



УДК 534.2, 534-18.

*В.П. Пащенко***УПРАВЛЯЕМЫЙ ФОНОННЫЙ КРИСТАЛЛ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ НА ОСНОВЕ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР***V.P. Pashchenko*St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia**CONTROLLED SURFACE ACOUSTIC WAVE PHONONIC CRYSTAL
BASED ON INDUCED PERIODIC DOMAINS**

Предложен новый тип фононного кристалла, управляемого путем индуцирования внешним постоянным электрическим полем периодических доменных структур в тонкой сегнетоэлектрической пленке. Представлены результаты конечно-элементного моделирования частотной зависимости коэффициента прохождения, а также дисперсионные кривые для первой зоны Бриллюэна. Показано изменение ширины запрещенной зоны этого фононного кристалла при изменении электрического поля, индуцирующего пьезоэлектрические периодические доменные структуры в сегнетоэлектрической пленке.

УПРАВЛЯЕМЫЙ ФОНОННЫЙ КРИСТАЛЛ, НАВЕДЕННЫЙ ПЬЕЗОЭФФЕКТ, ПОВЕРХНОСТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ, ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ДОМЕНЫ, СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЛЕНКА.

A novel type of controllable phononic crystal controlled by external static electric field that induced periodic domains in ferroelectric thin film has been proposed. Finite element simulation results of frequency dependent of transmission coefficient and dispersion curves at first Brillouin zone are presented. The change of phononic band gap width via changing the electric field which induced the periodic domains in ferroelectric thin film was shown.

CONTROLLED PHONONIC CRYSTAL, INDUCED PIEZOEFFECT, SURFACE ACOUSTIC WAVE, PERIODIC DOMAINS, FERROELECTRIC FILM.

Периодические доменные структуры в пьезо- и сегнетоэлектриках достаточно давно привлекают внимание исследователей. На основе таких структур разработаны устройства, применяемые в акустооптике и лазерной технике [1]. В сегнетоэлектриках существуют спонтанно поляризованные домены. Для образования упорядоченных периодических доменных структур обычно используются сильные пьезоэлектрики, такие как ниобат и танталат лития, легированные ионами железа. К кристаллам прикладывают знакопеременное электрическое поле напряженностью E порядка 10^7 В/м, вследствие чего происходит образование

достаточно устойчивых доменов в соответствии со знаком электрического поля [2].

Сегнетоэлектрические кристаллы с периодическими доменными структурами представляют собой фононные кристаллы, т. е. искусственно созданные структуры, в которых существуют запрещенные зоны и зоны пропускания звука. Фононные кристаллы имеют большие перспективы использования в различных областях науки и техники, в частности в акустоэлектронике на основе фононных кристаллов могут быть построены фильтры и резонаторы.

Ранее сообщалось о создании управляемых акустоэлектронных устройств на осно-

ве фононных кристаллов с характерными сегнетоэлектрическими периодическими доменными структурами, работающих на поверхностных акустических волнах [3]. Управление такими устройствами осуществляется путем лазерного нагрева поверхности и приложения высокого напряжения смещения, что затрудняет микроминиатюризацию подобных приборов.

Нами предлагается новый тип фононного кристалла, управляемого электрическим полем. В отличие от ранее созданных, формирование его периодических структур достигается не технологическим путем (травление, напыление, наращивание дополнительных слоев), а с помощью внешнего электрического поля.

Постановка задачи

В настоящей статье представлены результаты теоретических исследований периодических доменных структур, индуцированных в пленке титаната бария стронция $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, находящегося в параэлектрической фазе. Как известно, в парафазе сегнетоэлектрик не обладает спонтанной поляризацией. В результате приложения электрического поля к сегнетоэлектрику, находящемуся в парафазе, возникает наведенный пьезоэффект, который обусловлен главным образом нелинейной электрострикцией. Этот эффект используется в перестраиваемых резонаторах на объемных акустических волнах [4, 5]. Работа таких резонаторов основана на зависимости упругих и пьезоэлектрических модулей сегнетоэлектрика от величины прикладываемого постоянного электрического поля. Указанные экспериментальные и теоретические зависимости были получены в работах [4–6].

