

РАЗРАБОТКА МИКРОСТРУКТУР ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ МЕТАМАТЕРИАЛОВ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ

© 2022

В. С. Бут аспирант кафедры наноинженерии, институт систем обработки изображений – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;
mister_byt@mail.ru

А. А. Кобелев аспирант кафедры наноинженерии, институт систем обработки изображений – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;
kobelevanton89@mail.ru

С. В. Карпеев доктор физико-математических наук, профессор кафедры наноинженерии, институт систем обработки изображений – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;
karp@smr.ru

Проведено проектирование микрочеек для последующего моделирования из них пьезо- и оптоэлементов. Осуществлена разработка пьезоэлектрических и оптических элементов из микрочеек и подготовлены модели для печати на 3D-принтере. Эти конструкции можно практически использовать в качестве пьезоакустических или пьезоэлектрических датчиков в ультразвуковых расходомерах, если в их состав добавляется пьезоэлектрический порошок, или использовать для создания оптических структур дифракционных оптических элементов. Проведён анализ ключевых характеристик и коэффициентов пьезоэлектрических структур, таких как диэлектрическая константа, коэффициент преобразования, коэффициент потерь диэлектрика, добротность упругой системы, частотная константа, коэффициент электромеханической связи, коэффициент пьезоэлектрического заряда, пьезоэлектрический коэффициент напряжения, коэффициент упругой податливости, скорость старения, точка Кюри. Элементы, полученные с помощью 3D-печати, будут иметь свойства, отличные от свойств элементов, полученных стандартными методами. Данные структуры открывают новые возможности для развития ультразвуковых исследований, машиностроения и приборостроения.

Наноструктура; пьезоэлектрик; пьезоакустика; оптические структуры; наноэлемент; пьезоэлемент; пьезоматериал; ультразвуковые измерения; 3D-печать

Цитирование: Бут В.С., Кобелев А.А., Карпеев С.В. Разработка микроструктур для формирования свойств метаматериалов пьезоэлементов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 4. С. 97-108. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-97-108

Введение

Пьезоэлектрические материалы обладают способностью преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот, поэтому они широко используются в ультразвуковых измерениях, измерениях давления, в медицине, в дефектоскопах, в сейсмических датчиках, системах хранения энергии и других различных детекторах [1 – 6]. Одним из недостатков этих материалов является то, что константы пьезоэлектрического заряда пьезокерамики и их производных определяются кристаллографическими структурами и составами, что приводит только к общим режимам работы излучателей и приёмников. Кроме того, внутренние микроструктуры тесно связаны с другими физическими свойствами. Химические модификации, такие как легирование, вводятся для изменения пьезоэлектрических постоянных в определённых направлениях путём изме-

нения кристаллографических структур, но их доработка с точки зрения конструкции ограничивается небольшим набором возможных легирующих материалов.

В этой ситуации возникает проблема физического исполнения сложной геометрии пьезоэлектрических элементов, но с точки зрения размера и формы эти изделия являются удобными объектами для массовой печати. Развитие 3D-печати обещает в ближайшем будущем полностью изменить технологическую структуру в ряде отраслей обрабатывающей промышленности, таких как электроника, строительство, медицина и т.д. После создания подходящей технологии для пьезо- и оптических материалов её можно будет использовать как рабочий материал для изготовления пьезоэлементов на 3D-принтере без применения ряда трудоёмких технологических операций [7; 8].

Также существует потребность в новых способах изготовления оптических элементов. Дифракционные оптические элементы делят световой поток на множество лучей и отклоняют каждый из них на свой угол. Однако редко удается отклонить все лучи и тем самым перенаправить всю интенсивность на заданный угол. В связи с этим вводится понятие дифракционной эффективности, которое представляет собой отношение интенсивности света, отклонённого на желаемый угол, к интенсивности падающего света. Дифракционная эффективность элементов сильно зависит от точности изготовления фазового рельефа. Поэтому исследование формирования дифракционных оптических элементов для повышения разрешающей способности существующих методов изготовления дифракционных оптических элементов является актуальной задачей [9 – 13].

Одним из способов преодоления геометрических ограничений пьезоэлектрических элементов, улучшения характеристик и повышения эффективности оптических элементов является использование микроэлементов (рис. 1) для формирования их структур [14]. Если эти ячейки объединить в упорядоченную структуру, то получается метаматериал с электромеханическими связями, за счёт которого улучшаются такие характеристики как коэффициент электромеханической связи, коэффициент преобразования, добротность, пьезоэлектрический модуль и т. д.

