



УДК 538.951

Н. В. Мухин, Д. Н. Редька, С. А. Тарасов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)  
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 197376

А. Ю. Осеев  
Магдебургский университет Отто фон Герике, Германия  
2, Universitätsplatz, Magdeburg, Deutschland, 39106

З. Хирш  
Бранденбургский университет прикладных наук, Германия  
50, Magdeburger Str., Brandenburg an der Havel, Deutschland, 14770

## Двумерная периодическая композитная структура для акустического датчика объемных свойств жидкости<sup>1</sup>

**Аннотация.** Описывается композитная структура, представляющая собой стальную матрицу с периодической двумерной системой цилиндрических отверстий, заполненных углеводородной смесью. Изучены упругие колебания такой периодической структуры для применения в акустических датчиках жидкого топлива. Теоретические исследования композитной структуры показали возможность возбуждать в ней аксиально-симметричные и крутильные резонансные моды в частотном диапазоне с высоким коэффициентом отражения структуры, которые проявляются как окна с узкой полосой пропускания. Экспериментальные исследования подтвердили существование таких резонансных частот с характерными структурами акустических волн, причем аксиально-симметричная резонансная мода оказалась более выраженной. Измерения различных смесей бензина и этанола показывают, что датчик имеет значительную чувствительность для различения обычных видов топлива, смесей на основе бензина и присутствия добавок в стандартных видах топлива.

**Ключевые слова:** периодические композитные структуры, фоновые кристаллы, структурный резонанс, датчик состава жидкости

**Для цитирования:** Двумерная периодическая композитная структура для акустического датчика объемных свойств жидкости / Н. В. Мухин, Д. Н. Редька, С. А. Тарасов, А. Ю. Осеев, З. Хирш // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 1. С. 56–63.

N. V. Mukhin, D. N. Redka, S. A. Tarasov  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"  
5, Professor Popov Str, 197376, St. Petersburg, Russia  
A. Yu. Oseev

Otto von Guericke University Magdeburg  
2, Universitätsplatz, Magdeburg, Deutschland, 39106  
S. Hirsch

Brandenburg University of Applied Sciences, Germany  
50, Magdeburger Str., Brandenburg an der Havel, Deutschland, 14770

## Two-Dimensional Periodic Composite Structure for Acoustic Sensor of Volumetric Properties of Liquids

**Abstract.** The object of the study is acoustic metamaterial, which is a steel matrix with a periodic two-dimensional system of cylindrical cavities filled with hydrocarbon mixture. The induced resonances of fluid in cylindrical cavities of the periodic structure are studied for application in liquid fuel sensors. Theoretical studies of the structure show the possibility of

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках программы "Михаил Ломоносов" (проект № 3.10001.2017/DAAD).

*exciting axisymmetric and spinning resonance modes in it in the frequency range with a high reflection coefficient of the structure, which manifest themselves as windows with a narrow bandwidth. Experimental studies confirm the existence of such resonances, and the asymmetric resonance mode is more evident. Measurements of various mixtures of gasoline and ethanol show that the sensor has significant sensitivity for distinguishing between conventional fuels, gasoline-based mixtures and the presence of additives in standard fuels.*

**Key words:** periodic composite structures, phononic crystals, structural resonance, liquid composition sensor.

**For citation:** Mukhin N. V., Redka D. N., Tarasov S. A., Oseev Yu., Hirsch S. A. Two-Dimensional Periodic Composite Structure for Acoustic Sensor of Volumetric Properties of Liquids. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 1, pp. 56–63. (In Russian)

**Введение.** Разработка структурно-организованных сред, представляющих собой периодические композиты из двух материалов с достаточным акустическим контрастом, позволяет создавать композитные материалы с искусственными акустическими свойствами, зависящими не только от свойств составляющих композит веществ, но и от геометрии, симметрии и периодичности структур [1], [2]. Такие материалы называют фоннными кристаллами.