Уравнения, связывающие напряженность прикладываемого электрического поля с этими модулями сегнетоэлектрика, имеют вид:

$$\tilde{h}_{ijm}(E_i) = h_{ijm} - 2G_{ijmn}\varepsilon_0\varepsilon_{ij}(E_i)E_j; \quad (1)$$

$$\tilde{C}_{ijmn}(E_i) = C_{ijmn} + M_{ijklmn}(\varepsilon_0\varepsilon_{ij}(E_i)E_j)^2, \quad (2)$$

где h_{ijm} – пьезоэлектрический тензор в отсутствие электрического поля (обусловлен дефектами в пленке); G_{ijmn} – тензор

электрострикции; E_i – компоненты вектора напряженности электрического поля; C_{ijmn} – тензор упругих модулей материала сегнетоэлектрика; M_{ijklmn} – тензор нелинейной электрострикции; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε_{ij} – тензор диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика.

Прикладывая периодическое электрическое поле к сегнетоэлектрику, мы получаем доменные структуры с изменяющимися пьезомодулями h_{ijm} в соответствии с периодом следования электродов. Конфигурация доменных структур зависит от электрического поля согласно уравнениям (1) и (2). Изменяя величину электрического поля, мы получаем возможность управлять параметрами запрещенных зон в фононном кристалле.

Описание конструкции управляемого фононного кристалла

Конструктивно фононный кристалл представляет собой подложку из материала с минимальным коэффициентом затухания поверхностных акустических волн. На поверхности подложки имеется нижний электрод; поверх электрода нанесена тонкая пленка сегнетоэлектрика $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (рис. 1). На пленку 1 наносятся электроды 4 с периодом p , аналогичные тем, которые используются в приборах на поверхностных акустических волнах, – встречно-штыревым преобразователям (ВШП). Между управляющими электродами 4 и нижним 2 подается постоянное напряжение смещения. Толщина сегнетоэлектрической пленки 1 составляет 0,5–1,0 мкм, что позволяет создавать напряженность электрического поля $E \approx 10^6 - 10^7$ В/м при напряжениях смещения 1–10 В.

Запишем уравнения распространения упругой волны в фононном кристалле. Система уравнений распространения волн в пьезоэлектрике имеет вид [7]:

$$\begin{cases} C_{ijmn} \frac{\partial^2 U_m}{\partial x_j \partial x_n} + e_{mij} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_m} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2}, \\ e_{ijm} \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i \partial x_m} - \varepsilon_{ij} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

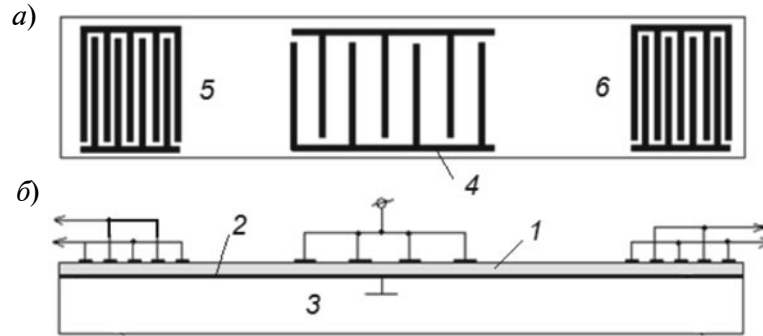


Рис. 1. Схема фонованного кристалла, управляемого электрическим полем, в двух проекциях: *a*, *b* – виды сверху и сбоку соответственно; 1 – пленка сегнетоэлектрика, 2 – нижний электрод, 3 – сапфировая подложка, 4 – управляющие электроды, 5, 6 – входной и выходной встречно-штыревые преобразователи

где U_m – механическое смещение; ρ – плотность пьезоэлектрика; φ – электрический потенциал; e_{ijm} – пьезоэлектрический тензор, который связан с тензором h_{ijm} следующей зависимостью [6]:

$$e_{ijm} = \varepsilon_0 (\varepsilon_{ij} - 1) h_{ijm}. \quad (4)$$

Как было показано выше, упругие и пьезоэлектрические модули в фонованном кристалле зависят от напряженности поля смещения.

