



ФИЗИКА

УДК 621.396:534

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ДВУМЕРНОМ ФОНОННОМ КРИСТАЛЛЕ НА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

С. С. Янкин^{1,2}, А. Талби², Ж.-К. Гербедеен²,
В. Л. Преображенский^{2,3}, Ф. Перно², О. Бу Матар²

¹Саратовский государственный университет

²Центральная школа Лилля, Институт электроники, микроэлектроники и нанотехнологии, совместная международная лаборатория LICS/LEMAS, Франция

³Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: YankinSS@info.sgu.ru

Методом конечных элементов проведен анализ распространения поверхностной акустической волны (ПАВ) в фононном кристалле в виде периодической решетки цилиндрических никелевых столбиков, расположенных на пьезоэлектрической подложке $Y+128^\circ$ -среза LiNbO_3 . Численно исследованы амплитудные и фазовые характеристики прохождения ПАВ через указанную структуру и проанализировано изменение ширины и центральной частоты образуемых полос непропускания при изменении геометрических параметров фононного кристалла. Результаты численных расчетов сопоставлены с данными экспериментальных измерений.

Ключевые слова: фононные кристаллы, поверхностные акустические волны, моделирование методом конечных элементов.

Surface Acoustic Wave Propagation in Two-dimensional Phononic Crystal on Piezoelectric Substrate

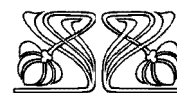
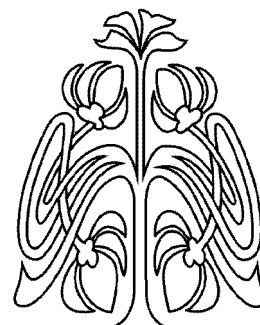
S. S. Yankin, A. Talbi, J.-C. Gerbedoen,
V. L. Preobrazhensky, P. Pernod, O. Bou Matar

Using finite element method analysis of surface acoustic wave (SAW) propagation in the phononic crystal in a form of periodic lattice from nickel pillars, located on a piezoelectric substrate of $Y+128^\circ$ -cut LiNbO_3 , has been conducted. Amplitude and phase characteristics of SAW propagation through said structure have been numerically studied and the change in the formed stopbands width and center frequency, related with geometric parameters of the phononic crystal changing, was analyzed. The numerical results were compared with the experimental measurements.

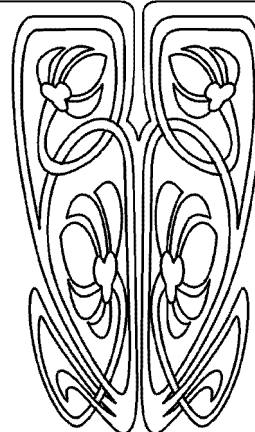
Key words: phononic crystals, surface acoustic waves, modeling using finite element method.

Введение

Под фононными кристаллами (ФК) понимают одно-, дву- и трехмерные периодические решетки из материалов со значительными отличиями в упругих свойствах или плотности. Исследовательский интерес к ФК обусловлен такими их уникальными свойствами, как формирование запрещенных зон в акустическом спектре [1, 2] и аномальная дисперсия (отрицательным отражением) упругих волн. Таким образом, свойства ФК аналогичны свойствам фотонных кристаллов в оптике и дают возможность проводить сложную



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





обработку акустического сигнала, включая демультимплексирование, фокусирование и т.п. [3]. Это, в свою очередь, открывает новые перспективы в создании и конструировании перспективных акустоэлектронных устройств (резонаторов, фильтров и датчиков). Кроме того, изготовление двумерных ФК полностью совместимо со стандартным литографическим процессом изготовления устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

За последние два десятилетия были исследованы различные конфигурации ФК, состоящих из твердотельных, жидких или газовых включений в твердотельную матрицу, например вертикальные столбики или углубления круглого сечения на поверхности подложки [4, 5]. Несколько теоретических исследований посвящено физическим принципам получения запрещенных зон в пластинах ZnO и AlN с использованием различных топологий фононных кристаллов [6, 7]. Теоретически и экспериментально доказано существование запрещенных зон для ПАВ в квадратной решетке круглых углублений в ниобате лития (LiNbO_3) [8, 9], а также квадратной решетке столбиков, нанесенных на поверхность LiNbO_3 [10, 11].

Основным аспектом в теоретическом исследовании ФК является анализ дисперсионных характеристик идеальных бесконечных решеток ФК с целью расчета зависимости частоты акустических мод от волнового вектора в пределах первой зоны Бриллюэна и определения полос пропускания и непропускания (запрещенных зон) для рассматриваемых топологий структур ФК. Как показано в [8] для случая двумерного фононного кристалла в виде цилиндрических столбиков на пьезоэлектрической подложке, расчет с использованием метода конечных элементов (МКЭ) демонстрирует наличие двух запрещенных зон, первая из которых обусловлена локальным резонансом элементов структуры ФК, а вторая – брэгговским рассеянием. Кроме того, такой анализ дает информацию о различных акустических модах с различной продольной или поперечной поляризацией, возникающих на поверхности ФК.