Распространение через такие структуры акустических волн характеризуется наличием диапазонов частот (так называемых запрещенных зон), в пределах которых звук не может распространяться через структуру, так как происходит почти полное отражение или рассеяние падающих акустических волн. Поскольку наряду с другими параметрами акустические свойства композитной структуры зависят от свойств материалов, составляющих композит, их изменение вызывает изменение реакции структуры на воздействие акустических волн. Эта особенность позволяет применять периодические композитные системы "твердое тело – жидкость" при создании акустических датчиков детектирования объемных свойств жидкости, принципы которых демонстрировались в нескольких предыдущих работах [3]–[5]. Как было показано ранее, управлять положением изолированных узких полос пропускания на шкале частот удобнее, чем смещением положения краев запрещенной зоны. По этой причине идея датчиков на основе акустических периодических композитных систем была основана на получении изолированных максимумов или минимумов на частотных зависимостях коэффициентов пропускания или отражения, которые соответствуют материальным свойствам жидкого компонента. В отличие от хорошо разработанных микроакустических сенсоров жидкостей подход к устройству датчика на основе периодических композитных структур "твердое тело – жидкость" позволяет определять скорость звука в жидком анализируемом веществе.

Подобно ультразвуковому методу, используемому в датчике скорости, датчики на основе фоннных кристаллов позволяют оценивать термодинамические свойства жидкости, анализируя скорость звука в определенном диапазоне давлений. Межмолекулярные взаимодействия отражаются в изменении сжимаемости жидкости, которое может быть обнаружено при зондировании анализируемой жидкости методами ультразвуковой велосимметрии. Предложенный в настоящей статье подход позволяет сохранить преимущества методов велосимметрии и в то же время применить принцип измерения, основанный на управлении структурными резонансами, подобно микроакустическим сенсорным устройствам [6]. В некоторых из предыдущих работ авторов статьи уже демонстрировались дизайны датчиков на основе фоннного кристалла, где была показана прямая корреляция реакции периодической структуры с объемными свойствами анализируемой жидкости (точнее, скоростью звука в ней) [7], [8].

В зависимости от области применения можно подчеркнуть некоторые преимущества сенсорного устройства на основе фоннного кристалла. В [9], [10] показано, что применение периодических структур для детектирования свойств углеводородных смесей имеет преимущества в нескольких аспектах. Установлено, что скорость звука в образцах смесей зависит от их состава, а различие в скоростях звука между различными смесями является достаточно большим для обнаружения.

Одной из наиболее полезных особенностей концепции датчика, основанной на фоннных структурах, является возможность отделять электрическую измерительную цепь от анализируемой жидкости. В связи с тем, что зондирование проводится с помощью внешних пьезоэлектрических преобразователей, анализируемая жидкость только акустически связана с внешней измерительной цепью, которая обеспечивает безопасную работу схемы измерения в аварийном случае. По сравнению с методами спектроскопии импеданса, когда анализируемая жидкость является частью электрической цепи [11], [12], система развязан-

ных датчиков, основанная на периодических структурах, позволяет минимизировать риск взрыва, а также применять такие датчики для линейного анализа непосредственно как интегрированная часть трубопроводов. Анализ нефтепродуктов на разных этапах производства и транспортировки – широкая инженерная область, в рамках которой по-прежнему приходится решать различные задачи, например безопасного контроля свойств топлива с помощью неинвазивных поточных методов. Разработка встроенных аналитических систем связана с прямым контролем над взрывоопасными и воспламеняющимися потоками, что значительно сужает число применимых подходов.

Целью работы, описываемой в настоящей статье, являлось исследование возможностей использования акустических периодических структур в датчиках объемных свойств жидкости.

**Теория.** Объектом исследования в описываемой работе является фоновый кристалл "твердое тело – жидкость", представляющий собой стальную матрицу с периодической структурой отверстий цилиндрической формы, заполненных анализируемой жидкостью. Теоретическая часть работы связана с изучением акустических резонансов в жидкости в отверстиях периодической композитной структуры. Анализ спектров пропускания периодических композитных структур проводился на основе численного моделирования с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics [13].

Распространение акустических волн в упругой среде определяется уравнением

$$\rho \frac{\partial^2 u_i(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = \sum_{j,m,n} \frac{d}{dx_i} \left[ C_{ijmn} \frac{\partial^2 u_n(\mathbf{r}, t)}{\partial x_m^2} \right],$$

где  $\rho$  – плотность;  $u_i(\mathbf{r}, t)$  – компоненты поля упругого смещения;  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  – вектор координаты;  $t$  – время;  $C_{ijmn}$  – компоненты тензора упругости.