Подставим уравнения (1) и (2) в систему (3) с учетом зависимости (4). Принимая во внимание, что напряженность электрического поля есть функция координат, т. е. $E = E(x, y, z)$, получаем систему уравнений, описывающих распространение упругой волны в фонованном кристалле:

$$\begin{aligned} & \left\{ C_{ijmn} + \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ij} (E_i(x, y, z)) \cdot M_{ijklmn} \times \right. \\ & \quad \left. \times [E_i(x, y, z)]^2 \right\} \frac{\partial^2 U_m}{\partial x_j \partial x_n} + \\ & + \varepsilon_0 \cdot \left[\varepsilon_{ij} (E_i(x, y, z)) (E_i(x, y, z)) - 1 \right] \cdot \\ & \quad \times \left\{ h_{mij} - 2\varepsilon_0 \varepsilon_{ij} (E_i(x, y, z)) \times \right. \\ & \quad \left. \times G_{ijmn} \cdot [E_i(x, y, z)]^2 \right\} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_m} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2}; \quad (5) \\ & \varepsilon_0 \cdot \left[\varepsilon_{ij} (E_i(x, y, z)) - 1 \right] \\ & \quad \times \left\{ h_{mij} - 2\varepsilon_0 \varepsilon_{ij} (E_i(x, y, z)) \cdot \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i \partial x_j} - \right. \\ & \quad \left. - \varepsilon_{ij} (E_i(x, y, z)) \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j} \right\} = 0. \end{aligned}$$

Можно предположить, что периодические домены, образовавшиеся под управляющими электродами, имеют прямоугольную конфигурацию, соответствующую форме электродов. Однако распределение электрического поля в слоистых анизотропных структурах не является равномерным, имеют место краевые эффекты на границах электродов. В таком случае конфигурация доменов будет иметь более сложную форму. Аналитически решить данную задачу довольно сложно, поэтому необходимо применить численные методы.

Нами проведено численное моделирование фонованного кристалла методом конечных элементов в двумерном случае.

Задача разбивалась на три этапа. На первом решалась задача электростатики, чтобы найти распределение электрического поля в сегнетоэлектрической пленке. На втором этапе сохраненные данные распределения электрического поля $E = E(x, y)$ использовались для решения системы уравнений (5) для двумерного случая. Материальные кон-

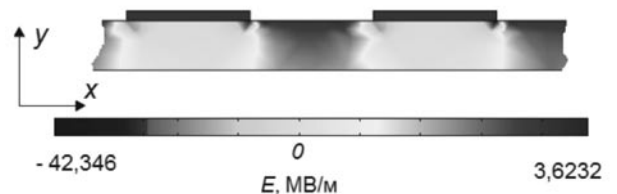


Рис. 2. Смоделированное распределение напряженности электрического поля в сегнетоэлектрической пленке 1 под управляющими электродами 4 (см. рис. 1)

