

УДК 534.2

## ДВУМЕРНЫЕ ФОТОННЫЙ И ФОНОННЫЙ КРИСТАЛЛЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

© 2014 г. А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов,  
Р. И. Калимуллин, А. А. Потапов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
“Казанский государственный энергетический университет”

E-mail: kalru@newmail.ru

Рассмотрены особенности формирования и применения фотонных и фононных кристаллов, содержащих двумерные периодические доменные структуры. Особое внимание обращено на формирование двумерных периодических доменных структур в оксидных сегнетоэлектриках с помощью остросфокусированных лазерных пучков. Описаны особенности нелинейных свойств подобных двумерных структур при распространении через них оптических и акустических пучков.

DOI: 10.7868/S0367676514040188

К фотонным (*PhC*) и фононным (*PnC*) кристаллам относятся в первую очередь оксидные сегнетоэлектрики типа ниобата лития, содержащие периодические доменные структуры (ПДС). Они привлекли большое внимание своими необычными физическими свойствами [1]. Соседние домены в *PhC* и *PnC* отличаются знаками элементов тензоров третьего порядка, в том числе соответственно нелинейной диэлектрической восприимчивости  $\chi$  и пьезоэлектрического модуля  $e$ , что нашло применение для генерации второй гармоники оптических и акустических волн. С начала XXI века помимо применения одномерных (1D) кристаллов стали разрабатываться методы формирования, а затем и применения двумерных кристаллов (2DPhC и 2DPnC) [1–3]. Использование 2D-кристаллов позволяет расширить спектр запрещенных и разрешенных частотных полос для оптических и акустических волн. Это обстоятельство наиболее важно для упрощения условий фазового синхронизма при генерации второй гармоники в параметрических генераторах, частотных смесителях и других устройствах опто- и акустоэлектроники. Если для формирования 2DPhC по-прежнему в основном использовались кристаллы ниобата лития (НЛ) [2, 4–6], то для изготовления 2DPnC в основном стали применяться материалы совсем других классов и структуры в виде сотовых матриц [7–13]. Микронные и субмикронные отверстия в матрицах из алюминия, оксида кремния или НЛ были заполнены другими материалами или воздухом. Именно на подобных конструкциях типа “твердое тело–воздух” на 2DPnC были впервые реализованы ультразвуковые генераторы гигагерцевого диапазона [10]. Следует отметить, что подобные конструкции 2DPnC технологически весьма сложны и едва ли найдут широкое применение. В свою очередь, на

2DPhC, содержащих сформированную известным лазерным способом структуру из отдельных точечных доменов в НЛ [6], была получена генерация второй гармоники оптического пучка, распространяющегося вдоль полярной оси, причем выходной пучок был асимметричен входному в зависимости от поляризации пучка.

Следует отметить, что применение 2D структур значительно расширяет возможности как для оптических, так и для акустических преобразователей частоты с использованием принципа волнового синхронизма:

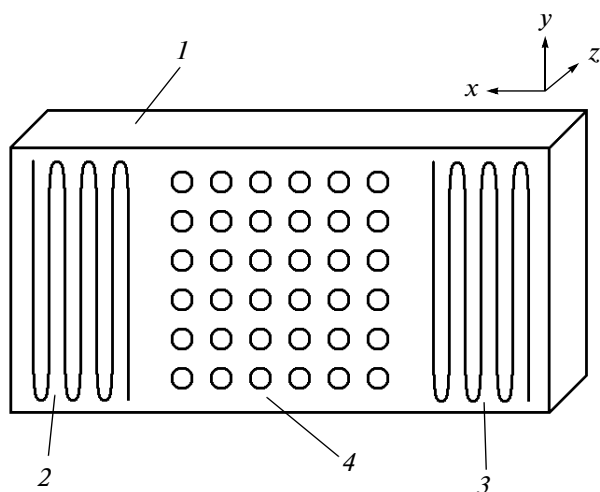
$$\bar{k}_{2\omega} = 2\bar{k}_{\omega} + \bar{k}_g, \quad (1)$$

где  $k_{\omega}$  и  $k_{2\omega}$  – волновые векторы для первой и второй гармоник волны;  $k_g$  – волновой вектор доменной структуры.