Учитывая, что композит представляет собой периодическую структуру, для нахождения собственных резонансных решений использовали теорему Блоха, согласно которой вектор смещения может быть представлен в виде произведения распространяющейся волны и периодической функции фонового кристалла:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, \mathbf{k}) = \mathbf{u}_k(\mathbf{r}) \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}),$$

где  $\mathbf{u}_k(\mathbf{r})$  – периодическая функция  $\mathbf{r}$ ;  $\mathbf{k}$  – волновой вектор.

Пропускание структуры на определенных частотах в пределах запрещенной зоны связано с резонансами давления жидкости в цилиндрических отверстиях. Изменения давления можно описать в виде волнового уравнения для заданных граничных условий. Резонансные режимы могут быть найдены решением задачи поиска собственных частот для акустических мод в цилиндрической структуре. Основным уравнением для волны давления с гармоническими решениями является уравнение Гельмгольца, которое в цилиндрической системе координат может быть представлено следующим образом:

$$\left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{d\theta^2} + \frac{d^2}{dz^2} + k_h^2 \right) p_h(r, \theta, z) = 0,$$

где  $k_h$  – волновое число распределения  $h$ -мод;  $p_h$  – давление. Решения для распределения давления на любой заданной акустической резонансной частоте внутри цилиндрической полости могут быть получены объединением решений для полярного угла  $\theta$ , радиального вектора  $r$  и распределения акустического давления по оси  $z$ . Более подробное аналитическое описание резонансных мод давления в цилиндрических резонаторах содержится в [14].

Условия на границах раздела "твердое тело – жидкость" имеют следующий вид:

$$\mathbf{F} = -\mathbf{n}_s p,$$

где  $\mathbf{F}$  – сила нагрузки, приходящаяся на единицу площади стенки цилиндра;  $\mathbf{n}_s$  – вектор нормали, направленный из твердого тела. При этом должно соблюдаться равенство нормальных компонент вектора ускорения на границе раздела двух сред "твердое тело – жидкость":

$$(\mathbf{n}_f \cdot \mathbf{u}) \omega^2 = -\mathbf{n}_f \left( -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{q} \right),$$

где  $\mathbf{n}_f$  – вектор нормали, направленный из объема жидкости;  $\mathbf{u}$  – вектор механического смещения в твердом теле;  $\omega$  – круговая частота;  $\rho$  – плотность;  $\mathbf{q}$  – вектор ускорения, сообщенный жидкости.

Для расчета структуры резонансных мод проведен анализ собственных частот периодической композитной структуры. Для определения частотной зависимости коэффициента пропускания на

одной стороне конечной структуры ставился источник продольных гармонических акустических волн, а на противоположной – вычислялся отклик.

**Результаты моделирования.** Результат моделирования прохождения акустических волн через периодическую структуру цилиндрических отверстий в стальной матрице приведен на рис. 1. Здесь представлены зависимости коэффициента пропускания  $T$  структуры, состоящей из восьми рядов пустых цилиндрических отверстий, от частоты акустических волн. Видно, что при пустых отверстиях (кривая 1) структура имеет полосу частот, в пределах которой пропускание ослаблено.

Преодоление данного ограничения периодической структуры осуществляется введением в цилиндрические отверстия жидкости с резонансными частотами в пределах диапазона частот, где структура имеет низкий коэффициент пропускания акустических волн. На рис. 1 кривая 2 представляет пропускания при заполнении отверстия жидкостью со скоростью распространения звука 1100 м/с, кривая 3 – жидкостью со скоростью 1110 м/с. Как видно, заполнение цилиндрических отверстий жидкостью открывает узкие полосы пропускания, соответствующие резонансным частотам цилиндров с жидкостью. Вариация скорости звука в жидкости вызывает сдвиг частот

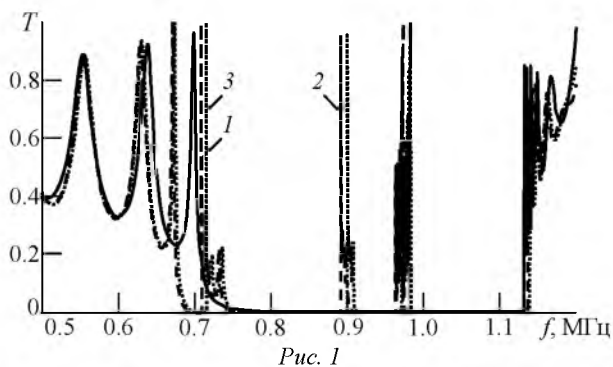


Рис. 1

резонансов, в то время как общая картина пропускания структуры остается почти неизменной.

