

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.207

Локализованные акустические волны в одномерных периодически модулированных структурах

Недоспасов И.А., Пупырёв П.Д., Смирнов А.В., Кузнецова И.Е.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>
Москва 125009, Российская ФедерацияE-mail: ianedospasov@mail.ru, pupyrev@mail.ru, andre-smirnov-v@yandex.ru, kuziren@yandex.ru

Поступила 27.02.2024, рецензирована 01.03.2024, принята 06.03.2024, опубликована 25.04.2024

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: Предложен и исследован ряд одномерных фоновых кристаллов, представляющих собой периодические тонкопленочные структуры различной геометрии, состоящие из наборов столбиков и металлических включений, расположенных на пьезоэлектрическом полупространстве. Исследованы особенности распространения в подобных структурах акустических волн, локализованных около свободной поверхности и неоднородных включений. Обнаружено необычное поведение дисперсионных кривых для исследованных локализованных мод. Особое внимание уделено так называемым запрещенным зонам, т.е. частотным диапазонам, в которых отсутствуют распространяющиеся локализованные моды. Подробно обсуждено влияние механических и электрических граничных условий на спектр исследуемых волн.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, одномерные фоновые кристаллы, оксид цинка, нулевая групповая скорость, волны Лява, волны Сезава, волны утечки

УДК 534-16, 534.12

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10267).

Для цитирования: Недоспасов И.А., Пупырёв П.Д., Смирнов А.В., Кузнецова И.Е. Локализованные акустические волны в одномерных периодически модулированных структурах. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2024, 16(2):207-214. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.207.

Localized acoustic waves in one-dimensional periodically modulated structures

Илья А. Nedospasov, Pavel D. Pupyrev, Andrey V. Smirnov, Iren E. Kuznetsova

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>
Moscow 125009, Russian FederationE-mail: ianedospasov@mail.ru, pupyrev@mail.ru, andre-smirnov-v@yandex.ru, kuziren@yandex.ru

Received February 27, 2024, peer-reviewed March 01, 2024, accepted March 06, 2024, published April 25, 2024

Abstract: A number of one-dimensional phononic crystals, which are periodic thin-film structures of various geometries, consisting of sets of columns and metal inclusions located on a piezoelectric half-space, have been proposed and studied. The features of propagation in such structures of acoustic waves localized near the free surface and inhomogeneous inclusions have been studied. An unusual behavior of the dispersion curves for the studied localized modes was discovered. Particular attention is drawn to the so-called forbidden zones, i.e. frequency ranges in which there are no propagating localized modes. The influence of mechanical and electrical boundary conditions on the spectrum of the waves under study is discussed in detail.

Keywords: surface acoustic waves, one-dimensional phononic crystals, zinc oxide, zero group velocity, Love waves, Sezawa waves, leaky waves

UDC 534-16, 534.12

Acknowledgments: The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 22-79-10267).

For citation: Ilya A. Nedospasov, Pavel D. Pupyrev, Andrey V. Smirnov, Iren E. Kuznetsova. Localized acoustic waves in one-dimensional periodically modulated structures. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):207-214e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.207.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (208)
 2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ (208)
 3. ОДНОРОДНАЯ ПЛЁНКА ZnO (209)
 4. ПЛЁНКА ZnO С АЛЮМИНИЕВЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ (210)
 5. ПРЯМОУГОЛЬНАЯ ВЫЕМКА В ПЛЕНКЕ ZnO ИЛИ СТОЛБИК ZnO НА ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ Y СРЕЗ LiNbO₃ (212)
 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (213)
- ЛИТЕРАТУРА (213)

