

На правах рукописи

Пащенко Владимир Петрович

УПРАВЛЯЕМЫЙ ПЬЕЗОМЕТАМАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ИНДУЦИРОВАННОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТА В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ ТИТАНАТА БАРИЯ-СТРОНЦИЯ

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Новиков Владимир Васильевич

Официальные оппоненты:

Лучинин Виктор Викторович, доктор технических наук, профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ», заведующий кафедрой «Микро- и наноэлектроники»

Панайотти Ирина Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, доцент ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Ведущая организация: открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Гириконд»

Защита состоится «10» сентября 2014 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.05 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» и на сайте www.spbstu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат физико-математических наук, доцент

Воробьева Татьяна Владимировна

Актуальность темы. В последнее десятилетие значительно возросло количество работ, посвященных исследованиям метаматериалов – материалов, свойства которых определяются не свойствами элементов, из которых они состоят, а свойствами искусственной периодической структуры. К метаматериалам относятся фотонные и фононные кристаллы. Фононный кристалл, или акустический метаматериал, представляет собой структуру, состоящую из чередующихся в пространстве периодических неоднородностей, отличающихся упругими или пьезоэлектрическими свойствами. По аналогии с полупроводниками, фононные кристаллы имеют запрещенные зоны и зоны пропускания для упругих волн. Наиболее очевидное применение фононных кристаллов в акустоэлектронике – использование их в качестве полосовых фильтров, где в настоящее время в диапазоне частот до 3 ГГц применяются акустоэлектронные устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Разработка акустоэлектронных приборов на основе метаматериалов на частоты свыше 3 ГГц с использованием технологических процессов, позволяющих получить высокую повторяемость характеристик, является на сегодняшний день актуальной задачей.

Наибольший интерес представляют управляемые фононные кристаллы, в которых посредством внешних воздействий осуществляется контроль ширины запрещенной зоны. В качестве внешних воздействий используются различные физические поля – электрическое, магнитное, тепловое, механическое воздействие и т. д. Наиболее оптимальным и практичным для приложений электроники является метаматериал, управление шириной запрещенной зоной которого осуществляется посредством приложения электрического поля.

Явление так называемого индуцированного пьезоэффекта позволяет создать уникальный метаматериал, в котором формирование периодических структур осуществляется не с помощью технологических операций, а электрическим полем и полностью определяется его конфигурацией. Актуальность диссертационной работы заключается в исследовании механизмов управления электроупругими свойствами пьезоэлектрического метаматериала на основе тонких сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция.

В работе исследуются аналитическая и конечно-элементная модели управляемого акустического метаматериала, основанного на индуцированном пьезоэффекте в пленках титаната бария-стронция. Произведен расчет перестраиваемого радиочастотного фильтра на ПАВ и проанализированы его характеристики.

Цели диссертационной работы: теоретически обосновать применение электрически управляемого метаматериала на основе структуры тонкая сегне-

тоэлектрическая пленка $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ на диэлектрической подложке для создания частотно перестраиваемых акустоэлектронных устройств.

Задачи, поставленные и решенные в диссертационной работе:

1. Исследована возможность создания периодической структуры (метаматериала) на ПАВ с электрическим управлением свойствами. Проведен анализ пьезоэлектриков, сегнетоэлектриков и технологии разработки управляемого метаматериала на их основе.
2. Построена математическая модель и проведены теоретические исследования:
 - а) распространения упругих волн в слоистой структуре «пьезоэлектрик - диэлектрик»;
 - б) дисперсионных характеристик в электромагнитоупругом веществе;
 - в) волновых и дисперсионных характеристики для ПАВ в управляемом пьезоэлектрическом метаматериале.
3. Экспериментально исследовано влияние внешнего постоянного электрического поля на электроупругие свойства сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция.
4. Изучены перспективы применения управляемого пьезоэлектрического метаматериала в акустоэлектронных приборах.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Установленная математическим моделированием зависимость ширины запрещенной зоны метаматериала на основе тонкой сегнетоэлектрической пленки титаната бария-стронция от напряженности внешнего электрического поля.
2. Математическим моделированием доказано, что неравномерность распределения электрического поля в метаматериале и учет краевых эффектов на управляющих электродах приводит к сужению запрещенной зоны в среднем на 20% по сравнению с идеальным случаем кусочно-равномерного распределения поля.
3. Феноменологический подход к вычислению электроупругих коэффициентов пленочных сегнетоэлектриков, основанный на аппроксимации экспериментальных амплитудно-частотных и вольт-фарадных характеристик.
4. Экспериментально полученные зависимости электроупругих показателей тонких сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$) от напряженности внешнего электрического поля.