Каждый из цилиндрических резонаторов с жидкостью окружен периодической структурой, которая обеспечивает высокий акустический контраст на границах резонатора. Как результат, может быть достигнута высокая добротность резонансных пиков. Ненулевые значения коэффициента пропускания структуры на этих частотах не приводят к значительному ослаблению сигнала на резонансных частотах цилиндрических отверстий, заполненных жидкостью.

Анализ распределения давления в жидкости на резонансных частотах в пределах полосы частот с низким коэффициентом пропускания периодической структуры показал возможность наблюдения нескольких резонансных мод (рис. 2): второй крутильной моды (а); второй аксиально-симметричной моды (б) и третьей крутильной моды (в). Эти резонансы открывают узкие полосы пропускания в амплитудно-частотной характеристике периодической композитной структуры, что позволяет использовать этот эффект для создания сенсорного устройства.

**Экспериментальные результаты.** Экспериментальная проверка сенсорного устройства на основе рассмотренной периодической композитной структуры "твердое тело – жидкость" проведена с образцами нефти различного состава. Бензин 63-80 и этанол 99.5% были предоставлены для исследований Carl Roth GmbH и Sigma-Aldrich Chemie GmbH. Образцы были приготовлены с объемной долей  $C$  этанола, равной 0, 5 и 10 %. Датчик был изготовлен в виде квадратной решетки цилиндрических отверстий диаметром 1.5 мм, расположенных с шагом 2.5 мм, выполненной на образце из нержавеющей стали толщиной 15 мм (рис. 3, а). Макет фоновый кристалла, а

