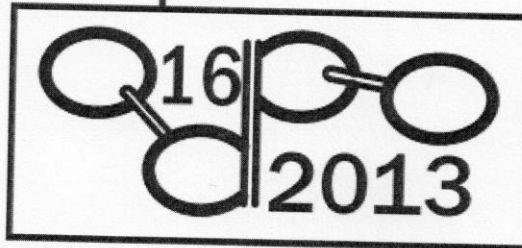


Proceedings of the  
International meeting



volume I

**Order, Disorder and  
Properties of Oxides**  
16-th International meeting

7-12 of September 2013  
Rostov-on-Don -Tuapse, Russia

Порядок, беспорядок и свойства оксидов  
16-й международный симпозиум

7-12 сентября 2013  
г.Ростов-на-Дону - Туапсе, Россия

При поддержке  
Российского фонда  
фундаментальных исследований

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

А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Р. И. Калимуллин, А. А. Потапов  
Казанский государственный энергетический университет  
Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51  
e-mail: kalru@newmail.ru

The peculiarities of formation and application of photonic and phononic crystals, containing two-dimensional periodic domain structure are considered. Particular attention is paid to the formation of two-dimensional periodic domain structure in ferroelectric oxide with finely focused laser beams. The features of the nonlinear properties of these two-dimensional structures for propagation through their optical and acoustic beams are described.

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 острогофокусированных лазерных пучков. Описаны особенности нелинейных свойств подобных двумерных структур при распространении через них оптических и акустических пучков.

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 [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 ниобата лития были заполнены другими материалами или воздухом. Именно на подобных конструкциях типа «твердое тело – воздух» на 2DPnC были впервые реализованы ультразвуковые генераторы гигагерцового 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 ниобате лития [6], была получена генерация второй гармоники оптического пучка, распространяющегося вдоль полярной оси, причем выходной пучок был асимметричен входному в зависимости от поляризации 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 ниобата лития. Ранее подобное рассмотрение было выполнено нами для одномерной периодической доменной структуры также в ниобате лития [14]. Для этих целей был изготовлен двумерный кристалл на основе ниобата лития, содержащего 0.8 at.% ионов железа с соотношением концентраций  $Fe^{2+}/Fe^{3+} \approx 30\%$ . Периодическая 2D структура состояла из гексагональной системы цилиндрических доменов диаметром 5 мкм, сформированных на z-поверхности

образца острогофокусированным пучком лазера с  $\lambda = 534$  нм. Расстояние между доменами составляло 20 мкм, глубина формирования доменов – порядка 10 мкм.

Сформированная структура была использована для генерации второй гармоники лазера с  $\lambda = 1,5$  мкм и акустических волн с  $f = 200$  МГц. Следует отметить, что применение 2D структур значительно расширяет возможности как для оптических, так и для акустических преобразователей частоты с использованием принципа волнового синхронизма:

$$\bar{k}_{2\omega} = 2\bar{k}_{\omega} + \bar{k}_g,$$

где  $k_{\omega}$  и  $k_{2\omega}$  – волновые векторы для первой и второй гармоник волн,  $k_g$  – 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  $xy$  при распространении первичной волны вдоль  $\bar{z}$ . Так при распространении входящего лазерного пучка вдоль  $\bar{z}$  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

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

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 углами порядка  $17,6^\circ$  для обыкновенного пучка и  $16,4^\circ$  для необыкновенного пучка.

Поскольку в наших экспериментах глубина формирования доменных структур была  $\leq 10$  мкм, наиболее эффективна генерация поверхностных акустических волн (ПАВ) в диапазоне частот порядка  $f_{ак} = 300$  МГц на основной частоте и 600 МГц на второй гармонике. 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  $\theta$ .

Таким образом, нами была продемонстрирована возможность сформированной 2D структуры для частотного преобразования оптических и акустических пучков.

#### Список литературы

- [1] А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Р. И. Калимуллин. Фотонные и фононные кристаллы: формирование и применение в опто- и акустоэлектронике. – М.: Физматлит, 2010.
- [2] N.G.R. Broderick, C.W. Ross et al. // Phys. Rev. Lett., 2000, 84, 4345.
- [3] А.М. Косевич, М.А. Мамалуй. // ЖЭТФ, 2002, 122, 897.
- [4] Л.С. Коханчик, М.В. Бородин, С.М. Шандаров и др. // ФТТ, 2010, 52, 1602.
- [5] V. Bruno, A. Tinel, A.C. Hladky, Hennion et al. // Appl. Phys. Lett., 2010, 96, 101905.
- [6] P. Molina, M.O. Ramirez, B.J. Garcia, L.E. Pausa. // Appl. Phys. Lett., 2010, 96, 261111.
- [7] J. Bucay, E. Roussel, J.O. Vasseur et al. // Phys. Rev. B, 2009, 79, 214305.
- [8] C. Chiang, P. Luan. // J. Phys. Cond. Matter., 2010, 22, 055405.
- [9] S. Benchabane, O. Gaiffe, G. Ullias et al. // Appl. Phys. Lett., 2011, 98, 171908.
- [10] M. Su, R. Oisson, Z. Leseman, I.Ei-Kadi. // Appl. Phys. Lett., 2010, 96, 053111.
- [11] W. Wang, Y. Kong, H. Liu et al. // J. Appl. Phys., 2009, 105, 043105.
- [12] H. Steigewald, Y. Ying, R. Eason et al. // Appl. Phys. Lett., 2011, 98, 062902.
- [13] V. Morgan, A. Tinel, A. Hladky-Hennion et al. // Appl. Phys. Lett., 2010, 96, 101905.
- [14] В.А. Голенищев-Кутузов, А.В. Голенищев-Кутузов, Р.И. Калимуллин, А.А. Потапов. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2012, 76, 818.