Научная новизна работы

1. Впервые рассчитана дисперсионная зависимость скорости упругих волн в периодическом электромагнитоупругом материале от напряженности управляющего электрического поля.
2. Впервые предложен управляемый пьезоэлектрический метаматериал, в котором формирование периодической структуры и управление её дисперсионными характеристиками осуществляется с помощью внешнего электрического поля.
3. Впервые предложен феноменологический подход для вычисления электро-упругих характеристик тонких пьезоэлектрических пленок титаната бария-стронция.
4. На основании экспериментальных данных, построена конечно-элементная модель управляемого метаматериала, позволившая рассчитать полосно-пропускающий фильтр на ПАВ, управляемый внешним электрическим полем.

Теоретическая и практическая значимость научных результатов

1. Разработана конечно-элементная математическая модель управляемого метаматериала для ПАВ в тонкой сегнетоэлектрической пленке на диэлектрической подложке.
2. С использованием конечно-элементной математической модели предложен феноменологический подход для вычисления электроупругих коэффициентов пленочных сегнетоэлектриков.
3. Дана теоретическая оценка существенного влияния неоднородности электростатического поля, возбуждаемого периодической структурой электродов, на распространение электроупругих волн в тонкой сегнетоэлектрической пленке.
4. Математическим моделированием рассчитана конструкция полосно-пропускающего перестраиваемого радиочастотного ПАВ фильтра на управляемом пьезометаматериале, пригодного для практического применения.
5. Полученные результаты вычисления электроупругих коэффициентов при использовании феноменологического подхода могут быть использованы в исследованиях и разработках новых электрически управляемых акусто-электронных резонаторов и фильтров.
6. Управляемый пьезоэлектрический метаматериал на основе структуры тонкая сегнетоэлектрическая пленка $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ на диэлектрической подложке может использоваться в качестве управляемого брэгговского зеркала в акустоэлектронных приборах.

Методы исследований

При решении поставленных задач в диссертационной работе использованы методы: экспериментального исследования электроупругих свойств пьезоэлектриков, математического моделирования волновых процессов, статистической обработки результатов измерений, аналитического и численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных, аппроксимации эмпирических зависимостей, математического анализа и оптимизации.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов обеспечивается использованием при феноменологическом подходе результатов полученных апробированными экспериментальными методами и сопоставлением с ранее известными экспериментальными данными.

При математическом моделировании использовалось лицензионное программное обеспечение, апробированные теоретические методы исследований физических моделей.

Публикации и апробация работы

Основные результаты работы опубликованы в 8 печатных трудах [1 – 8], среди которых 4 опубликованы в рецензируемых журналах [1 – 4].

Результаты работы докладывались и обсуждались на 4 международных конференциях [7, 9 – 11], на 6 всероссийских конференциях [12 – 17] и одном семинаре [18].

Личный вклад автора:

1. Принимал участие в обсуждении постановки задач экспериментального и теоретического исследований управляемого акустического метаматериала на тонких сегнетоэлектрических пленках.
2. Участвовал в получении и обработке экспериментальных данных, предложил методику расчета электроупругих коэффициентов тонких сегнетоэлектрических пленок с использованием конечно-элементного моделирования.
3. Разработал математические модели и получил аналитические и численные решения волновых задач в управляемом пьезометаматериале.
4. Провел анализ полученных решений и на основании анализа предложил направление практического применения управляемого пьезометаматериала в перестраиваемых полосовых радиочастотных фильтрах на ПАВ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения. Работа изложена на 111 страницах машинопис-