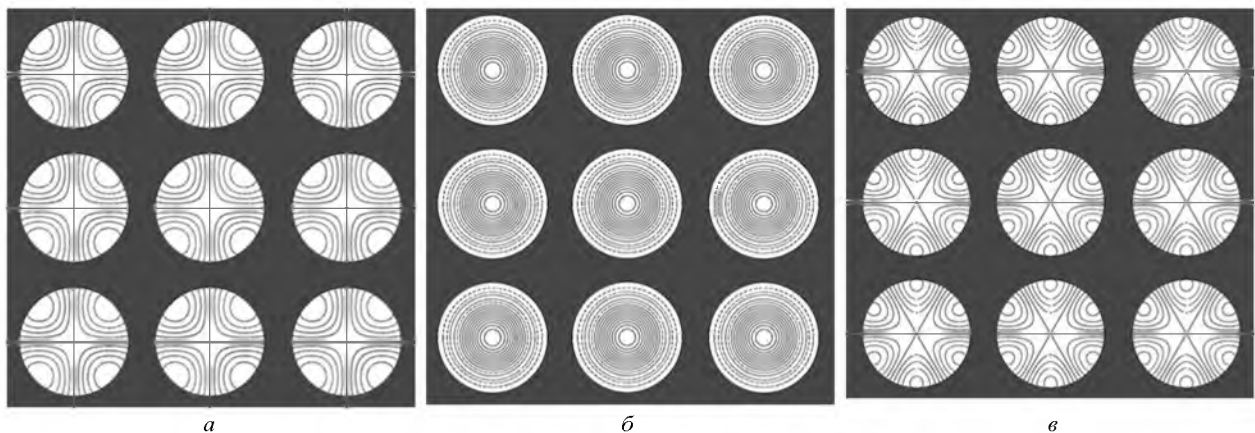


Рис. 2

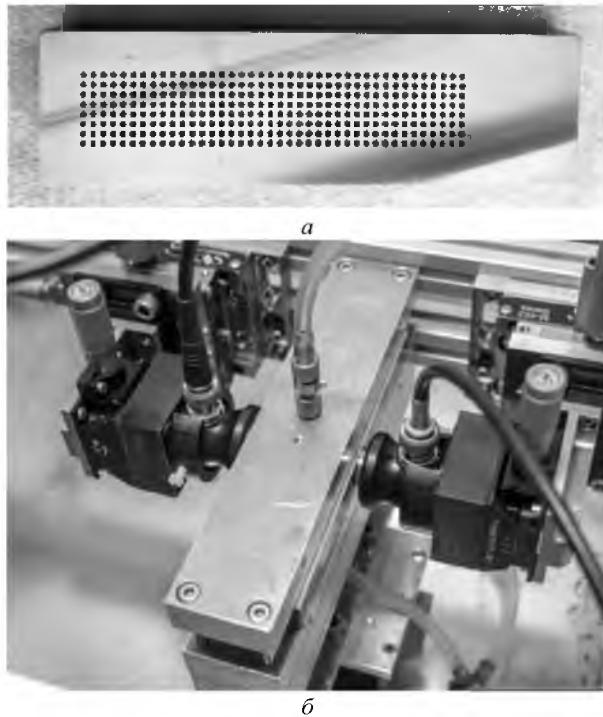


Рис. 3

также параметры и размеры были определены в результате численных расчетов. Прочность конструкции датчика, его форма и примененные материалы определены с учетом требований при промышленном применении. По практическим соображениям параметры и размеры структуры датчика рассчитаны на работу с длиной волны, соответствующей частоте зондирования около 1 МГц, которая удовлетворяет большому разнообразию внешних ультразвуковых преобразователей. Экспериментальная установка, включающая сенсорную конструкцию, систему подвода жидкости и сопряженные внешние пьезоэлектрические преобразователи, показана на рис. 3, б. Сочетание датчика фононного кристалла с внешней измерительной схемой выполнено акустически с использованием внешних ультразвуковых излучателей. Panametrics V103-RB зажимные контактные пьезоэлектрические преобразователи с центральной частотой 1 МГц были приведены в контакт с датчиком, использующим в качестве связующего агента глицерин (рис. 3, б).

Преобразователи возбуждают и получают продольные акустические волны перпендикулярно осям цилиндрических отверстий. Анализируемая жидкость заполняет отверстия. Схема измерения не включает в себя какие-либо согласующие устройства; следовательно, ультразвуковые преобразователи напрямую связаны коаксиальными кабелями с сетевым анализатором. Измере-

ния параметров периодической композитной структуры, заполненной анализируемым топливом, осуществлялись приборами Agilent4395A и Agilent 87511A (100 кГц...500 МГц). Данные о спектрах пропускания и отражения были получены из результатов измерения параметров структуры и преобразователей в контакте.

Частотные зависимости коэффициентов пропускания  $T$  и отражения  $R$  периодической композитной структуры для смесей бензина 63-80 с этанолом в объемных долях 0, 5 и 10 % показаны на рис. 4, а и б соответственно. Зависимость резонансной частоты от объемной доли этанола показана на рис. 4, в.

Экспериментальная проверка периодической структуры, заполненной жидкостью, выявила наиболее отчетливый структурный резонанс на частоте, соответствующей второй аксиально-симметричной моде. Крутильные моды значительно ослаблены по сравнению с этой модой и не раз-

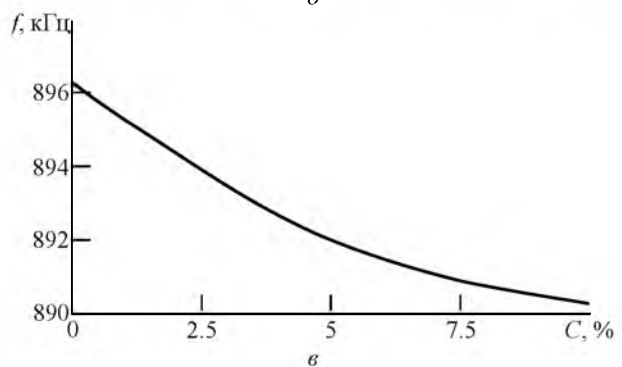
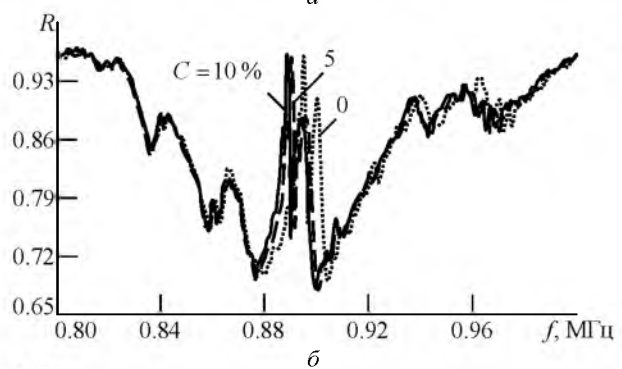
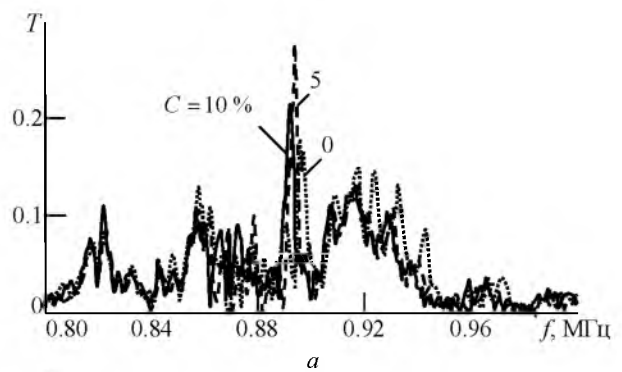