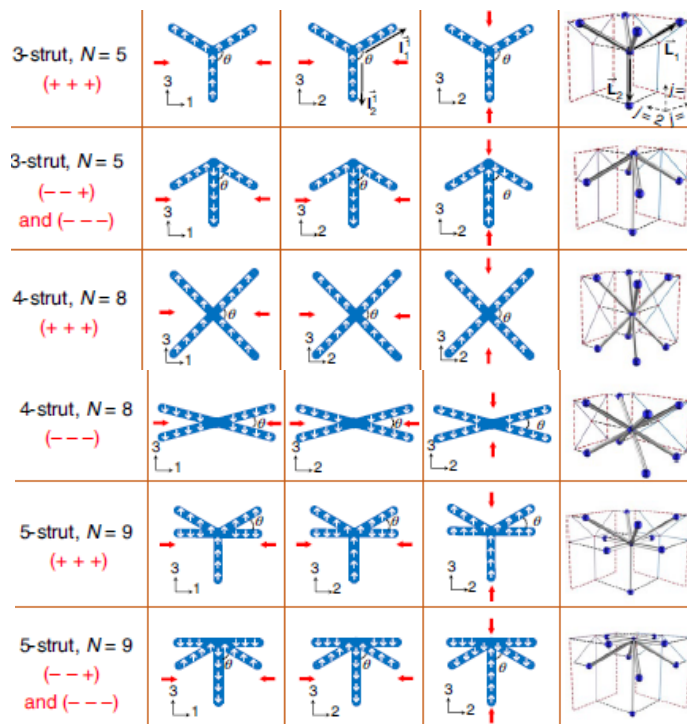


Рис. 1. Трёхмерные структурные ячейки [21]

Такие конструкции позволяют добиться высокого коэффициента преобразования и коэффициента пьезоэлектрического заряда, а также позволяют «контролировать» характеристики получаемых из них структур, что невозможно при использовании стандартных пьезоэлектрических и пьезоакустических элементов. В свою очередь, оптические элементы из таких конструктивных элементов будут иметь свойства и характеристики, отличные от стандартных [15 – 25].

Представленные ячейки также могут применяться для создания структур, формирующих двумерные интерференционные картины ЗЭВ (затухающие электромагнитные волны) [26 – 28]. Волновые решётки имеют высокую отражательную способность, близкую к 100% в окрестности определённых длин волн падающего света [27 – 29]. Такой эффект высокого отражения получается за счёт резонансного процесса возбуждения собственных квазиволноводных мод в структуре. Пример волноводной дифракционной решётки представлен на рис. 2 [29].

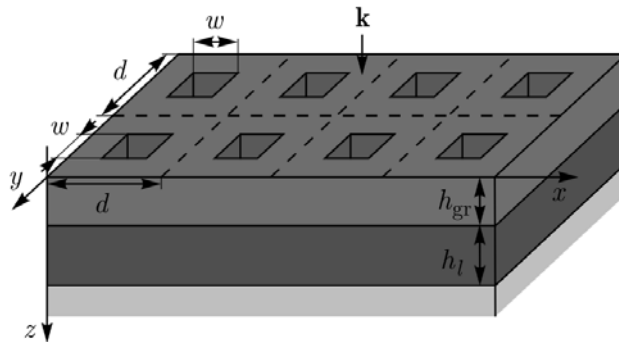


Рис. 2. Дифракционная структура оптического элемента [30]

За счёт использования этих структур для формирования интерференционных картин ЗЭВ можно получить следующее: при определённых условиях, обеспечиваемых выбором геометрических и физических параметров структуры, в оптических элементах будут возбуждаться квазиволноводные моды, близкие по структуре поля к модам плоскопараллельного волновода [26 – 28].

Моделирование ячеек пьезоэлектрических структур

Моделирование полных проекций в пространстве пьезоэлектрических элементов осуществляется за счёт пространственного расположения пьезоэлектрических связей. В расчёт включается анализ конфигураций шаблонов проекций из трёхмерного узла, разделённого по связности. Создание различных шаблонов проекций приводит к новым картам электрического смещения, из которого может быть построено тензорное поле пьезоэлектрических коэффициентов d_{3M} (где M – это 1, 2, 3), выходящее за ограничения монолитной пьезоэлектрической керамики, полимеров и композитов, пьезоэлектрические коэффициенты которых расположены в квадрантах $\{- - +\}$ и $\{+ + -\}$. Безразмерное пьезоэлектрическое тензорное поле d_{3M} определяется путём нормировки d_{3M} на вектор $\{d_{31}, d_{32}, d_{33}\}$. Чтобы использовать как можно более широкое пространство для проектирования, моделирование начинается с минимального количества пересекающихся стоек в узле ячейки, которые можно преобразовать в трёхмерные периодические решётки. Все пересекающиеся стойки представляются в виде векторов, исходящих из узла L_i ($i=1-N$, где N – связность узла). При построении шаблонов проекция l_i^j определяется как двумерная проекция L_i на три ортогональные плоскости через глобальную систему координат 1–2–3 трёхмерного пьезоэлектрического куба.

$$L_i = \frac{1}{2} \sum_j^3 l_i^j, \quad (1)$$

где $j = 1, 2, 3$.