1. ВВЕДЕНИЕ

Волновые процессы в периодических структурах на сегодняшний день являются одними из самых популярных объектов для исследования в акустике [1-6]. В подобных структурах наблюдаются необычные акустические явления, которые могут использоваться при создании датчиков, систем обработки сигналов, для управления акустическим волновым фронтом и т.д. Данные структуры можно создавать различными способами. Одним из самых широко распространенных подходов на микромасштабном уровне является использование технологии фотолитографии, например, нанесение металлических электродов на поверхность пьезоэлектрического образца. Однако по технологическим причинам толщина такого слоя металла обычно не превышает несколько сот нанометров, поэтому и его влияние на акустические волны в подобных структурах также мало. В пьезоэлектрических средах при помощи металлических структур на поверхности звукопровода можно легко изменять электрические граничные условия. Например, с "плавающих", т.е. неподключенных к источнику напряжения

электродов, на закороченные при подаче на них нулевого потенциала. Другой способ создания периодических структур заключается в нанесении различных диэлектрических или пьезоэлектрических плёнок на поверхность пьезоэлектрического звукопровода. В настоящей работе рассматриваются плёнки ZnO, которые обладают хорошими пьезоэлектрическими свойствами, и это позволяет использовать их в качестве верхнего покрытия чувствительной части сенсоров [7]. Кроме того, нанесение слоя пьезоэлектрического ZnO с системой электродов на поверхность непьезоэлектрических кристаллов позволяет эффективно возбуждать акустические волны в таких структурах. Следует отметить, что при развитии современной технологии толщина подобной пленки может достигать десятки микрон, выдерживая высокое кристаллографическое качество. Это позволяет значительно влиять на спектр акустических мод в подобных структурах [1-4,7,8]. При проведении исследований проводимость ZnO не учитывалась, однако подобный учет в модели достаточно прост и может оказывать дополнительное влияние на дисперсионные кривые.

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе теоретически исследовано влияние геометрических параметров на спектр акустических локализованных волн в периодических структурах, расположенных на полупространстве из YZ ниобата лития. Поверхность полупространства периодически модулируется различными структурами, электродами на интерфейсе между плёнкой ZnO и полупространством, столбиками из оксида

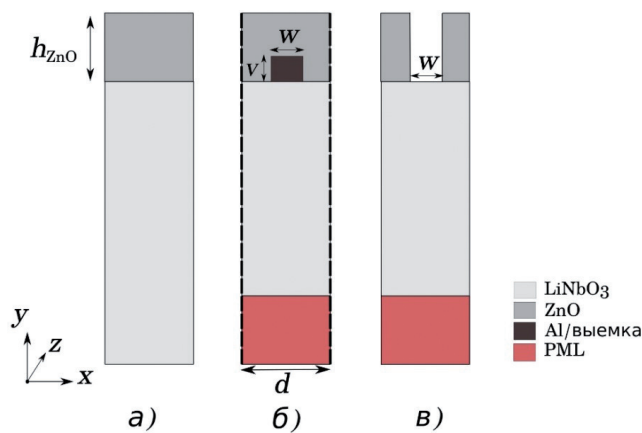


Рис. 1. Схематическое изображение одиночных ячеек периодических волноводов: а) однородная пленка ZnO, б) пленка ZnO с алюминиевым включением, в) столбик ZnO на полупространстве ниобата лития. Высота пленки h_{ZnO} , период структуры d , базовые значения размеров включений с высотой v и шириной w .

цинка с алюминиевыми включениями, либо заменой металла на выемку в однородной плёнке (Рис. 1). Геометрические параметры пленки и единичной ячейки характеризуется величинами, представленными на Рис. 1. Высота пленки/столбика $h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм, период структуры $d = 4$ мкм, высота алюминиевого включения $v = 0.25$ мкм, его ширина $w = d/2$. Далее параметр h_{ZnO} варьируется для оценки влияния геометрических изменений на спектр акустических волн в соответствующих волноводах.