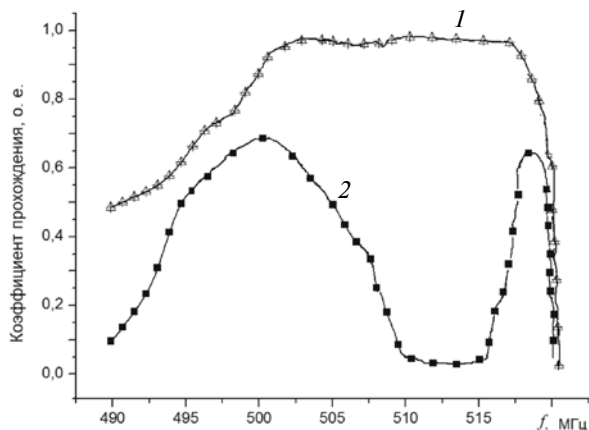


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента прохождения поверхностных акустических волн через индуцированный фононный кристалл при выключенном (1) и включенном (2) электрических полях; соответствующие напряжения смещения равны 0 (1) и 5 В (2)

станты для титаната бария были взяты из работ [4 – 6]. Результат численного моделирования распределения электрического поля под электродами показан на рис. 2, где также видны краевые эффекты.

На третьем этапе исследовалась полноразмерная модель фононного кристалла (см. рис. 1). Выполнялось моделирование возбуждения поверхностных акустических волн (ПАВ) входными ВШП, распространения ПАВ по подложке, взаимодействия с периодическими доменными структурами. С выходного ВШП получали данные о прошедшем сигнале.

На рис. 3 приведена частотная зависимость коэффициента прохождения для фононного кристалла. Для возникновения запрещенной зоны размер каждого домена должен быть равен четверти длины волны на частоте запираания, т. е. удовлетворять условию брэгговского отражения: $d = V/(4 f_b)$, где d – размер домена, V – скорость ПАВ в фононном кристалле, f_b – центральная частота запрещенной зоны. Количество доменов было принято равным 40. Для случая, указанного на рис. 3, центральная частота запрещенной зоны составляет 510 МГц, что соответствует длине волны 11 мкм. Как видно из графика, при включении электрического поля в фононном кристалле происходит «включение» запрещенной зоны.

В районе 510 МГц наблюдается спадание характеристики. В диапазоне от 510 до 517 МГц спадание происходит практически до нуля. Ширина зоны заграждения получившегося фильтра составляет около 7 МГц.

На рис. 4 представлена дисперсионная кривая в первой зоне Бриллюэна для ПАВ в фононном кристалле, рассчитанная методом конечных элементов (дисперсионные кривые для объемных волн не приведены). Расположение запрещенной зоны и ее ширина соответствует полосе заграждения полосового фильтра на рис. 3.

В данной работе проведено численное исследование нового типа управляемого фононного кристалла. В результате конечно-элементного моделирования выявлено наличие фононной запрещенной зоны для поверхностных акустических волн в структуре, состоящей из электрически индуцированных периодических доменов в сегнетоэлектрике. Показана возможность использования предложенного кристалла в качестве перестраиваемого миниатюрного фильтра на поверхностных акустических волнах. В дальнейшем планируются более подробные исследования перестройки фононного кристалла, влияния электрического поля на характеристики распространяю-

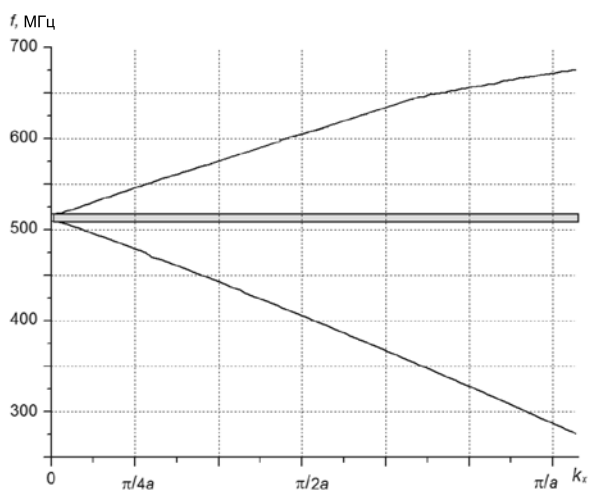


Рис. 4. Дисперсионная характеристика фононного кристалла для поверхностных акустических волн в первой зоне Бриллюэна; запрещенная зона показана серым прямоугольником в середине графика