Другим важным аспектом теоретических исследований является расчет прохождения ПАВ через рассматриваемую структуру с использованием как аналитических методов [12], так и метода конечных элементов [10], что позволяет получить количественные (амплитудные и фазовые) характеристики рас-

пространения ПАВ. Однако во всех указанных теоретических работах возбуждение ПАВ рассматривалось без учета влияния приемопередающих встречно-штыревых преобразователей (ВШП) на амплитудно-фазовые характеристики. Учет данного влияния позволит более реалистично конструировать электроакустические устройства СВЧ диапазона.

Настоящая статья посвящена анализу характеристик прохождения ПАВ через ФК с учетом пьезоэлектрических свойств подложки и влияния ВШП. В работе численно с помощью МКЭ исследуется образование запрещенных зон для ПАВ в периодической решетке цилиндрических никелевых столбиков различной толщины на пьезоэлектрической подложке $Y+128^\circ$ -среза LiNbO_3 и приводится сравнение данных расчета с экспериментальными результатами.

Краткое описание рассматриваемой модели и метода расчета

Для моделирования и численных расчетов указанной структуры ФК были использованы возможности пакета «COMSOL Multiphysics», позволяющего решать краевые задачи для акустических волн в сложных структурах, включающих пьезоэлектрик. Была создана модель элементарной ячейки двумерного ФК, показанная на рис. 1, а. Она состоит из пьезоэлектрической подложки ($Y+128^\circ$ -срез LiNbO_3) и цилиндрического никелевого столбика, расположенного на поверхности. На рис. 1, а буквами h , r и a обозначены характерные размеры ФК: высота столбика, его радиус и период решетки соответственно. На боковых поверхностях элементарной ячейки в направлении X и Y были заданы периодические граничные условия типа Блоха–Флоке, и затем при пошаговом изменении волнового вектора в пределах первой зоны Бриллюэна (рис. 2) последовательно решалась задача на собственные частоты. Полученные в результате собственные частоты использовались для построения дисперсионных характеристик. Отметим, что в данной работе авторы фокусировались только на поверхностных модах, для этой цели в слое на дне ячейки вместо применения материала с высокой скоростью объемных акустических волн (ОАВ), что обычно использовалось в предыдущих работах [3, 4, 10], было задано нарастающее по глубине затухание. Данный прием позволяет также подавить возможные отражения от нижней грани подложки.

Для расчета спектров прохождения ПАВ использовалась модель линии задержки на ПАВ

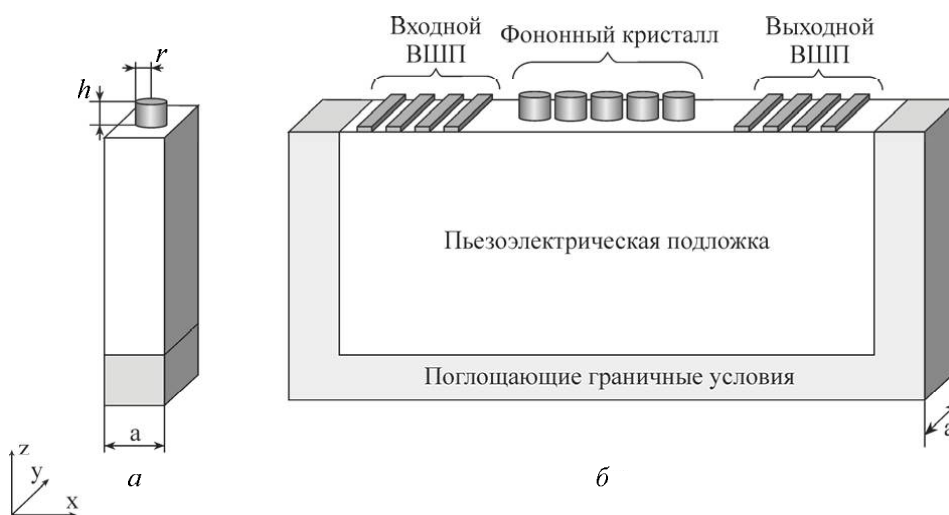


Рис. 1. Модель элементарной ячейки квадратной решетки фоновонного кристалла в виде решетки из никелевых столбиков на поверхности пьезоэлектрической подложки, h – высота столбика, r – его радиус, a – период решетки (a), и модель устройства для расчета прохождения ПАВ через фоновонный кристалл (b)