Задача поиска акустических мод решалась численно с помощью метода конечных элементов. В этом случае образец в плоскости YX разбивался на двумерные четырехугольные элементы. Одномерный волновой вектор был направлен вдоль оси X . В направлении Z структура считалась бесконечной. Данный метод и его реализация были многократно протестированы в задачах о распространении акустических волн в пластинах, поверхностных и краевых волн, в том числе и в периодических структурах [5]. Для моделирования дисперсионных кривых применялась теорема Флоке-Блоха. В рамках этого подхода решение искалось лишь в области элементарной ячейки. На торцах единичных ячеек задавались периодические граничные условия (Рис. 1б, штрих-линия). Используемые элементарные ячейки имели конечные размеры в направлении Y . Это приводило к дополнительным резонансам объёмных

акустических волн, которые могут отражаться от нижней границы ячейки. Эти резонансы расположены на более высоких частотах и не перекрывают область существования исследуемых собственных локализованных мод. Для исследования условий существования псевдоволн, или локализованных "волн утечки", рассматривался отклик системы на силовой синусоидальный источник, действующий на верхнюю поверхность структуры. В этом случае анализировалась высокочастотная область акустического спектра в области резонансов. Моделирование полубесконечной подложки с помощью идеально согласованного слоя (PML), помещённого снизу, использовалось для предотвращения отражения акустических волн, генерируемых источником от нижнего края звукопровода (Рис. 1б).

Материальные константы для ниобата лития, были взяты на сайте производителя кристаллов Boston Piezooptics [9], для оксида цинка из [3], для алюминия использовались следующие параметры: плотность 2700 кг/м^3 , модуль Юнга 70 ГПа , коэффициент Пуассона 0.33 .

3. ОДНОРОДНАЯ ПЛЁНКА ZNO

Рассмотрим базовую геометрию в отсутствие периодичности структур, представляющую собой однородную изотропную плёнку

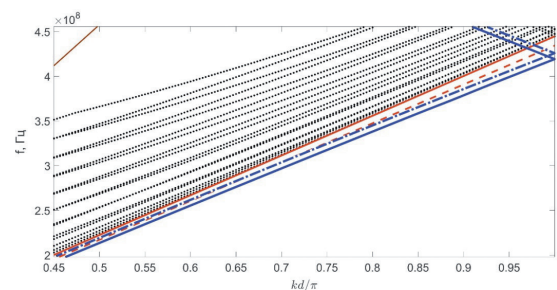


Рис. 2. Дисперсионные зависимости для мод в системе плёнка ZnO ($h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм) на полупространстве из YZ ниобата лития. Красная и коричневая сплошные линии соответствуют низшей поперечной и продольной объёмным волнам в Y срезе ниобате лития, соответственно. Пунктирная красная линия соответствует поверхностной акустической волне (ПАВ) в YZ ниобате лития. Черные пунктирные линии соответствуют резонансам объёмных акустических волн (ОАВ). Синие линии сплошная и пунктир соответствуют 1-й и 2-й локализованным поверхностным волнам, f - частота волны, k - волновое число.

(ZnO) на полупространстве (Y среза ниобата лития) (Рис. 1а). Волны распространяются в направлении YZ ниобата лития. При толщине плёнки ZnO $h_{ZnO} = 1$ мкм и периоде ячейки $d = 4$ мкм, рассчитанные дисперсионные зависимости выглядят следующим образом (Рис. 2).

Видно, что в данной структуре существуют две локализованные моды (синяя сплошная и синий пунктир) в диапазоне нормированного значения волнового вектора $k d / \pi$ от 0.45 до 1. Отдельно отметим, что поскольку глубина моделируемой геометрии конечна и составляет в данном случае 18 периодов, то при малых значениях волновых чисел нижняя граница структуры оказывает влияние на акустические моды. Таким образом, получаемые дисперсионные зависимости при малых k перестают правдоподобно описывать систему.