Если использовать пьезоэлектрическую керамику и её композиты, которые имеют d_{3M} , распределённую в квадрантах $\{- - +\}$, в качестве основного материала для построения карт электрического смещения (см. рис. 1), то белые стрелки, указывающие вверх или вниз в направлении 3, указывают на положительную или отрицательную реакцию электрического смещения стойки в направлении 3 (то есть в направлении поляризации). Настройка шаблонов проекций в этих плоскостях приводит к различным картам электрического смещения, что обеспечивает доступ к различным квадрантам пространства свойств d_{3M} .

Микроархитектуры с высокой связностью узлов деформируются в основном при сжатии или растяжении. Составляющая d_{33} увеличивается с дополнительной узловой связностью по сравнению со случаями с более низкой связностью, в которых энергия деформации от изгиба стойки не способствует электрическому смещению в трёх направлениях.

Эти конструкции не ограничены идентичными проекционными шаблонами, в которых d_{31} и d_{32} соединены. Конструкции трёхмерных узловых блоков с разными схемами проекций позволяют осуществлять независимую настройку d_{31} и d_{32} . При использовании предложенных структурных ячеек появляется возможность настраивать разнородные карты электрического смещения, независимо изменяя относительные ориентации θ_1 и θ_2 между плоскостями, которые образованы двумя соседними стойками. Таким образом, сжатие в двух противоположных направлениях одного трёхмерного узлового блока создает разные карты электрического смещения и приводит к разъединению d_{31} и d_{32} .

Конечное значение d_{nM} спроектированных блоков можно рассчитать путём суммирования электрического смещения от всех пересекающихся элементов стойки L_i в состоянии равновесия при приложенном напряжении. Такие модели связывают конфигурацию проекционных рисунков l_i^j с интересующим пьезоэлектрическим коэффициентом d_{nM} для определённого материала:

$$d_{nM} = \frac{\sum_{i=1}^N \int_{V_i} d_{nm}^i T_{mr}^i \sigma_r^i dV_i}{\sum_{i=1}^N \int_{V_i} \delta_{Mm} T_{mr}^i \sigma_r^i dV_i}, \quad (2)$$

где d_{nm}^i – матрица пьезоэлектрических коэффициентов основного материала ($n = 1, 2, 3, \dots, m; M = 1 \dots 6$); T_{mr}^i представляет собой матрицу преобразования напряжений из локальной системы координат $x - y - z$ в глобальную 1–2–3; σ_r^i – вектор напряжений в локальной системе координат ($r = xx, yy, zz, xy, xz, yz$); V_i – объём i -й стойки в узловом узле; δ_{Mm} – дельта Кронекера.

Возможность подстраивать характеристики получаемых метаматериалов позволит преодолеть геометрические ограничения пьезоэлектрических элементов, улучшить их характеристики и повысить эффективность.

Существующие пьезоэлектрические элементы

Все существующие пьезоэлектрические элементы имеют стандартные типоразмеры, такие как круг, пластина, цилиндр и т. д. (рис. 3).

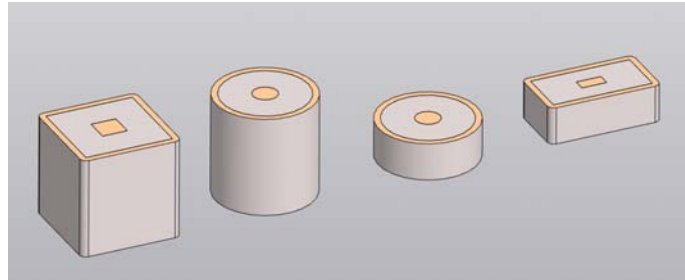


Рис. 3. Стандартные формы пьезоэлементов

Стандартные пьезоэлементы характеризуются постоянными и коэффициентами, представленными в табл. 1. Также приводятся формулы для расчёта каждого из коэффициентов.

