., Denz C. // Opt. Express. 2010. V. 18, No. 16. P. 17 404.
5. Esseling M., Zaltron A., Argiolas N., et al. // Appl. Phys. B. 2013. V. 113, No. 2. P. 191.
6. Volk T., Wöhlecke M. Lithium niobate: defects, photorefractive and ferroelectric switching. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. 247 p.
7. Стурман Б. И., Фридкин В. М. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления. М.: Наука, 1992. 208 с.
8. Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 320 с.
9. Reithmann K., Hukriede J., Buse K., Krätzig E. // Phys. Rev. B. 2001. V. 61, No. 7. P. 4615.
10. Буримов Н. И., Шандаров С. М. // Физика твёрдого тела. 2006. Т. 48, № 3. С. 491.
11. Хатьков Н. Д., Шандаров С. М. // Автометрия. 1987. № 6. С. 103.
12. Одулов С. Г. // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 35, № 1. С. 10.
13. Шандаров С. М., Шандаров В. М., Мандель А. Е., Буримов Н. И. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах. Томск: ТУСУР, 2007. 242 с.
14. Акустические кристаллы: справочник / Под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука, 1982. С. 455.
15. Авакянц Л. П., Киселёв Д. Ф., Щитов Н. Н. // Физика твёрдого тела. 1976. Т. 18, № 6. С. 1547.
16. Glass A. M., von der Linde D., Negran T. J. // Appl. Phys. Lett. V. 24, No. 4. P. 233.

Поступила в редакцию 11 ноября 2013 г.; принята в печать 31 марта 2014 г.

FORMATION DYNAMICS OF TRANSMISSION HOLOGRAMS IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS DOPED BY COPPER THROUGH HIGH-TEMPERATURE DIFFUSION

K. M. Mambetova, N. N. Smal', S. M. Shandarov, L. N. Orlikov, S. I. Arestov, and S. V. Smirnov

The results of experimental realization of the technology of diffusion doping of the congruent *X*-cut lithium niobate crystals by copper and the results of studying their photorefractive and photovoltaic properties are presented. The latter was done by using the Bragg diffraction of the reading beam with a wavelength of 655 nm on the dynamic transmission volume–phase holograms recorded by laser beams having a wavelength of 532 nm. It is shown that by their photogalvanic properties the created samples, which are 1.8 mm thick, are similar to the single crystals grown by the conventional method from melt containing copper monooxide as a supplement.