ного текста, включает 56 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 104 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимости полученных результатов, личный вклад автора, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава имеет обзорный характер. В первом разделе рассматриваются конструкции и основные характеристики фононных кристаллов на ПАВ. Второй раздел данной главы посвящен обзору управляемых фононных кристаллов с подробным рассмотрением механизмов управления. В третьем разделе рассмотрены одномерные фононные кристаллы на основе индуцированных периодических доменных структур (ПДС) в сегнетоэлектриках. Приводятся механизмы формирования ПДС, обсуждаются их достоинства и недостатки. В рамках третьего раздела произведен тщательный обзор слоистых структур «пьезоэлектрическая пленка на диэлектрической подложке». Рассматриваются особенности возбуждения различных типов упругих волн в слоистых структурах, проводится анализ различных технологий нанесения тонких пленок на подложки, рассматривается индуцированный внешним электрическим полем пьезоэлектрический эффект в сегнетоэлектриках $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$. Приводятся экспериментальные зависимости упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических свойств сегнетоэлектриков от напряженности внешнего электрического поля. В конце главы на основании анализа проведенного обзора, определяются предмет и объект исследования и предлагается конструкция акустического метаматериала для ПАВ, управляемого электрическим полем. Конструкция предложенного управляемого пьезометаматериала приведена на рисунке 1.



Рисунок 1. Управляемый пьезометаматериал с периодическими структурами, сформированными электрическим полем: 0 – диэлектрическая область, 1 – пьезоэлектрическая область.

При приложении напряжения, под электродами, расположенными на тонкой сегнетоэлектрической пленке, за счет индуцированного пьезоэффекта образуются пьезоэлектрические области. В межэлектродном пространстве, где напряженность поля минимальна, индуцированный пьезоэффект отсутствует,

либо намного слабее, чем под электродами. Таким образом, формируется структура с периодически изменяющимися диэлектрическими, пьезоэлектрическими и упругими свойствами. При распространении упругой волны в такой структуре, изменение напряжения на электродах приводит к изменению импедансных характеристик пьезоэлектрических областей, и, как следствие к частотной перестройке запрещенной зоны. При толщинах сегнетоэлектрической пленки порядка микрометра и напряжении источника в несколько вольт, напряженность электрического поля, приложенного поперек пленки, достигает значений ~ 1 МВ/м.

В первом разделе **второй главы** построена математическая модель предложенного метаматериала, основанная на импедансных характеристиках слоистой среды [19]:

$$Z_0 = \sqrt{\rho C_{ijmn}} ; \quad (1)$$

$$Z_1 = \sqrt{\rho \left(C_{ijmn} + M_{ijklmn} (\varepsilon_0 \varepsilon_{ij}(E_i) E_i)^2 \right)} \quad (2)$$

где Z_0, Z_1 – акустический импеданс диэлектрического и пьезоэлектрического слоев соответственно, E_i – компоненты вектора напряженности электрического поля, C_{ijmn} – тензор упругих модулей материала сегнетоэлектрика, M_{ijklmn} – тензор электрострикции, нелинейной по отношению к механической деформации, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ε_{ij} – тензор диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Выражение, стоящее в скобках в уравнении (2) есть «ужесточенный» модуль упругости, вызванный индуцированным пьезоэффектом. В работах [20, 21] разработана математическая модель перестраиваемого акустического резонатора на объемных акустических волнах, в рамках которой описаны зависимости модулей упругости, пьезоэлектрических модулей и диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля при индуцированном пьезоэффекте:

$$\tilde{h}_{ijm}(E_i) = h_{ijm} - 2G_{ijmn} \varepsilon_0 \varepsilon_{ij}(E_i) E_i ; \quad (3)$$

$$\tilde{C}_{ijmn}(E_i) = C_{ijmn} + M_{ijklmn} (\varepsilon_0 \varepsilon_{ij}(E_i) E_i)^2 ; \quad (4)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{ij}(E_i) = \frac{\varepsilon_{ij}(0)}{1 + 3\alpha \varepsilon_{ij}(0)^3 E_i^2} . \quad (5)$$

где h_{ijm} – пьезоэлектрический тензор в отсутствии электрического поля (обусловлен дефектами в пленке), связан зависимостью с тензором $e_{ijm} = \varepsilon_0(\varepsilon_{ij}-1)h_{ijm}$, G_{ijmn} – тензор электрострикции, E_i – компоненты вектора напряженности электрического поля, C_{ijmn} – тензор упругих модулей материала сегнетоэлектрика, M_{ijklmn} – тензор электрострикции, нелинейной по отношению к механической деформации, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ε_{ij} – тензор диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика, $\varepsilon_{ij}(0)$ – диэлектрическая проница-

емость сегнетоэлектрика в отсутствии постоянного электрического поля, α – коэффициент нелинейности.