Таблица 1 Основные характеристики пьезоэлементов

Характеристика	Формула
Диэлектрическая константа (K_T)	$K_T = \frac{\varepsilon^T}{\varepsilon_0} = \frac{C^T T}{\varepsilon_0 A},$ <p>где ε^T – это постоянная магнитная проницаемость (F/m); ε_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства ($8,854 \times 10^{-12} F/m$); A – площадь поверхности (m^2); T – расстояние между электродами (m); C – ёмкость (f)</p>
Добротность упругой системы (Q_m)	$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r Z_m C^T (f_a^2 - f_r^2)},$ <p>где f_a – антирезонансная частота (Hz); f_r – резонансная частота (Hz); Z_m – минимальный импеданс f_r (Om); C – ёмкость (f)</p>
Частотная константа (N)	Радиальная мода, диск: $N_{31} = f_r L$, где L – длина (m)
Коэффициент электромеханической связи (k_t)	$k_t = \sqrt{\frac{\pi f_r}{2 f_a} \cot\left(\frac{\pi f_r}{2 f_a}\right)}$
Коэффициент пьезоэлектрического заряда (d)	$d = k \sqrt{\varepsilon^T S^E} (C/N)$
Пьезоэлектрический коэффициент напряжения (g)	$g = \frac{d}{\varepsilon^r} (V m/N)$
Коэффициент упругой податливости (S)	$S = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\rho v^2} \left(\frac{m^2}{N} \right)$
Скорость старения (Z)	$Z = \frac{1}{(\log t_2 - \log t_1)} \left(\frac{P_2 - P_1}{P_1} \right),$ <p>где t_2, t_1 – количество дней после поляризации; P_2, P_1 – соответствующие измеренные значения поляризации пьезоэлементов за рассматриваемый период</p>

Но эти формы не всегда удобны для конкретной задачи и не всегда полностью удовлетворяют потребности пользователя для идеальной работы системы. Иногда возникает необходимость усложнять конструкцию устройства, из-за чего увеличивается и её стоимость.

Разработка новых элементов

Предлагаемые керамические образцы пьезоэлементов представляют собой совокупность кристаллитов, которые, в свою очередь, состоят из множества доменов. Свойства керамики являются результатом усреднения свойств образующихся кристаллитов, поэтому свойства керамики регулируются введением определённых добавок и изменением состава твёрдых растворов. Но также возможно изменить свойства и характеристики не только легированием, но и созданием определённых микроструктур. Эти конструкции создаются из стандартных ячеек с разным количеством стоек (R), показанных на рис. 4 – 7.

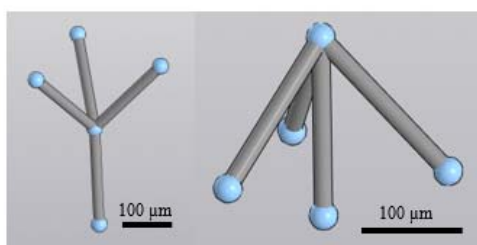


Рис. 4. Микроячейка с $R = 4$

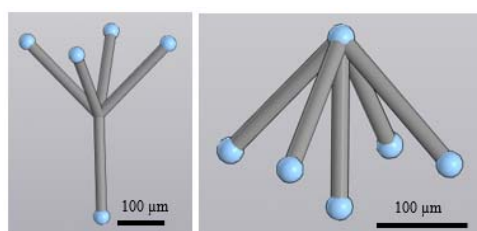


Рис. 5. Микроячейка с $R = 5$

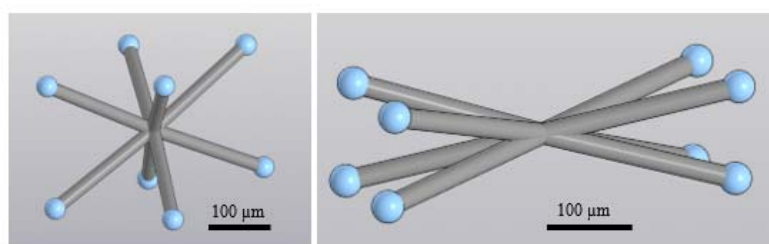


Рис. 6. Микроячейка с $R = 8$

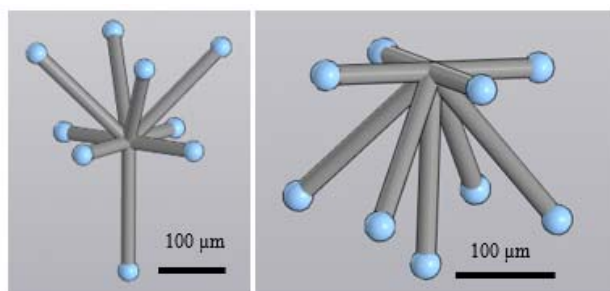


Рис. 7. Микроячейка с $R = 9$

Из данных ячеек создаются структуры полноценных пьезоэлектрических сенсоров и подготавливаются 3D-модели элементов из различных разработанных микроячеек для печати их на 3D-принтере технологии SLA. Разрешающая способность печати 3D-принтера позволяет реализовать структуры с толщиной одного сечения для печати от 25 до 50 мкм. Модели структур и полученные результаты после печати под микроскопом представлены на рис. 8.