Рис. 4

личаются. Причина высокого подавления крутильных мод объясняется относительно небольшой толщиной структуры (15 мм), которая искажает крутильные резонансные моды на открытых границах цилиндров.

**Заключение.** В настоящей статье представлены результаты изучения распространения упругих колебаний и резонансных частот для периодической композитной структуры "твердое тело – жидкость" с целью применения в датчиках жидкого топлива. Продемонстрированы теоретические результаты исследований двумерных периодических структур при проектировании акустических датчиков объемных свойств жидкостей на их основе. Сенсорное устройство состоит из системы периодически расположенных заполненных жидкостью цилиндрических отверстий в стальной матрице, которые, с одной стороны, служат рассеивающими центрами фононного кристалла, а с другой – пространственно распределенными резонаторами. Теоретические исследования структуры показали возможность воз-

буждать в ней аксиально-симметричные и крутильные резонансные моды в частотном диапазоне низких значений коэффициента пропускания структуры, которые проявляются как окна с узкой полосой пропускания. Экспериментальные исследования данной сенсорной системы подтвердили существование резонансов, соответствующих теоретическим прогнозам. Аксиально-симметричная мода была обнаружена экспериментально и оказалась более выраженной. Обнаружено, что крутильные резонансные моды сильно ослаблены из-за конечной толщины исследованной структуры. Измерения различных смесей бензина и этанола показывают, что датчик имеет значительную чувствительность для различения обычных видов топлива, смесей на основе бензина и присутствия добавок в стандартных видах топлива. Продемонстрированные теоретические и экспериментальные результаты могут быть ценными для нефтяной промышленности и других приложений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acoustic Bandstructure of Periodic Elastic Composites / M. S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 71, № 13. P. 2022–2025.
2. Sigalas M., Economou E. N. Band Structure of Elastic Waves in Two-Dimensional Systems // *Solid State Commun.* 1993. Vol. 86, iss. 3. P. 141–143.
3. Lucklum R., Li J. Phononic Crystals for Liquid Sensor Applications // *Meas. Sci. Technol.* 2009. Vol. 20, № 12. P. 124014.
4. Lucklum R., Ke M., Zubtsov M. Two-Dimensional Phononic Crystal Sensor Based on a Cavity Mode // *Sens. Actuators B.* 2012. Vol. 171. P. 271–277.
5. Lucklum R., Zubtsov M., Oseev A. Phononic Crystals – a New Platform for Chemical and Biochemical Sensors // *Anal. Bioanal. Chem.* 2013. Vol. 405, iss. 20. P. 6497–6509.
6. Microacoustic Sensors for Liquid Monitoring / F. Herrmann, B. Jakoby, J. Rabe, S. Büttgenbach // *Sens. Update.* 2001. Vol. 9, iss. 1, P. 105–160.
7. Phononic Crystal Sensor for Liquid Property Determination / A. Oseev, R. Lucklum, M. Ke, M. Zubtsov, R. Grundmann // *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration 2012*, 12–14 March 2012, San Diego, United States. *Proc. SPIE – Intern. Society for Optics and Photonics*, 2012. Vol. 8346. P. 834607.
8. Determining Liquid Properties by Extraordinary Acoustic Transmission Through Phononic Crystals / R. Lucklum, M. Zubtsov, M. Ke, A. Oseev, U. Hempel, B. Henning (Eds.) // *10th IEEE SENSORS Conf.*, 28–31 Oct. 2011, Limerick, Ireland. *Proc. of IEEE Sensors*. 2011. № 6126939. P. 1554–1557.
9. Oseev A., Zubtsov M., Lucklum R. Octane Number Determination of Gasoline with a Phononic Crystal Sensor // *Procedia Eng.* 2012. Vol. 47. P. 1382–1385.
10. Oseev A., Zubtsov M., Lucklum R. Gasoline Properties Determination with Phononic Crystal Cavity Sensor // *Sens. Actuators B.* 2013. Vol. 189. P. 208–212.
11. Two-Component Dielectric Dispersion Impedance Biosensor for In-Line Protein Monitoring / A. Oseev, M.-P. Schmidt, S. Hirsch, A. Brose, B. Schmidt // *Sens. Actuators B.* 2017. Vol. 239. P. 1213–1220.
12. Flexible Free-Standing SU-8 Microfluidic Impedance Spectroscopy Sensor for 3-Dmolded Interconnect Devices Application / M.-P. Schmidt, A. Oseev, C. Engel, A. Brose, B. Schmidt, S. Hirsch // *J. Sens. Sens. Syst.* 2016. Vol. 5. P. 55–61.
13. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата обращения: 20.02.2018).
14. Rona A. The Acoustic Resonance of Rectangular and Cylindrical Cavities // *J. Algorithms Comput. Technol.* 2007. Vol. 1, iss. 3. P. 329–356.