Что касается больших значений волновых чисел, то в связи с искусственностью выбора периода ячейки дисперсионные зависимости существуют за зоной Бриллюэна в виде "отраженных" или "сложенных" ветвей, уходящих за континуум объёмных и поверхностных резонансов. На границе зоны Бриллюэна первая локализованная мода (синяя сплошная) существует при частоте $f_1 = 419.3$ МГц и имеет сагиттальную поляризацию. Данная мода соответствует рэлеевскому типу акустических волн. На малых волновых числах данная дисперсионная кривая имеет асимптотику поверхностных акустических волн (ПАВ) в YZ ниобате лития в отсутствие плёнки. Вторая локализованная мода (синий пунктир) на границе зоны Бриллюэна существует при частоте $f_2 = 425.9$ МГц и обладает горизонтально-сдвиговой (SH) поляризацией. Таким образом, можно сделать вывод, что она является волной Лява. Вблизи значения $k d / \pi = 0.7$ она пересекает асимптотическую линию для ПАВ в YZ ниобате лития (красный пунктир). Ветви, находящиеся над асимптотическими линиями, соответствующими ОАВ (черные линии на Рис. 2), представляют собой объёмные резонансы. На Рис. 2 показаны лишь первые 20 собственных мод.

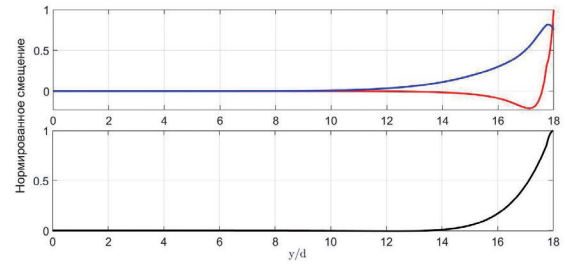


Рис. 3. Зависимости распределения по глубине нормированных полей смещений двух низших локализованных мод в структуре слой ZnO/полупространство YZ LiNbO₃ на границе зоны Бриллюэна в направлении Y . а) мода рэлеевского типа с сагиттальной поляризацией (Рис. 2, синяя сплошная), б) мода Лява с горизонтальной поляризацией (Рис. 2, синий пунктир). u_x – синяя кривая, u_y – красная кривая, u_z – черная кривая. Смещения для моды Лява и моды рэлеевского типа нормированы на поверхности на компоненты u_x и u_y соответственно.

Зависимости распределения нормированных полей смещений двух низших локализованных мод (Рис. 2, синий пунктир и синяя сплошная) по глубине в направлении Y на границе зоны Бриллюэна представлены на **Рис. 3**.

4. ПЛЁНКА ZnO С АЛЮМИНИЕВЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

В описанную выше структуру (Рис. 1а) между пленкой ZnO и ниобатом лития в качестве периодической неоднородности был добавлен алюминиевый электрод толщиной $v = 0.25$ мкм и шириной $w = 2$ мкм (Рис. 1б). Задача решалась методом, описанным выше. В качестве электрических граничных условий использовалась либо ситуация с электрически закороченными электродами, либо с электродами, не подключенными к источнику напряжения. На **Рис. 4** приведены полученные теоретические зависимости. Видно, что в этом случае появляются запрещённые зоны (выделены овалом). Как видно из Рис. 4, дисперсионная зависимость низшей рэлеевской моды (зеленый жирный пунктир) смещается в низкочастотную область (красная толстая сплошная) при электрическом закорачивании электродов.