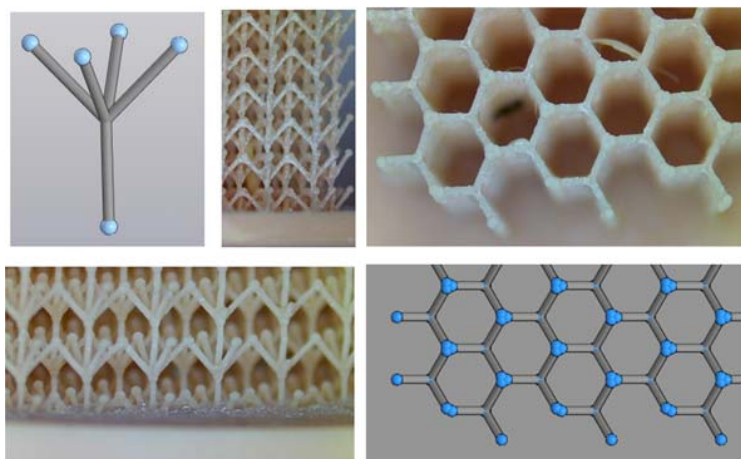


Рис. 8. Пример структуры из микроячеек

Заключение

Полученные ячейки могут быть использованы для формирования структур оптических и пьезоэлектрических элементов с целью получения требуемых свойств и характеристик. Представляется возможным напечатать эти структуры на 3D-принтере, поскольку минимальные размеры ячеек (25...50 мкм) соответствуют разрешающей способности устройства. Благодаря этой возможности покрывается широкая область применения данной технологии для создания многофункциональных элементов. Поскольку современная база полимерных материалов для 3D-принтеров достаточно велика, также можно выбирать гибкие, вязкие, ударопрочные или термостойкие материалы в зависимости от поставленной задачи. Необязательно настраивать всю конструкцию устройства под опто- или пьезоэлементы, достаточно определить характеристики, которые необходимы для работы элементов, и на основании этого установить их в систему для, например, расходомеров жидкостей или газов. Нет необходимости создавать большие матрицы из стандартных датчиков или оптических элементов, так как можно спроектировать и распечатать всю конструкцию, например фазированную решётку, на 3D-принтере. Также возможно создание датчиков, встроенных в систему, без дополнительного вспомогательного оборудования и компонентов, что позволит упростить всю систему и снизить стоимость изготовления конструкции.

Библиографический список

1. Андрианова А.В., Виноградова И.Л., Султанов А.Х., Мешков И.К., Абдрахманова Г.И., Грахова Е.П., Ишмияров А.А., Янтилина Л.З. Подход к получению 3D-наноструктурного двухфазного ситаллового стекла, основанный на интенсивном кручении под высоким давлением // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 4. С. 489-500. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500

2. Скиданов Р.В., Досколович Л.Л., Ганчевская С.В., Бланк В.А., Подлипов В.В., Казанский Н.Л. Экспериментальное исследование дифракционных линз для работы с излучением нескольких заданных длин волн // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 1. С. 22-28. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-646

3. Tripathi N., Pavelyev V.S., But V.S., Lebedev S.A., Kumar S., Sharma P., Mishra P., Sovetkina M.A., Fomchenkov S.A., Podlipnov V.V., Platonov V. Analysis and optimization of photonics devices manufacturing technologies based on Carbon Nanotubes // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1368, Iss. 2. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022034

4. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П. Использование метаматериалов для управления скоростью распространения света в оптических структурах // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41, № 2. С. 202-207. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-202-207

5. Борминский С.А., Солнцева А.В., Скворцов Б.В. Метод оптоэлектронного контроля объёма жидкости в резервуаре // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 4. С. 552-559. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-552-559

6. Стороженко Д.В., Дзюба В.П., Кульчин Ю.Н., Амосов А.В. Экситонная оптическая нелинейность диэлектрических нанокompозитов в слабых оптических полях // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 6. С. 855-862. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-855-862

7. Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Moiseyev O.Ju., Soifer V.A. A method for the diffractive microrelief formation using the layered photoresist growth // Optics and Lasers in Engineering. 1998. V. 29, Iss. 4-5. P. 281-288. DOI: 10.1016/S0143-8166(97)00116-4

8. Скиданов Р.В., Моисеев О.Ю., Ганчевская С.В. Аддитивная технология изготовления фазовых дифракционных оптических элементов // Оптический журнал. 2016. Т. 83, № 1. С. 32-35.

9. Miklyaev Y.V., Karpeev S.V., Dyachenko P.N., Pavelyev V.S. Fabrication of three-dimensional photonic crystals by interference lithography with low light absorption // Journal of Modern Optics. 2009. V. 56, Iss. 9. P. 1133-1136. DOI: 10.1080/09500340902919469

10. Дьяченко П.Н., Карпеев С.В., Павельев В.С. Формирование и исследование трёхмерных металлodieлектрических фотонных кристаллов инфракрасного диапазона // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 4. С. 501-505.