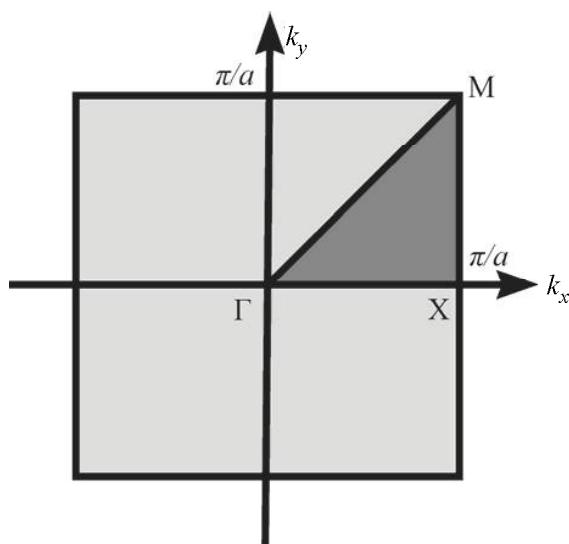


Рис. 2. Область волновых векторов в первой зоне Бриллюэна

(рис. 1, б), состоящей из двух дисперсионных ВШП и ФК, расположенного между ними. В направлении распространения X акустической волны число рядов N элементов решетки конечно, а в направлении Y предполагалась бесконечная апертура. При этом ширина модели в направлении Y была приравнена к периоду ФК a , а на боковых гранях в этом направлении были поставлены периодические граничные условия, что позволяет считать модель в этом направлении симметричной и бесконечной. Как видно на рис. 1, б, пьезоэлектрическая подложка окружена слоем с поглощающими условиями для устране-

ния нежелательных отражений от границ. Расположенные на поверхности подложки входные и выходные алюминиевые ВШП использовались для генерации ПАВ и измерения частотной зависимости функции передачи S_{21} . Сравнивая полученные данные с опорными значениями для линии задержки без ФК S_{21ref} , можно рассчитать изменение спектра прохождения по амплитуде и прирост разности фаз:

$$\Delta S_{21} = |S_{21ref}| - |S_{21}|$$

$$\Delta \varphi = Arg(S_{21}) - Arg(S_{21ref}).$$

Отметим, что в модели были использованы дисперсионные ВШП с целью расширения частотного диапазона для наблюдения всех потенциально возможных запрещенных зон.

Результаты расчетов

Взаимодействие акустических волн с рассматриваемыми структурами ФК, как показано в [3], для определенных параметров кристалла приводит к появлению двух полос непропускания в частотном спектре. Первая вызвана совокупным резонансом рассеивающих включений (в данном случае столбиков), из которых состоит ФК, а вторая связана с брэгговским рассеянием. Последняя полоса, как известно, возникает в тех случаях, когда волновой вектор k находится на границе первой зоны Бриллюэна. Центральная частота такой запрещенной зоны зависит от периода структуры и скорости ПАВ под решеткой ФК. Первая же запрещенная зона зависит в



первую очередь от геометрических параметров столбиков: формы, высоты и радиуса. В данной работе представлен анализ влияния высоты столбиков на частотные характеристики пропускания. С этой целью приведены результаты расчетов для ФК со столбиками высотой $h = 2.3$ мкм и $h = 4$ мкм при фиксированном периоде решетки ($a = 10$ мкм) и радиусе столбиков ($r = 4$ мкм).

Рассмотрим дисперсионные характеристики для вышеуказанных наборов параметров ФК (рис. 3). Отметим, что серым цветом на графиках обозначена радиационная зона (зона возбуждения объемных мод) [3, 4] для кристалла LiNbO_3 . Интересующие нас поверхностные

моды лежат вне этой зоны, ниже кривой (жирная линия), соответствующей ПАВ в отсутствие периодической структуры.

Так, для случая $h = 2.3$ мкм (см. рис. 3, а) видно, что первая запрещенная зона появляется в окрестности 165 МГц и ее ширина порядка 15%. Вторая Брэгговская полоса непропускания лежит в окрестности 200 МГц. Как видно из рис. 4, на котором изображены рассчитанные акустическим моды, соответствующие волновому вектору в точке X, первая и третья моды имеют поляризацию в плоскости XZ, а моды 2 и 4 – в плоскости YZ. Как известно, в $Y+128^\circ$ -срезе LiNbO_3 ПАВ имеет поляризацию практически строго