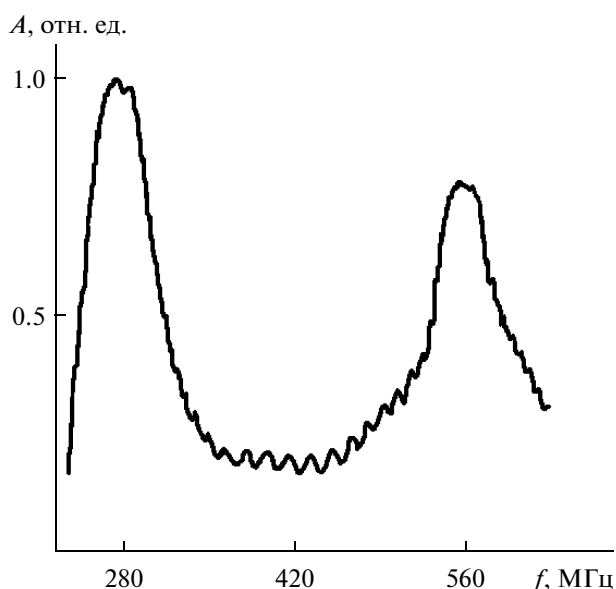
Для 1D-структуры  $k_g = 2\pi/D$ , что соответствует только одному направлению распространения волн. В 2D-структуре возникает модуляция знака соответственно  $\chi$  или  $e$ , обеспечивая набор значений  $k_g$  в плоскости  $xy$   $k_g = 4\pi m/\sqrt{3}d$  [2]. Так, при распространении входящего лазерного пучка вдоль оси  $\bar{z}$  было обнаружено [6], что его вторая гармоника распространяется с конфокальным углом  $\theta$  между волновыми векторами  $k_{\omega}$  и  $k_{2\omega}$ , определяемыми законами сохранения импульса

$$\theta = 2k_{\omega}/k_{2\omega} = n^{o,e}(\omega)/n^{o,e}(2\omega), \quad (2)$$

где  $n^{o,e}(\omega)$  – обыкновенный и необыкновенный показатели преломления в ниобате лития на частоте  $\omega$ . Экспериментально было установлено, что в зависимости от угла поляризации входящего пучка с частотой  $\omega$  выходной пучок с частотой  $2\omega$  имеет круговую траекторию вокруг вектора распространения входного пучка с конфокальными



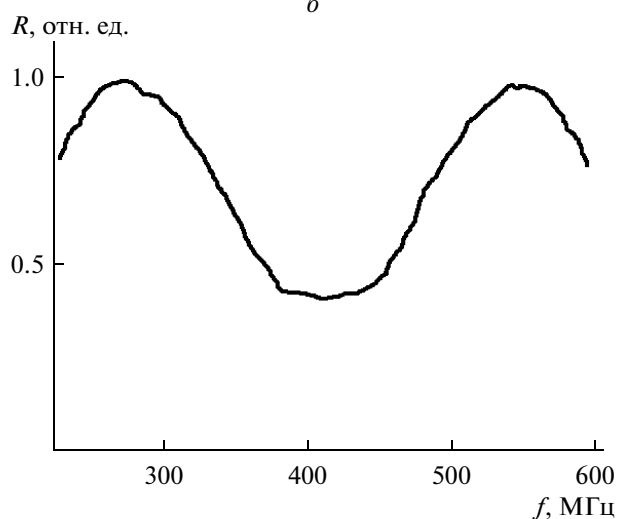
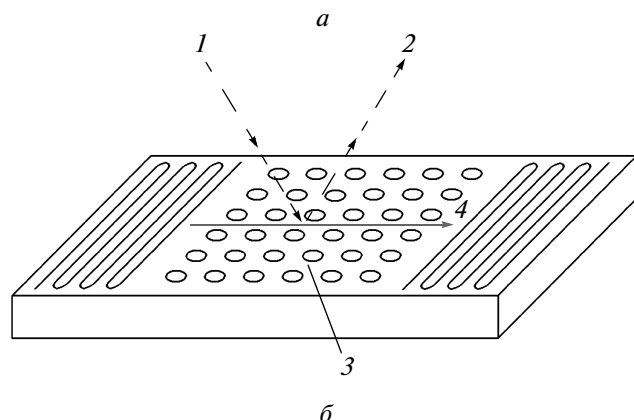
**Рис. 1.** Схема эксперимента по распространению акустических импульсов через  $2DPhC$  структуру: 1 – подложка из НЛ; 2 – входной и 3 – выходной преобразователи; 4 –  $2D$ -структура.