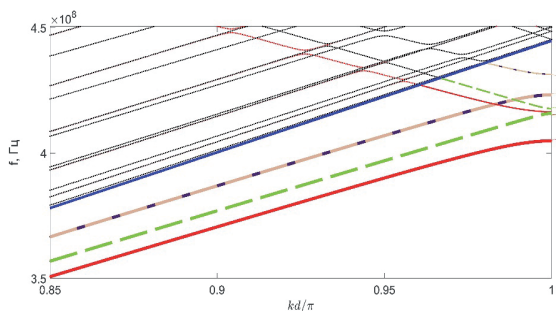


Рис. 4. Дисперсионные зависимости для акустических мод в структуре "пленка ZnO ($h_{ZnO} = 1$ мкм) – алюминиевый электрод ($v = 0.25$ мкм, $w = 2$ мкм) – полупространство Y LiNbO₃". Сплошные линии соответствуют модам в структуре с закороченными электродами. Пунктирные линии соответствуют модам в структуре с электродами, неподключенными к источнику напряжения. Синяя прямая линия соответствует сдвиговой ОАВ в подложке. Тонкими полукруглыми линиями справа показаны соответствующие запрещенные зоны.

При этом ширина запрещенной зоны для неподключенных электродов составляет 1.8 МГц, а при их закорачивании данная величина увеличивается до 11.5 МГц. Что касается волн Лява, то соответствующие дисперсионные зависимости не реагируют на изменение граничных условий. Это связано с тем, что волна Лява в данной структуре является непьезоактивной и ширина ее запрещенной зоны для обоих граничных условий составляет 8.1 МГц.

Для определения поляризации исследуемых волн были рассчитаны компоненты их механических смещений. На **Рис. 5а,б**

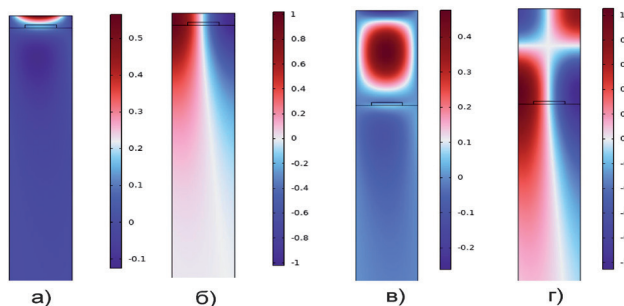


Рис. 5. Поля смещений u_x (а) и u_y (б) для рэлеевской моды при $h_{ZnO} = 1$ мкм и для моды Сезава при $h_{ZnO} = 8$ мкм и u_x (в) и u_y (г) на границе зоны Бриллюэна на ветви ниже запрещенной зоны.

приведены поля смещений для низшей рэлеевской моды с частотой 404.9 МГц на границе зоны Бриллюэна.

Далее был проведен анализ влияния толщины пленки ZnO на исследуемый акустический спектр. В результате было обнаружено, что при увеличении толщины пленки ZnO от 1 мкм до 8 мкм появляются высшие локализованные моды (**Рис. 6**). Видно, что дополнительно к волнам рэлеевского типа появляются моды типа Сезава, имеющие сагиттальную поляризацию (черные и оранжевые линии). Следует отметить, что при увеличении толщины пленки ZnO пьезоактивность волн рэлеевского типа значительно уменьшается, при этом появляющиеся моды типа Сезава оказываются более пьезоактивным. Было также обнаружено, что при закорачивании ширина запрещенной зоны данных мод драматически увеличивается от 100 кГц (черный полукруг) до 6.9 МГц (оранжевый полукруг) (**Рис. 6**). На **Рис. 5в,г** представлены рассчитанные поля механических смещений для нижней ветви