щейся волны и на ширину запрещенной зоны. Для уменьшения влияния электродов, нагружающих поверхность волнового пространства, целесообразно рассмотреть

другие типы волн, например волноводные или волны Лява и Стоунли. Планируется также экспериментальное исследование фононного кристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shi-Ning Zhu.** Engineering ferroelectric superlattice materials and applications [Text] / Shi-Ning Zhu, Yong-Yuan Zhu, Yan-Qing Lu, Nai-Ben Ming // Proc. of the 2000 12th IEEE International Symp. – 2000. – Vol. 1. – P. 313–315.

2. **Голенищев-Кутузов, А.В.** Индуцированные домены и периодические доменные структуры в электро- и магнитоупорядоченных веществах [Текст] / А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Р.И. Калимуллин // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170. – Вып. 7. – С. 697–712.

3. **Голенищев-Кутузов, А.В.** Перестраиваемый акустический резонатор на периодических доменных структурах [Текст] / А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Р.И. Калимуллин, А.А. Потапов // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – Вып. 18. – С. 1–6.

4. **Turalchuk, P.** Electrically tunable bulk acoustic

filters with induced piezoelectric effect in BSTO film [Text] / P. Turalchuk, I. Vendik, O. Vendik, J. Berge // Proc. of the 38th European Microwave Conf. October 2008, Amsterdam: IEEE, 2008. – P. 274–277.

5. **Berge, J.** Tunable bulk acoustic wave resonators based on $Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO_3$ thin films and a HfO_2/SiO_2 Bragg reflector [Text] / J. Berge, S. Gevorgian // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2011. – Vol. 58. – P. 2768–2771.

6. **Noeth, A.** Electrical tuning of dc bias induced acoustic resonances in paraelectric thin films [Text] / A. Noeth, T. Yamada, A.K. Tagantsev, N. Setter // J. Appl. Physics. – 2008. – Vol. 104. – P. 094102-1–094102-10.

7. **Дьелесан, Э.** Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов [Текст] / Э. Дьелесан, Д. Руайе. – М.: Наука, 1982. – 424 с.

REFERENCES

1. **Shi-Ning Zhu, Yong-Yuan Zhu, Yan-Qing Lu and Nai-Ben Ming.** Ferroelectric Superlattice: Materials and Applications. Phase Transitions: A Multinational Journal. – 2000. – Vol. 72. – Iss. 4.

2. **Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Kalimullin R.I.** Induced domains and periodic domain structures in electrically and magnetically ordered materials. – 2000. – Т. 170. – Вып. 7. – S. 697–712. (rus)

3. **Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Kalimullin R.I., Potapov A.A.** Technical Physics Letters, September 2012. – Т. 38. – Вып. 18. – S. 1–6. (rus)

4. **Turalchuk P., Vendik I., Vendik O., Berge J.** Electrically Tunable Bulk Acoustic Filters with Induced Piezoelectric Effect in BSTO Film. Proceedings

of the 38th European Microwave Conference. – Amsterdam, The Netherlands. – 2008. – P. 274–277.

5. **Berge J., Gevorgian S.** Tunable Bulk Acoustic Wave Resonators Based on $Ba_{0.25}Sr_{0.75}TiO_3$ Thin Films and a HfO_2/SiO_2 Bragg Reflector. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2011. – Vol. 58. – P. 2768–2771.

6. **Noeth A., Yamada T., Tagantsev A.K., Setter N.** Electrical tuning of dc bias induced acoustic resonances in paraelectric thin films. Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 104. – P. 094102-1–094102-10.

7. **Royer D., Dieulesain E.** Elastic Waves in Solids Free and Guided Propagation. – Moscow: Nauka, 1982. – 424 p.

ПАЩЕНКО Владимир Петрович – аспирант кафедры физики и технологии наноструктур Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

v.paschenko@gmail.com