**Рис. 2.** Частотная зависимость амплитуды прошедших через  $2DPhC$ -структуру импульсов ПАВ.

углами порядка  $17.6^\circ$  для обыкновенного пучка и  $16.4^\circ$  для необыкновенного пучка.

В данной работе рассмотрены возможности создания двумерного фотон-фононного кристалла, энергетический спектр которого соответствовал бы полосам пропускания или отражения оптических и акустических волн на монокристалле НЛ. Ранее подобное рассмотрение было выполнено нами для одномерной периодической доменной структуры также в НЛ [14]. Для этих целей был изготовлен двумерный кристалл на основе НЛ, содержащего 0.8 ат. % ионов железа с соотно-



**Рис. 3.** Отражение лазерного пучка на  $2DPhC$ -структуре: а – схема эксперимента; б – изменение коэффициента отражения лазерного пучка. 1 – входной и 2 – отраженный лазерные пучки; 3 –  $2DPhC$ -структура; 4 – генерируемая ПАВ.

шением концентраций  $C_{Fe^{2+}}/C_{Fe^{3+}} \approx 0.3$ . Периодическая  $2D$ -структура состояла из гексагональной системы цилиндрических доменов диаметром 5 мкм, сформированных на  $z$ -поверхности образца остросфокусированным пучком лазера с  $\lambda = 534$  нм. Расстояние между доменами составляло 20 мкм, глубина формирования доменов – порядка 10 мкм (рис. 1).

Сформированная структура была использована для генерации второй гармоники лазера с  $\lambda = 1.5$  мкм и акустических волн с  $f_{ак} = 200$  МГц.

Поскольку в наших экспериментах глубина формирования доменных структур была  $\leq 10$  мкм, наиболее эффективна генерация поверхностных акустических волн (ПАВ). Для их генерации и детектирования использовали плоскую спиральную структуру с переменным шагом, что позволяет перекрывать диапазон частот 250–650 МГц. Экспериментально были обнаружены полосы пропускания в спектре ПАВ (рис. 2) на основной ча-

стоте  $f_{ак} = 280$  МГц и второй гармонике 560 МГц и полосы отражения с центром на 420 МГц. Малые пики изменения пропускания и отражения соответствуют согласованному взаимодействию ПАВ, отраженных на границах доменов.

Была обнаружена модуляция падающей на  $2DPn$ -кристалл лазерной волны при распространении через этот кристалл ПАВ на частоте  $2f_{ак}$ . При этом отражение оптической волны в диапазоне частот, соответствующем волновому вектору доменной  $2D$ -структуры  $k_g$ , удовлетворяло конфокальному углу  $\theta$  (рис. 3).

Таким образом, нами продемонстрирована одна из возможностей сформированной  $2D$ -структуры для частотного и пространственного преобразования оптических и акустических пучков. Более того, в настоящее время возможности  $2D$ - и даже  $3D$ -структур фотонных и фононных кристаллов начинают реально использоваться в опто- и акустоэлектронике.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. Фотонные и фононные кристаллы: формирование и применение в опто- и акустоэлектронике. М.: Физматлит, 2010.
2. Broderick N.G.R., Ross C.W. et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 4345.
3. Косевич А.М., Мамалуй М.А. // ЖЭТФ. 2002. Т. 122. С. 897.
4. Коханчик Л.С., Бородин М.В., Шандаров С.М. и др. // Физика тв. тела. 2010. Т. 52. С. 1602.
5. Bruno B., Tinel A., Hladky A.C., Hennion et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 101905.
6. Molina P., Ramirez M.O., Garcia B.J., Pausa L.E. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 261111.
7. Bucay J., Roussel E., Vasseur J.O. et al. // Phys. Rev. B. 2009. V. 79. P. 214305.
8. Chiang C., Luan P. // J. Phys.: Condens. Matter. 2010. V. 22. 055405.
9. Benchabane S., Gaiffe O., Ullias G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 171908.
10. Su M., Oisson R., Leseman Z., Ei-Kadi I. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 053111.
11. Wang W., Kong Y., Liu H. et al. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. 043105.
12. Steigewald H., Ying Y., Eason R. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. 062902.
13. Morgan B., Tinel A., Hladky-Hennion A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 101905.
14. Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Калимуллин Р.И., Потанов А.А. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2012. Т. 76. № 7. С. 818; Golenishchev-Kutuzov V.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Kallimulin R.I., Potapov A.A. // Bull. Russ. Akad. Sci.: Physics. 2012. V. 76. № 7. P. 731.