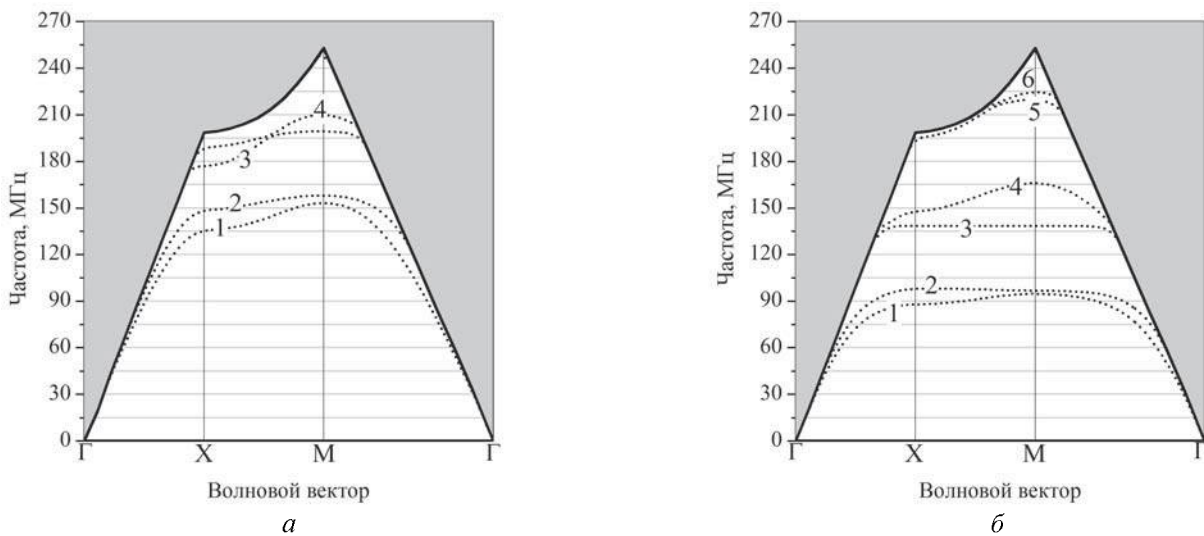


Рис. 3. Дисперсионные характеристики фонованного кристалла с периодом $a = 10$ мкм, радиусом столбиков $r = 4$ мкм и их высотой: а – $h = 2.3$ мкм, б – $h = 4$ мкм. Цифрами обозначены номера акустических мод

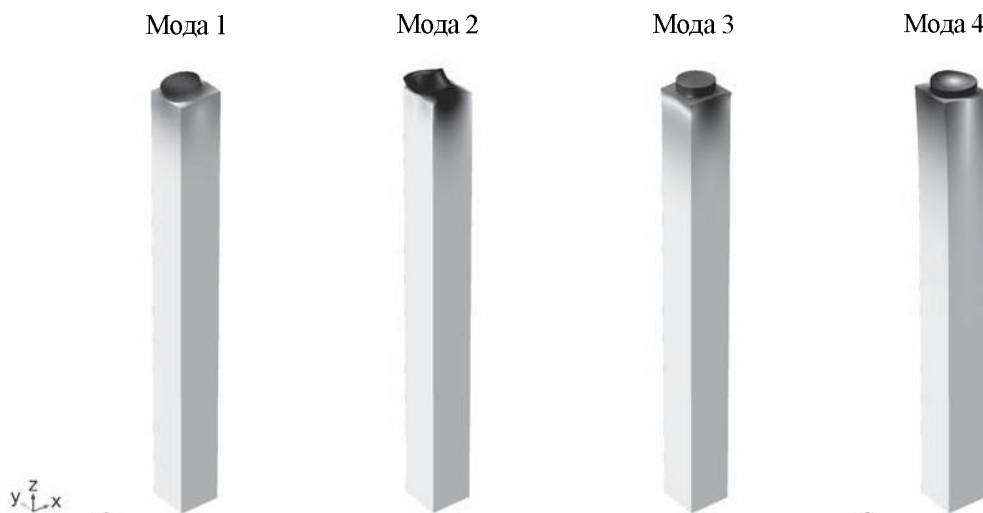


Рис. 4. Форма упругих деформаций первых четырех мод. Градиентом серого цвета обозначена амплитуда деформаций, при этом белый соответствует её минимуму, а черный – максимуму



в сагиттальной плоскости XZ (что соответствует отрезку X на дисперсионных характеристиках), тогда запрещенные зоны для ПАВ, исходя из результатов расчетов, прогнозируются выше 134 и 176 МГц соответственно. Кроме того, взаимодействие волны с ФК на частотах выше 198 МГц будет приводить к рассеянию в объем.

Для $h = 4$ мкм, как следует из рис. 3, б, также существуют две запрещенные зоны: первая с центром около 120 МГц и шириной 35%, вторая в окрестности 185 МГц и шириной около 15%. Если рассматривать только ПАВ, распространяющиеся в направлении X , то первая запрещенная зона начинается выше 89 МГц, а вторая – выше 139 МГц.