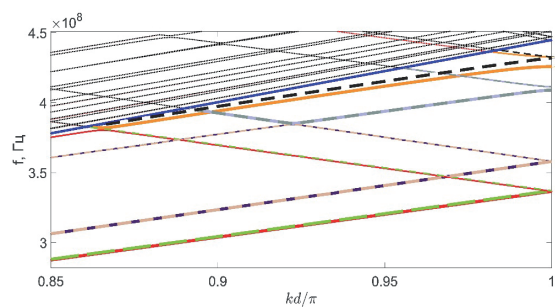


Рис. 6. Дисперсионные зависимости для мод в системе пленка ZnO ($h_{ZnO} = 8$ мкм) с тонким алюминиевым включением $v = 0.25$ мкм и $w = 2$ мкм (электродам) на полупространстве из Y LiNbO₃. Сплошные линии соответствуют модам в системе с закороченными граничными условиями на электродах, пунктирные линии соответствуют модам в системе с "плавающими" граничными условиями на электродах (неподключенных к источнику напряжения). Синяя прямая линия описывает объемную сдвиговую волну в подложке. Красные и светлозеленые линии соответствуют низшим рэлеевским модам, оранжевые и черные линии соответствуют модам Сезава, темно синие и бежевые соответствуют модам Лява 1-го порядка, темно зеленые и фиолетовые соответствуют модам Лява 2-го порядка.

моды Сезава на границе зоны Бриллюэна при $h_{\text{ZnO}} = 8$ мкм. В отличие от рэлеевской моды компоненты поля смещений моды Сезава меняют знак внутри плёнки, что соответствует изменению фазы на $\pi/2$.

5. ПРЯМОУГОЛЬНАЯ ВЫЕМКА В ПЛЕНКЕ ZnO ИЛИ СТОЛБИК ZnO НА ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ Y СРЕЗ LiNbO₃

Представляет интерес оценка влияния и других типов периодических включений на спектр акустических локализованных волн. Обнаружено, что при замене алюминиевого включения на пустую выемку, происходит сильное изменение поведения дисперсионных зависимостей (Рис. 7).

Исследование отклика системы на внешний силовой источник, отчетливо демонстрирует существование двух локализованных низших мод, исходящих из низкочастотного континуума. Обе наблюдаемые ветви имеют сагиттальный характер полей смещений. Стоит отметить, что в такой геометрии существует значительный частотный диапазон шириной около 50 МГц, в котором запрещены распространяющиеся волноводные моды (Рис. 7, черный полукруг).

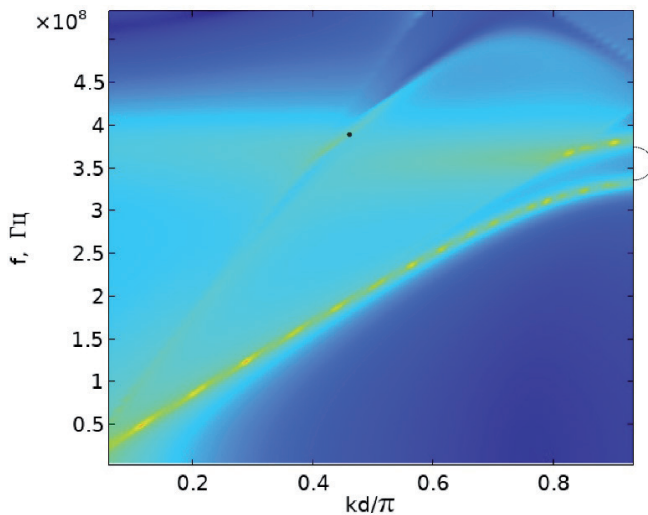


Рис. 7. Дисперсионные зависимости в виде отклика на внешнее механическое воздействие (силовой источник) для мод в системе плёнка ZnO ($h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм) с выемкой (воздух вместо алюминиевого электрода) $v = 0.25$ мкм и $w = 2$ мкм на полупространстве из Y LiNbO₃. Овал соответствует запрещенной зоне для волноводных мод.