С помощью разработанной импедансной модели исследована зависимость коэффициента отражения упругой волны в пьезометаматериале, состоящего из конечного числа слоев от частоты при различных значениях управляющего напряжения. На рисунке 2 приведены графики зависимости коэффициента отражения от напряженности управляемого электрического поля. Размер периода 100 мкм, толщина пьезослоя 40 мкм, диэлектрического слоя – 60 мкм. Число периодов – 40. Запрещенная зона в такой структуре наблюдается вблизи 15 МГц, на графике также присутствуют гармоники высших порядков.

Импедансная модель предполагает распространение чисто упругих волн во всех слоях. В пьезоэлектрическом материале имеют место пьезоактивные волны, представляющие интерес для практических применений и не учитываемые в данной импедансной модели.

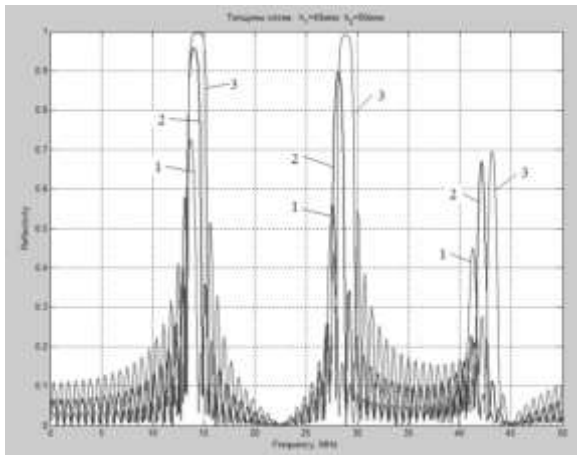


Рисунок 2. Зависимость коэффициента отражения в метаматериале от напряженности управляющего поля.

Цифрами обозначены кривые при напряженности поля:

1 – 10 МВ/м; 2 – 30 МВ/м; 3 – 40 МВ/м

Во втором разделе предложена другая усовершенствованная модель метаматериала, учитывающая все типы волн и анизотропию сегнетоэлектриков. Выведена система волновых уравнений для одномерного случая в электроупругой среде с периодически изменяющимися упругими, пьезоэлектрическими и диэлектрическими свойствами, которые зависят от напряженности постоянного внешнего электрического поля:

$$\mathbf{P} \frac{d^2}{dx^2} \mathbf{U} + \rho \omega^2 \mathbf{U} = 0 \quad (6)$$

где матрица $\mathbf{U} = (U_1 \ U_2 \ U_3 \ \varphi)^T$, содержащая компоненты механического смещения, T – знак транспонирования; \mathbf{P} – матрица электроупругих и диэлектрических свойств сегнетоэлектрика,

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{16} & C_{15} & e_{11} \\ C_{61} & C_{66} & C_{65} & e_{16} \\ C_{51} & C_{56} & C_{55} & e_{15} \\ e_{11} & e_{16} & e_{15} & -\epsilon_{11} \end{pmatrix}$$

В индуцированном пьезоэлектрике волновое уравнение будет аналогично (6), только матрица \mathbf{P} заменяется на $\tilde{\mathbf{P}}$, содержащую электроупругие коэффициенты, зависящие от напряженности поля согласно выражениям (3) – (5).

Решение системы (6) ищем в виде: $U=e^{ikx}\mathbf{A}$, где k – волновое число, $\mathbf{A}=(A_1 A_2 A_3 A_4)^T$ – вектор, элементы которого некоторые константы. В результате получаем алгебраическое уравнение $(k^2\mathbf{P}+\rho\omega^2\mathbf{E})\mathbf{A}=0$, где \mathbf{E} – единичная матрица. Из уравнения находятся волновые числа. Для материала титанат бария, материальные константы которого были взяты из литературных источников [22] получены следующие волновые числа:

$$k_{1,2}=\pm\omega\sqrt{\frac{\rho}{C_{11}}}; \quad k_{3,4}=\pm\omega\sqrt{\frac{\rho}{C_{66}}}; \quad k_{5,6}=\pm\omega\sqrt{\frac{\rho}{C_{55}(1+\eta^2)}}; \quad k_{7,8}=0, \quad (7)$$

где $\eta^2=\frac{e_{15}^2}{C_{55}\epsilon_{11}}$ – квадрат коэффициента электромеханической связи (КЭМС).