Из представленных двух дисперсионных характеристик видно, что увеличение толщины столбиков приводит к понижению частоты, при которой возбуждаются поверхностные моды в рассматриваемой системе. Это объясняется известным эффектом снижения скорости ПАВ под металлическим слоем никеля на ниобате лития при увеличении толщины слоя. Применительно к распространению акустических волн с поляри-

зацией в сагиттальной плоскости это приводит к значительному понижению центральной частоты первой полосы не пропускания, при этом центр второй зоны практически не сдвигается, однако увеличивается ее ширина.

Рассмотрим теперь количественные характеристики взаимодействия ПАВ с ФК, полученные в результате расчета спектров прохождения, а именно спектр прохождения по амплитуде и прирост разности фаз (рис. 5) для рассматриваемых случаев. Как видно из графика ΔS_{21} , для первого набора параметров первая запрещенная зона начинается выше 133 МГц и приводит к потерям до 40 дБ. Важно отметить локальные максимум и минимум на 133 и 135 МГц, которые соответствуют резонансу и антирезонансу решетки столбиков. Брэгговская запрещенная зона начинается выше 175 МГц, и потери в этом случае достигают 50 дБ. Важно отметить, что граница между двумя полосами не пропускания довольно размыта. Интересно сравнить амплитудные и фазовые характеристики прохождения. Отчетливо заметен большой рост разности фаз $\Delta\varphi$ при приближении к частотам, соответству-

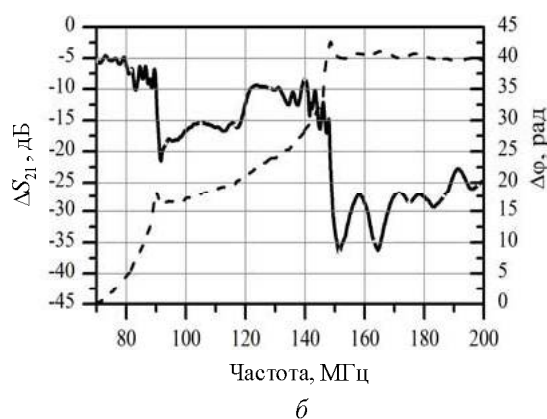
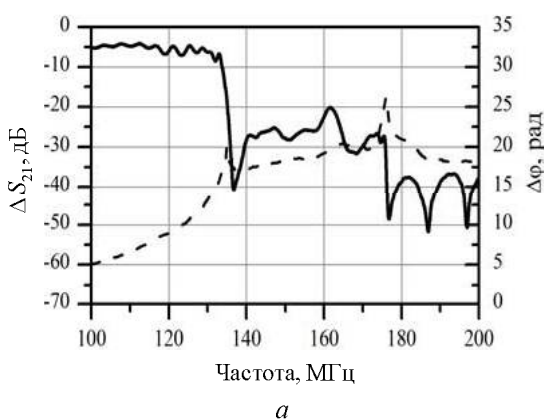


Рис. 5. Частотная зависимость функции передачи ΔS_{21} (сплошная линия) и накопленная разность фаз $\Delta\varphi$ (пунктирная линия) при прохождении ПАВ через фоновый кристалл из $N = 20$ никелевых столбиков с периодом $a = 10$ мкм, радиусом $r = 4$ мкм для высоты: а) $h = 2.3$ мкм, б) $h = 4$ мкм

ющим началу запрещенных зон. Локальные максимумы около 134 и 175 МГц свидетельствуют о снижении до нуля групповой скорости ПАВ около данных частот, что также видно из дисперсионных характеристик на рис. 3. Наглядно иллюстрирует взаимодействие ПАВ с ФК распределение упругих смещений в линии задержки для характерных частот: а) $f = 100$ МГц – зона прохождения (рис. 6, а); б) $f = 133$ МГц – резонанс структуры столбиков (рис. 6, б); в) $f = 134$ МГц – первая запрещенная

зона (рис. 6, в); г) $f = 179$ МГц – брэгговская запрещенная зона (рис. 6, г).

Проанализируем теперь результаты расчетов для второго набора параметров. Спектр прохождения (см. рис. 5, б) показывает, что запрещенные зоны располагаются там, где они предсказаны дисперсионными характеристиками (см. рис. 3, б). Первая запрещенная зона наблюдается на частотах между 90 и 120 МГц, а брэгговская запрещенная зона начинается около 140 МГц. Отчетливо видно, что для данного