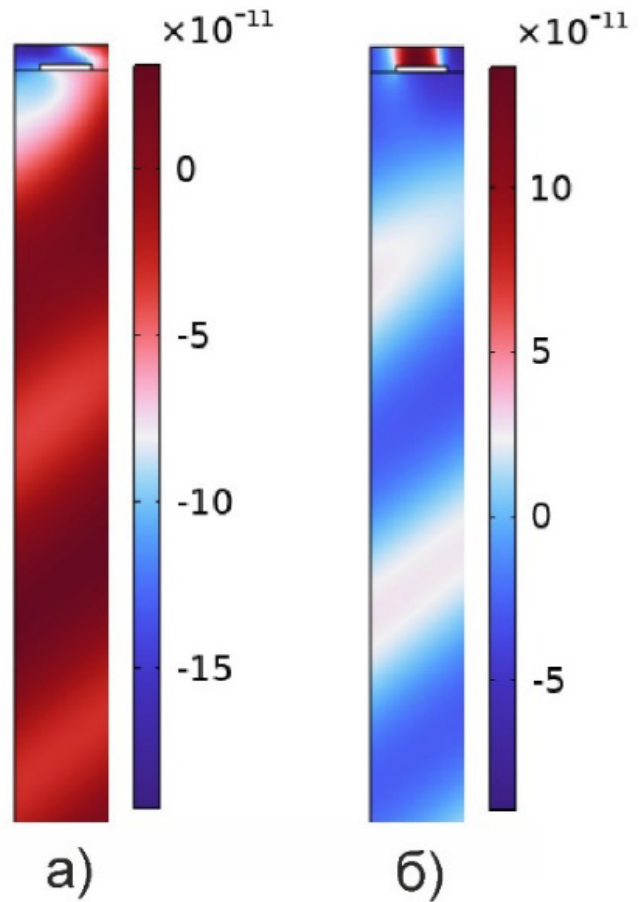


Рис. 8. Поля смещений для псевдолокализованной волны утечки на частоте 386.25 МГц и при значении нормированного волнового числа $kd/\pi = 0.46346$ в структуре с выемкой $v = 0.25$ мкм и $w = 2$ мкм в плёнке ZnO ($h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм) на полупространстве Y LiNbO₃, а) и_x компонента, б) и_y компонента.

В дополнение к этому наблюдается существование псевдолокализованных решений с другой асимптотикой в виде ОАВ с более высокой скоростью. Распределение полей смещения для волны утечки на частоте 386.25 МГц и при значении нормированного волнового числа $kd/\pi = 0.46346$ (черная точка на Рис. 7) показано на Рис. 8.

Вышеупомянутая структура имеет схожую геометрию с обычными одномерными столбиками на поверхности кристалла [1,2]. В связи с этим для сравнения дисперсионных кривых был рассчитан предельный случай пустых выемок $v \rightarrow h_{\text{ZnO}}$, то есть структура в виде несвязанных столбиков высотой $h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм и $w = 2$ мкм (Рис. 1в). На Рис. 9 приведены дисперсионные кривые для данной структуры.

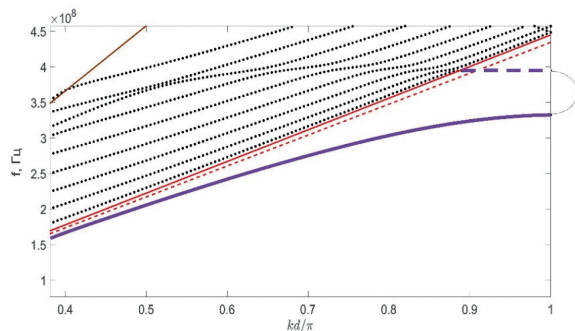


Рис. 9. Дисперсионные зависимости для акустических мод в структуре "столбик ZnO ($h_{\text{ZnO}} = 1$ мкм) и $w = 2$ мкм на полупространстве из Y LiNbO₃". Красная и коричневая сплошные линии соответствуют нижней поперечной и продольной ОАВ в Y срезе LiNbO₃, соответственно. Пунктирная красная линия соответствует ПАВ в YZ LiNbO₃. Синие линии, сплошная и пунктир, соответствуют 1-й и 2-й локализованным ПАВ, соответственно. Тонкими полукруглыми линиями справа показаны запрещенные зоны.