**Мухин Николай Вячеславович** – кандидат технических наук (2013), доцент (2017) кафедры квантовой электроники и оптико-электронных приборов Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных публикаций. Сфера научных

интересов – исследование физико-химических и фотоэлектрических свойств тонкопленочных гетерофазных систем "сегнетоэлектрик – полупроводник"; разработка фотонных и фононных метаматериалов.

E-mail: muhinnv\_leti@mail.ru

**Редька Дмитрий Николаевич** – кандидат технических наук (2016), ассистент кафедры квантовой электроники и оптико-электронных приборов Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 20 научных публикаций. Сфера научных интересов – материалы для солнечной энергетики; лазерная техника и технологии.

E-mail: rd89@bk.ru

**Тарасов Сергей Анатольевич** – доктор технических наук (2016), заведующий кафедрой квантовой электроники и оптико-электронных приборов Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 91 научной публикации. Сфера научных интересов – органическая фотоника; светодиодные технологии; фотоэлектроника; приборы оптоэлектроники на основе квантово-размерных наноструктур.

E-mail: SATarasov@mail.ru

**Осеев Александр Юрьевич** – Ph.D. (2017, Институт микро- и сенсорных систем Магдебургского университета Отто фон Герике, Германия), научный сотрудник данного университета. Автор 24 научных публикаций. Сфера научных интересов – жидкостные датчики, в частности, датчики на основе фононного кристалла; микроакустические датчики; микрофлюидные сенсорные системы; разработка новых концепций микрофлюидных датчиков Lab-on-a-Chip для миниатюрных биомедицинских и промышленных применений.

E-mail: alexandr.oseev@gmail.com

**Зерен Хирш** – Ph.D. (2006), профессор Бранденбургского университета прикладных наук, Германия. Автор 68 научных публикаций. Сфера научных интересов – кремниевые микросистемы и новые технологии корпусирования.