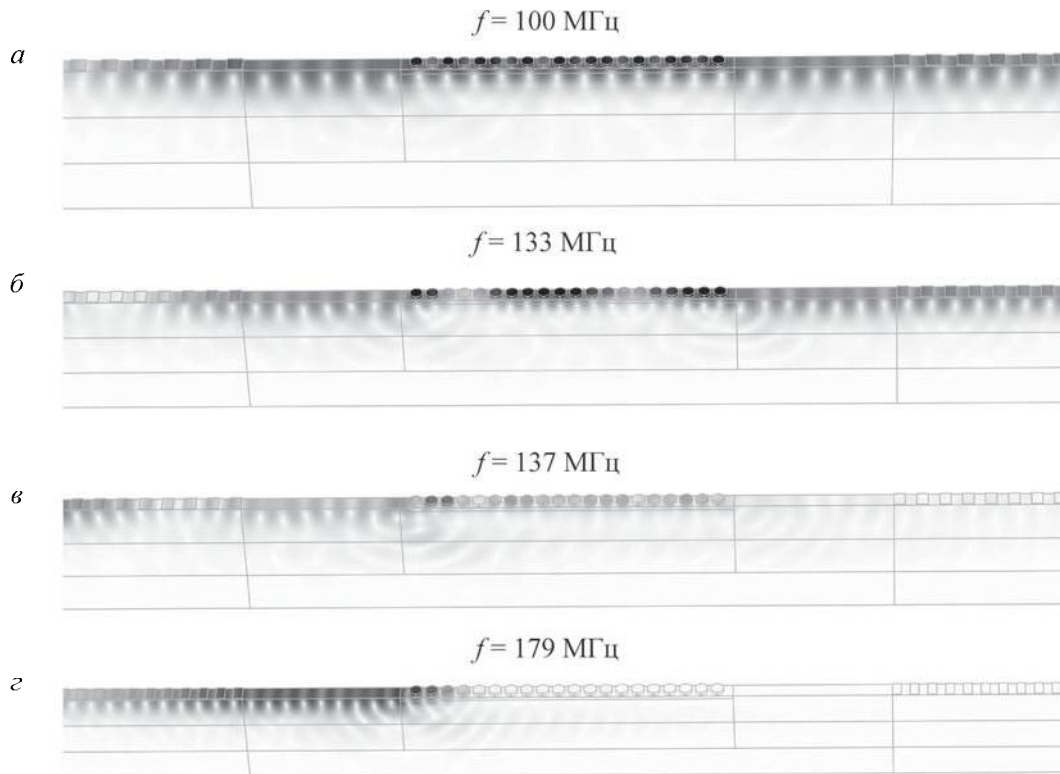


Рис. 6. Распределение упругих смещений в окрестности фононного кристалла при прохождении ПАВ для четырех характерных случаев: $a - f = 100$ МГц – прохождение; $b - f = 133$ МГц – резонанс столбиков; $v - f = 137$ МГц – локальная запрещенная зона; $z - f = 179$ МГц – брэгговская запрещенная зона. Градиентом серого цвета обозначена амплитуда деформаций, при этом белый соответствует её минимуму, а черный – максимуму

набора параметров две полосы непропускания хорошо разделены (между ними – полоса прохождения шириной 20 МГц). Характер поведения разности фаз такой же, как и в первом случае. Отметим, что на графике для второго набора параметров внутри брэгговской запрещенной зоны разность фаз перестает увеличиваться с ростом частоты и становится практически постоянной.

Экспериментальное исследование

Для экспериментального исследования процесса прохождения ПАВ через ФК была изготовлена тестовая линия задержки на ПАВ с ФК (рис. 7). В качестве материала подложки использовался $Y+128^\circ$ -срез LiNbO_3 . Нанесение ВШП проходило следующим образом: на подложку напылением была нанесена тонкая плёнка алюминия толщиной 200 нм, затем с помощью стандартного литографического процесса были сформированы ВШП. Изготовленная топология дисперсионного ВШП позволила получить широкий частотный диапазон для одновременного наблюдения всех запрещенных

зон ФК. Затем в пространстве между ВШП на слой резиста $AZ 15nXT$ толщиной 3 мкм, в котором при проявлении сформировались окна цилиндрической формы, был с помощью электролиза нанесен слой никеля. После второго проявления была получена решетка никелевых цилиндрических столбиков с периодом 10 мкм, радиусом порядка 4 мкм и толщиной около 2.3 мкм. На рис. 7 приведено изображение изготовленной структуры ФК, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа.

После изготовления устройства амплитудные и фазовые характеристики прохождения ПАВ были измерены с помощью анализатора цепей Agilent Technology. Обработанные результаты в виде $\Delta S_{21\text{exp}}$ и $\Delta\varphi_{\text{exp}}$ представлены на рис. 8, на котором для сравнения приведены и результаты численного моделирования.