11. Dyachenko P.N., Karpeev S.V., Fesik E.V., Miklyaev Y.V., Pavelyev V.S., Malchikov G.D. Fabrication of three-dimensional metallodielectric photonic crystals by interference lithography // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2010. V. 7713. DOI: 10.1117/12.853791

12. Dyachenko P.N., Karpeev S.V., Fesik E.V., Miklyaev Y.V., Pavelyev V.S., Malchikov G.D. The three-dimensional photonic crystals coated by gold nanoparticles // Optics Communications. 2011. V. 284, Iss. 3. P. 885-888. DOI: 10.1016/j.optcom.2010.10.006

13. Dyachenko P.N., Karpeev S.V., Pavelyev V.S. Fabrication and characterization of three-dimensional metallodielectric photonic crystals for infrared spectral region // Optics Communications. 2011. V. 284, Iss. 22. P. 5381-5383. DOI: 10.1016/j.optcom.2011.07.062

14. Cui H., Hensleigh R., Yao D., Maurya D., Priya S., Kumar P., Kang M.G., Priya Sh., Zheng X.R. Three-dimensional printing of piezoelectric materials with designed anisotropy and directional response // Nature Materials. 2019. V. 18, Iss. 3. P. 234-241. DOI: 10.1038/s41563-018-0268-1

15. Yasuda H., Miyazawa Y., Charalampidis E.G., Chong C., Kevrekidis P.G., Yang J. Origami-based impact mitigation via rarefaction solitary wave creation // Science Advances. 2019. V. 5, Iss. 5. DOI: 10.1126/sciadv.aau2835

16. Pavelyev V.S., Borodin S.A., Kazanskiy N.L., Kostyuk G.F., Volkov A.V. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface // Optics and Laser Technology. 2007. V. 39, Iss. 6. P. 1234-1238. DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.08.004
17. Абульханов С.Р., Казанский Н.Л., Досколович Л.Л., Казакова О.Ю. Методы изготовления элементов дифракционной оптики резанием на станках с ЧПУ // СТИН. 2011. № 9. P. 22-27.
18. Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings // Microelectronic Engineering. 2011. V. 88, Iss. 2. P. 170-174. DOI: 10.1016/j.mee.2010.10.006
19. Безус Е.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л. Формирование интерференционных картин затухающих электромагнитных волн для наноразмерной литографии с помощью волноводных дифракционных решёток // Квантовая электроника. 2011. Т. 41, № 8. С. 759-764.
20. Казанский Н.Л., Моисеев О.Ю., Полетаев С.Д. Формирование микрорельефа методом термического окисления плёнок молибдена // Письма в журнал технической физики. 2016. Т. 42, № 3. P. 106-110.
21. Казанский Н.Л., Степаненко И.С., Хаймович А.И., Кравченко С.В., Бызов Е.В., Моисеев М.А. Оптимизация параметров инжекционного литья мультилинз из термопластичных полимеров // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 2. С. 203-214. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-203-214
22. Проценко В.И., Казанский Н.Л., Серафимович П.Г. Анализ параметров систем детектирования множественных визуальных объектов в режиме реального времени // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 4. С. 582-591. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-582-591
23. Никитин В.С., Семёнов Э.И., Солостин А.В., Шаров В.Г., Чайка С.В. Моделирование работы «смартлинк соединения» // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 1. С. 64-72. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-64-72
24. Карпеев С.В., Устинов А.В., Хонина С.Н. Расчёт и анализ трёхволнового дифракционного фокусирующего дублета // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 2. С. 173-178. DOI: 10.18287/2412-6179-2015-40-2-173-178
25. But V.S., Kobelev A.A., Karlin E.S., Karpeev S.V. Development and investigation of micro- and nanostructures of metamaterials to form the necessary characteristics and coefficients of piezoelectric elements // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1745. DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012008
26. Tamir T., Zhang S. Resonant scattering by multilayered dielectric gratings // Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. 1997. V. 14, Iss. 7. P. 1607-1616. DOI: 10.1364/JOSAA.14.001607
27. Wei C., Liu S., Deng D., Shen J., Shao J., Fan Z. Electric field enhancement in guided-mode resonance filters // Optics Letters. 2006. V. 31, Iss. 9. P. 1223-1225. DOI: 10.1364/OL.31.001223
28. Sun T., Ma J., Wang J., Jin Y., He H., Shao J., Fan Z. Electric field distribution in resonant reflection filters under normal incidence // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2008. V. 10, Iss. 12. DOI: 10.1088/1464-4258/10/12/125003
29. Дифракционная оптика и нанофотоника / под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2014. 608 с.