E-mail: soeren.hirsch@fh-brandenburg.de

## REFERENCES

1. Kushwaha M. S., Halevi P., Dobrzynski L., Djafari-Rouhani B. Acoustic Bandstructure of Periodic Elastic Composites. *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 71, no. 13. P. 2022–2025.
2. Sigalas M., Economou E. N. Band Structure of Elastic Waves in Two-Dimensional Systems. *Solid State Commun.* 1993, vol. 86, no. 3, pp. 141–143.
3. Lucklum R., Li J. Phononic Crystals for Liquid Sensor Applications. *Meas. Sci. Technol.* 2009, 20 (12), p. 124014.
4. Lucklum R., Ke M., Zubtsov M. Two-Dimensional Phononic Crystal Sensor Based on a Cavity Mode. *Sens. Actuators B.* 2012, vol. 171, pp. 271–277.
5. Lucklum R., Zubtsov M., Oseev A. Phoxonic Crystals—a New Platform for Chemical and Biochemical Sensors. *Anal. Bioanal. Chem.* 2013, vol. 405, no. 20, pp. 6497–6509.
6. Herrmann F., Jakoby B., Rabe J., Büttgenbach S. Microacoustic Sensors for Liquid Monitoring. *Sens. Update.* 2001, vol. 9, no. 1, pp. 105–160.
7. Oseev A., Lucklum R., Ke M., Zubtsov M., Grundmann R. Phononic Crystal Sensor for Liquid Property Determination. *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration* 2012, 12–14 March 2012, San Diego, United States. *Proc. SPIE – International Society for Optics and Photonics.* 2012, vol. 8346, p. 834607
8. Lucklum R., Zubtsov M., Ke M., Oseev A., Hempel U., Henning B. Determining Liquid Properties by Extraordinary Acoustic Transmission Through Phononic Crystals. 10th IEEE SENSORS Conference, 28–31 Oct. 2011, Limerick, Ireland. *Proc. of IEEE Sensors.* 2011, no. 6126939, pp. 1554–1557.
9. A. Oseev, M. Zubtsov, R. Lucklum. Octane Number Determination of Gasoline with a Phononic Crystal Sensor. *Procedia Eng.* 2012, vol. 47, p. 1382–1385.
10. Oseev A., Zubtsov M., Lucklum R.. Gasoline Properties Determination with Phononic Crystal Cavity Sensor. *Sens. Actuators B.* 2013, vol. 189, p. 208–212.
11. Oseev A., Schmidt M.-P., Hirsch S., Brose A., Schmidt B. Two-Component Dielectric Dispersion Impedance Bio-sensor for In-Line Protein Monitoring. *Sens. Actuators B.* 2017, vol. 239, pp. 1213–1220.
12. Schmidt M.-P., Oseev A., Engel C., Brose A., Schmidt B., Hirsch S. Flexible Free-Standing SU-8 Microfluidic Impedance Spectroscopy Sensor for 3-Dmolded Interconnect Devices Application. *J. Sens. Sens. Syst.* 2016, vol. 5, p. 55–61.
13. Available at: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (accessed: 20.02.2018).
14. Rona A. The Acoustic Resonance of Rectangular and Cylindrical Cavities. *J. Algorithms Comput. Technol.*, 2007, vol. 1, no. 3, pp. 329–356.

Received November, 20, 2017

**Nikolay V. Mukhin** – Ph.D. in Engineering (2013), Associate Professor of the Department of Quantum Electronic and Optics Electronic Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: study of physicochemical and photoelectric properties of thin-film heterophase ferroelectric-semiconductor systems, development of photonic and phonon metamaterials.

E-mail: muhinnv\_leti@mail.ru

**Dmitry N. Red'ka** – Ph.D. in Engineering (2016), Assistant of the Department of Quantum Electronic and Optics Electronic Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: materials for solar energy, laser technology.

E-mail: rd89@bk.ru

**Sergey A. Tarasov** – D.Sc. in Engineering (2016), Chief of the Department of Quantum Electronic and Optics Electronic Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 91 scientific publications. Area of expertise: organic photonics, LED technology, photoelectronics, devices based on quantum-based optoelectronics nanostructures.

E-mail: SATarasov@mail.ru

**Aleksandr Yu. Oseev** – Ph.D. (2017), Researcher of the Department of Sensorics of Institute of Micro and Sensor Systems (IMOS), Otto von Guericke University Magdeburg, Germany. The author of 24 scientific publications. Area of expertise: fluidic sensors, more specifically, phononic crystal based sensors, microacoustic sensors, microfluidic sensor platforms, development of novel Lab-on-a-Chip microfluidic sensor concepts for miniaturised biomedical and industrial applications.

E-mail: alexandr.oseev@gmail.com

**Soeren Hirsch** – Ph.D. (2006), Professor of the University of Applied Science, Brandenburg. The author of 68 scientific publications. Area of expertise: silicon based microsystems and new packaging technologies.

E-mail: soeren.hirsch@fh-brandenburg.de

---