На амплитудной характеристике (рис. 8, a) наблюдаются две ярко выраженные зоны непропускания в окрестности частот 135 и 195 МГц. Расчетные данные для первой запрещенной зоны с высокой степенью точности по частоте совпадают

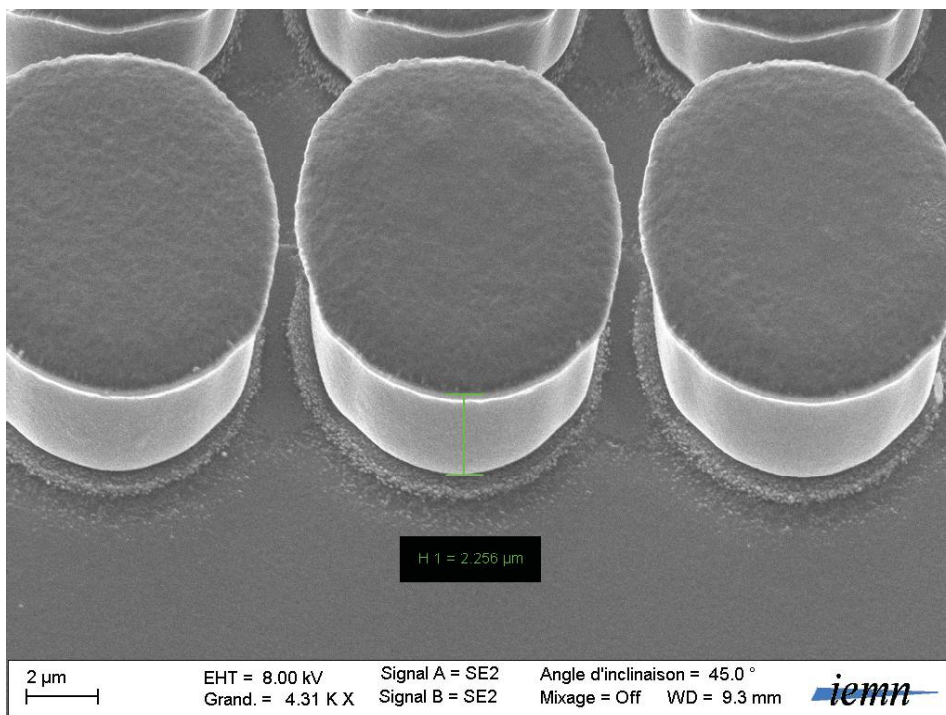


Рис. 7. Изображение изготовленного фонованного кристалла, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа

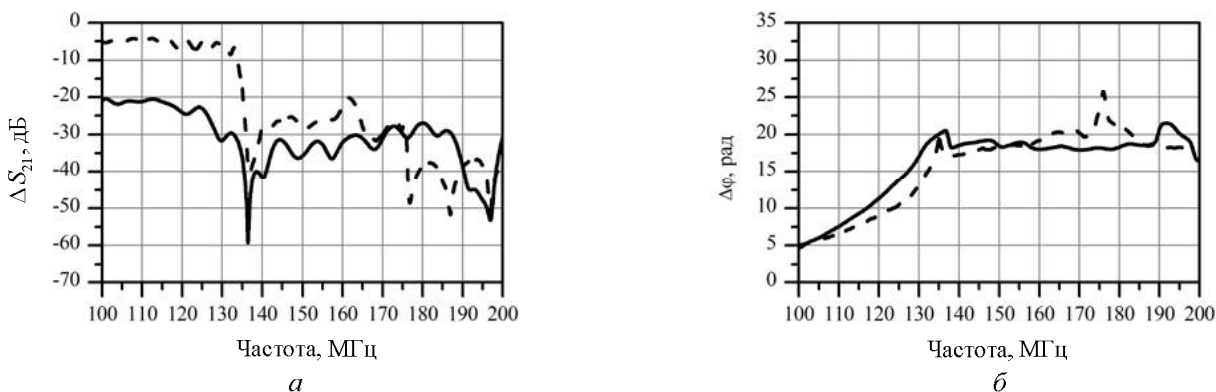


Рис. 8. Частотная зависимость функции передачи ΔS_{21} в эксперименте (сплошная линия) и полученная численно (пунктирная линия) (а); накопленная разность фаз $\Delta\varphi$ в эксперименте (сплошная линия) и полученная численно (пунктирная линия) (б)

с экспериментальными данными. Однако вторая запрещенная зона смещена приблизительно на 15 МГц, что можно объяснить различием между упругими свойствами материала столбиков (никеля), используемыми в расчетах, и реальными значениями плотности и упругих констант никеля в изготовленной структуре. Несовпадение расчетных и экспериментальных характеристик по амплитуде связано с тем, что при измерениях не проводилось согласование ВШП, имеющего комплексный импеданс, с волновым сопротивлением кабеля, равным 50 Ом. Отметим, что на графике

для разности фаз (рис. 8, б) также идентифицируется сдвиг второй запрещенной зоны по сравнению с расчетными значениями. В остальном графики с хорошей точностью совпадают.