DEVELOPMENT OF MICROSTRUCTURES FOR THE FORMATION OF METAMATERIAL PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC ELEMENTS

© 2022

V. S. But Postgraduate Student, Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC Crystallography and Photonics, RAS; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; mister_byt@mail.ru

A. A. Kobelev Postgraduate Student; Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC Crystallography and Photonics, RAS; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; kobelevanton89@mail.ru

S. V. Karpeev Doctor of Science (Phys. & Math.), Professor of the Department of Nanoengineering, Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC Crystallography and Photonics, RAS; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; karp@smr.ru

Microcells were designed for subsequent modeling of piezoelectric and optical elements on their basis. The development of piezoelectric and optical elements from microcells was carried out and models were prepared for 3D printing. These designs can be used in practice as piezoacoustic or piezoelectric sensors if piezoelectric powder is added to their composition, for example, in ultrasonic flow meters, or used to create optical structures, for example, diffractive optical elements. The key characteristics and coefficients of piezoelectric structures, such as dielectric constant, conversion coefficient, dielectric loss coefficient, mechanical Q-factor, frequency constant, electromechanical coupling coefficient, piezoelectric charge coefficient, piezoelectric stress coefficient, elastic compliance coefficient, degradation rate, Curie point are analyzed. Elements produced by 3D printing will have properties different from those of elements produced by standard methods. These structures open up new opportunities for the development of ultrasonic research, mechanical engineering and instrument making.

Nanostructure; piezoelectric; piezoacoustics; optical structures; nanoelement; piezoelectric element; piezoelectric material; ultrasonic measurements; 3D printing

Citation: But V.S., Kobelev A.A., Karpeev S.V. Development of microstructures for the formation of metamaterial properties of piezoelectric elements. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 4. P. 97-108. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-97-108

References

1. Andrianova A.V., Vinogradova I.L., Sultanov A.Kh., Meshkov I.K., Abdrakhmanova G.I., Grakhova E.P., Ishmiyarov A.A., Yantilina L.Z. An approach to synthesizing a 3D nanostructured glass-ceramic material based on intensive high-pressure torsion. *Computer Optics*. 2016. V. 40, no. 4. P. 489-500. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500
2. Skidanov R.V., Doskolovich L.L., Ganchevskaya S.V., Blank V.A., Podlipnov V.V., Kazanskiy N.L. Experiment with a diffractive lens with a fixed focus position at several given wavelengths. *Computer Optics*. 2020. V. 44, no. 1. P. 22-28. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-646
3. Tripathi N., Pavelyev V.S., But V.S., Lebedev S.A., Kumar S., Sharma P., Mishra P., Sovetkina M.A., Fomchenkov S.A., Podlipnov V.V., Platonov V. Analysis and optimization of photonics devices manufacturing technologies based on Carbon Nanotubes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1368, Iss. 2. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/2/022034
4. Glushchenko A.G., Glushchenko E.P. The use of metamaterials to control the speed of light propagation in optical structures. *Computer Optics*. 2017. V. 41, no. 2. P. 202-207. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-202-207