Здесь наблюдается только две локализованные моды (синие линии, сплошная и пунктир), лежащие ниже ветви ОАВ. Причем одна из них существует в широком частотном диапазоне, вторая же на небольшом участке от границы точки континуум до границы зоны Бриллюэна. Данная мода практически горизонтальна, то есть в этом случае возможно существование волны с практически нулевой групповой скоростью. Также в спектре присутствует очень широкая запрещенная зона с диапазоном 62.5 МГц (Рис. 9, тонкий полукруг).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были исследованы локализованные акустические моды в одномерных периодических пьезоэлектрических структурах, основанных как на тонких металлических включениях, так и на выемках и канавках. На основе анализа полей механических смещений было установлено соответствие вышеуказанных мод в структурах с периодически расположенными тонкими алюминиевыми электродами с волнами Лява и Сезава в однородных средах. Показано, что изменение механических и электрических граничных условий оказывает сильное влияние на поведение дисперсионных кривых вблизи границы зоны Бриллюэна. Это позволяет

манипулировать возникновением и шириной запрещенных зон. С другой стороны, обнаружено, что данные эффекты практически отсутствуют для непьезоактивных мод, наблюдаемых одновременно в той же структуре. Более сложные модификации структур в виде комбинации пустот и канавок/столбиков также сильно изменяют вид дисперсионных кривых. В структуре появляются широкие запрещенные зоны, возникают обширные диапазоны мод с нулевой групповой скоростью, а также возникают псевдоволны. Современные технологии нанесения плёнок и объектов сложной геометрической формы позволяют создавать акустические волноводы с уникальными характеристиками, оптимально подходящие для различных целей применения, будь то компоненты для систем обработки сигналов, элементов управления волновым фронтом или чувствительных элементов датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

- Jiang T, Li C, Han Q. Surface acoustic waves in 2D-phononic crystal of laminated pillars on a semi-infinite ZnO substrate. *Physics Letters A*, 2019, 383(33):125956.
- Taleb F, Darbari S, Khelif A. Reconfigurable locally resonant surface acoustic demultiplexing behavior in ZnO-based phononic crystal. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(2).
- Sharaf R, Darbari S, Khelif A. Vertical Surface Phononic Mach-Zehnder Interferometer. *Physical Review Applied*, 2023, 19(2):024071.
- Sharaf R, Darbari S, Khelif A. Nonreciprocity of Gigahertz Surface Acoustic Wave Based on Mode Conversion in an Inclined Phononic Crystal Heterojunction. *Physical Review Applied*, 2021, 16(5):054004.
- Nedospasov IA, Pupyrev PD, Bechler N, Tham J, Kuznetsova IE, Mayer AP. Guided acoustic waves at periodically structured edges: Linear modes and nonlinear generation of Lamb and surface waves. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 527:116854.
- Смирнов АВ, Фионов АС, Горбачев ИА, Шамсутдинова ЕС, Кузнецова ИЕ, Колесов ВВ. Использование аддитивных технологий для создания широкополосных

- антенн с фрактальной геометрией.
РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(4):427-434. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.427.
7. Caliendo C, Laidoudi F. Experimental and theoretical study of multifrequency surface acoustic wave devices in a single Si/SiO₂/ZnO piezoelectric structure. *Sensors*, 2020, 20(5):1380.
8. Булычев НА, Михайлов ЮГ. Получение полимерных композиционных материалов на основе наночастиц оксида цинка, синтезированных в плазменном разряде под действием ультразвука. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, 2023, 15(2):161-168. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.161.
9. <https://www.bostonpiezooptics.com/>.

Недоспасов Илья Александрович

к.ф.-м.н.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: ianedospasov@mail.ru

Пупырёв Павел Дмитриевич

к.ф.-м.н.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: pupurev@mail.ru

Смирнов Андрей Владимирович

к.ф.-м.н.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: andre-smirnov-v@yandex.ru

Кузнецова Ирен Евгеньевна

д.ф.-м.н., проф.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: kuziren@yandex.ru