Заключение

В данной работе методом конечных элементов проведен анализ взаимодействия ПАВ с ФК, представляющим собой периодическую решетку цилиндрических никелевых столбиков, расположенных на пьезоэлектрической подложке $Y+128^\circ$ -среза LiNbO_3 .



Экспериментальная проверка построенного метода расчета показала хорошее соответствие измеренной функции передачи ФК и расчетных значений для первой зоны непропускания. Выбор для численного моделирования более точных материальных параметров ФК позволит более точно прогнозировать и вторую запрещенную зону.

Полученная информация о прохождении ПАВ через рассмотренные ФК может быть использована для проектирования резонаторов и полосовых фильтров.

Авторы выражают благодарность С. Г. Сучкову за полезные комментарии к работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Правительства Российской Федерации (№ 11.G34.31.0030 и № 14.B37.21.1988).

Список литературы

1. Sigalas M., Economou E. N. Band structure of elastic waves in two dimensional systems // Solid State Communications. 1993. Vol. 86, № 3. P.141–143.
2. Tanaka Y., Tamura S. Surface acoustic waves in two-dimensional periodic elastic structures // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 58. P. 7958–7965.
3. Craster R. V., Guenneau S. Acoustic Metamaterials. Dordrecht : Springer Series in Materials Science, 2013.
4. Pennec Y., Vasseur J. O., Djafari-Rouhani B., Dobrzyński L., Deymier P. A. Two-dimensional phononic crystals : Examples and applications // Surface Science Reports. 2010. Vol. 65. P. 229–291.

5. Wu T.-T., Wu L.-C., Huang Z.-G. Frequency band-gap measurement of two-dimensional air/silicon phononic crystals using layered slanted finger interdigital transducers // J. of Applied Physics. 2005. Vol. 97. 094916.
6. Dissanayake D. W. Acoustic Waves. Croatia : Sciyo Publ., 2010. P. 91–124.
7. Wu T.-T., Wang W.-S., Sun J.-H., Hsu J.-C., Chen Y.-Y. Utilization of phononic-crystal reflective gratings in a layered surface acoustic wave device // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. 101913.
8. Laude V., Wilm M., Benchabane S., Khelif A. Full band gap for surface acoustic waves in a piezoelectric phononic crystal // Phys. Rev. E. 2005. Vol. 71. 036607.
9. Benchabane S., Khelif A., Rauch J.-Y., Robert L., Laude V. Evidence for complete surface wave band gap in a piezoelectric phononic crystal // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 73. 065601.
10. Khelif A., Achaoui Y., Benchabane S., Laude V., Boujema A. Locally resonant surface acoustic wave band gaps in a two-dimensional phononic crystal of pillars on a surface // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. 214303.
11. Achaoui Y., Khelif A., Benchabane S., Robert L., Laude V. Experimental observation of locally-resonant and Bragg band gaps for surface guided waves in a phononic crystal of pillars // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83. 104201.
12. Никитов С. А., Григорьевский А. В., Григорьевский В. И., Котелянский И. М., Лузанов В. А., Миргородская Е. Н., Сучков С. Г. Особенности распространения поверхностных акустических волн в двумерных фоновых кристаллах на поверхности кристалла ниобата лития // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 7. С. 876–888.

УДК 537.87; 621.3.09

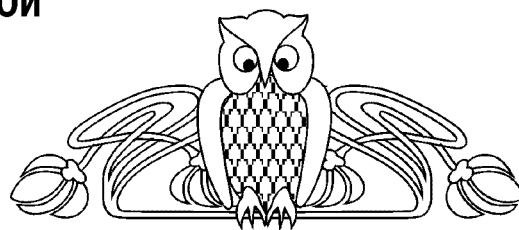
АНАЛИЗ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ МЕТКИ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 5.5–6.5 ГГц

С. Г. Сучков, В. А. Николаевцев, Д. С. Сучков,
В. В. Ермишин, А. В. Россошанский

Саратовский государственный университет
E-mail: nikolaevcev@ya.ru

Методом конечных элементов проведен численный анализ эффективности и диаграммы направленности интегральной антенны радиочастотной идентификационной метки на поверхностных акустических волнах. Найдены оптимальные параметры антенны, согласованной с встречно-штыревым преобразователем на диапазоне 5.5–6.5 ГГц.

Ключевые слова: система радиочастотной идентификации, радиочастотная идентификационная метка, акустоэлектроника, интегральная антенна.



Analysis by Finite Element Method of Integral Antenna of RFID Tag at 5.5–6.5 GHz

S. G. Suchkov, V. A. Nikolaevtsev, D. S. Suchkov,
V. V. Ermishin, A. V. Rossoshansky

Numerical analysis effective integral antenna of acoustoelectronic RFID tag was accomplished. Optimal parameters of the antenna compatible with interdigital transducer on a range of 5.5–6.5 GHz were obtained.