5. Borminsky S.A., Solntseva A.V., Skvortsov B.V. A method for optoelectronic control of liquid volume in a tank. *Computer Optics*. 2016. V. 40, no. 4. P. 552-559. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-552-559
6. Storozhenko D.V., Dzyuba V.P., Kulchin Yu.N., Amosov A.V. Exciton optical nonlinearity of dielectric nanocomposites in weak optical fields. *Computer Optics*. 2016. V. 40, no. 6. P. 855-862. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-855-862
7. Volkov A.V., Kazanskiy N.L., Moiseyev O.Ju., Soifer V.A. A method for the diffractive microrelief formation using the layered photoresist growth. *Optics and Lasers in Engineering*. 1998. V. 29, Iss. 4-5. P. 281-288. DOI: 10.1016/S0143-8166(97)00116-4
8. Skidanov R.V., Moiseev O.Yu., Ganchevskaya S.V. Additive process for fabrication of phased optical diffraction elements. *Journal of Optical Technology*. 2016. V. 83, Iss. 1. P. 23-25. DOI: 10.1364/JOT.83.000023
9. Miklyaev Y.V., Karpeev S.V., Dyachenko P.N., Pavelyev V.S. Fabrication of three-dimensional photonic crystals by interference lithography with low light absorption. *Journal of Modern Optics*. 2009. V. 56, Iss. 9. P. 1133-1136. DOI: 10.1080/09500340902919469
10. Dyachenko P.N., Karpeev S.V., Pavelyev V.S. Fabrication and investigation of three-dimensional metallodielectric photonic crystals for infrared range. *Computer Optics*. 2010. V. 34, no. 4. P. 501-505. (In Russ.)
11. Dyachenko P.N., Karpeev S.V., Fesik E.V., Miklyaev Y.V., Pavelyev V.S., Malchikov G.D. Fabrication of three-dimensional metallodielectric photonic crystals by interference lithography. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2010. V. 7713. DOI: 10.1117/12.853791
12. Dyachenko P.N., Karpeev S.V., Fesik E.V., Miklyaev Y.V., Pavelyev V.S., Malchikov G.D. The three-dimensional photonic crystals coated by gold nanoparticles. *Optics Communications*. 2011. V. 284, Iss. 3. P. 885-888. DOI: 10.1016/j.optcom.2010.10.006
13. Dyachenko P.N., Karpeev S.V., Pavelyev V.S. Fabrication and characterization of three-dimensional metallodielectric photonic crystals for infrared spectral region. *Optics Communications*. 2011. V. 284, Iss. 22. P. 5381-5383. DOI: 10.1016/j.optcom.2011.07.062
14. Cui H., Hensleigh R., Yao D., Maurya D., Priya S., Kumar P., Kang M.G., Priya Sh., Zheng X.R. Three-dimensional printing of piezoelectric materials with designed anisotropy and directional response. *Nature Materials*. 2019. V. 18, Iss. 3. P. 234-241. DOI: 10.1038/s41563-018-0268-1
15. Yasuda H., Miyazawa Y., Charalampidis E.G., Chong C., Kevrekidis P.G., Yang J. Origami-based impact mitigation via rarefaction solitary wave creation. *Science Advances*. 2019. V. 5, Iss. 5. DOI: 10.1126/sciadv.aau2835
16. Pavelyev V.S., Borodin S.A., Kazanskiy N.L., Kostyuk G.F., Volkov A.V. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface. *Optics and Laser Technology*. 2007. V. 39, Iss. 6. P. 1234-1238. DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.08.004
17. Abul'khanov S.R., Kazanskii N.L., Doskolovich L.L., Kazakova O.Y. Manufacture of diffractive optical elements by cutting on numerically controlled machine tools. *Russian Engineering Research*. 2011. V. 31, Iss. 12. P. 1268-1272. DOI: 10.3103/S1068798X11120033
18. Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings. *Microelectronic Engineering*. 2011. V. 88, Iss. 2. P. 170-174. DOI: 10.1016/j.mee.2010.10.006
19. Bezus E.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L. Interference pattern generation in evanescent electromagnetic waves for nanoscale lithography using waveguide diffraction gratings. *Quantum Electronics*. 2011. V. 41, Iss. 8. P. 759-764. DOI: 10.1070/QE2011v041n08ABEH014500

20. Kazanskiy N.L., Moiseev O.Y., Poletayev S.D. Microprofile formation by thermal oxidation of molybdenum films. *Technical Physics Letters*. 2016. V. 42, Iss. 2. P. 164-166. DOI: 10.1134/s1063785016020085

21. Kazanskiy N.L., Stepanenko I.S., Khaimovich A.I., Kravchenko S.V., Byzov E.V., Moiseev M.A. Injectional multilens molding parameters optimization. *Computer Optics*. 2016. V. 40, no. 2. P. 203-214. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-203-214

22. Protsenko V.I., Kazanskiy N.L., Serafimovich P.G. Real-time analysis of parameters of multiple object detection systems. *Computer Optics*. 2015. V. 39, no. 4. P. 582-591. (In Russ.). DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-582-591

23. Nikitin V.S., Semyonov E.I., Solostin A.V., Sharov V.G., Chayka S.V. Modeling the 'Smartlink connection' performance. *Computer Optics*. 2016. V. 40, no. 1. P. 64-72. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-1-64-72

24. Karpeev S.V., Ustinov A.V., Khonina S.N. Design and analysis of a three-wave diffraction focusing doublet. *Computer Optics*. 2016. V. 40, no. 2. P. 173-178. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-6179-2015-40-2-173-178

25. But V.S., Kobelev A.A., Karlin E.S., Karpeev S.V. Development and investigation of micro- and nanostructures of metamaterials to form the necessary characteristics and coefficients of piezoelectric elements. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1745. DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012008

26. Tamir T., Zhang S. Resonant scattering by multilayered dielectric gratings. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 1997. V. 14, Iss. 7. P. 1607-1616. DOI: 10.1364/JOSAA.14.001607

27. Wei C., Liu S., Deng D., Shen J., Shao J., Fan Z. Electric field enhancement in guided-mode resonance filters. *Optics Letters*. 2006. V. 31, Iss. 9. P. 1223-1225. DOI: 10.1364/OL.31.001223

28. Sun T., Ma J., Wang J., Jin Y., He H., Shao J., Fan Z. Electric field distribution in resonant reflection filters under normal incidence. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2008. V. 10, Iss. 12. DOI: 10.1088/1464-4258/10/12/125003

29. *Difraktsionnaya optika i nanofotonika / pod red. V.A. Soifera* [Diffractive optics and nanophotonics / ed. by V.A. Soifer]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2014. 608 p.