Знаки « \pm » волновых чисел соответствуют волнам, распространяющимся в положительном и отрицательном направлениях оси x . Пьезоактивной волне соответствует волновые числа $k_{5,6}$, нулевое решение $k_{7,8}$ соответствует электростатическому потенциалу.

В третьем разделе второй главы с использованием уравнений предыдущего раздела, решена задача волнового распространения в бесконечной периодической среде. Выведено матричное дисперсионное уравнения 4 порядка относительно $\cos\Gamma$ для волн в метаматериале:

$$(k_0\mathbf{P}+k_1\tilde{\mathbf{P}})^2(\cos(k_1h+k_0h_0)-\cos\Gamma)-(k_0\mathbf{P}-k_1\tilde{\mathbf{P}})^2(\cos(k_1h-k_0h_0)-\cos\Gamma)=0, \quad (8)$$

где k_0, k_1 – волновые числа пьезоактивной волны в диэлектрическом и индуцированном пьезоэлектрическом слоях соответственно, h_0, h_1 – толщина диэлектрического и индуцированного пьезоэлектрического слоев соответственно, Γ – постоянная распространения. Уравнение (8) имеет нетривиальное решение при равенстве нулю его определителя. Уравнение (8) было решено с использованием численных методов. Для метаматериала на основе пленки титаната бария толщиной 0,5 мкм бесконечной периодической структуры «диэлектрик/индуцированный пьезоэлектрик» построена дисперсионная кривая, приведенная на рисунке 3. Размер каждого слоя выбран равным 50 мкм. Ширина запрещенной зоны 3 МГц. На рисунке 4 приведены кривые зависимости ширины запрещенной зоны Δf метаматериала от напряженности поля при различных соотношениях ширины пьезоэлектрического и диэлектрического слоев в периоде. Как следует из графика, при размерах пьезоэлектрического слоя $h=0,9H$ и $h=0,1H$ (H – период структуры) наблюдается одинаковое изменение ширины запрещенной зоны, из чего следует, что периодические структуры обладают симметричностью по отношению к акустической волне.

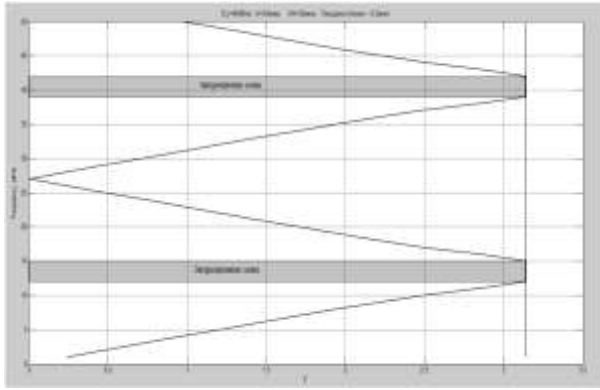


Рисунок 3. Дисперсионная характеристика метаматериала при напряженности поля 4 МВ/м

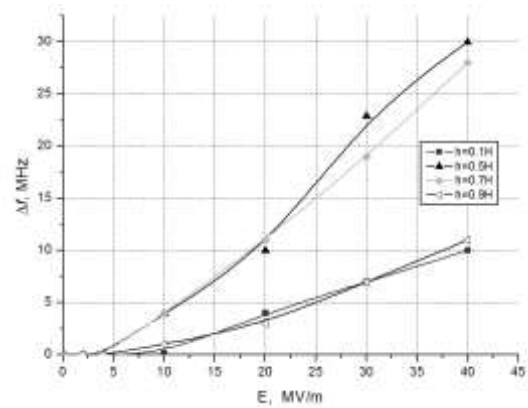


Рисунок 4. Зависимость относительной ширины запрещенной зоны от размеров слоев и напряженности эл. поля

Данная аналитическая модель предполагает равномерное распределение электрического поля, не учитывает краевые эффекты, возникающие на электродах и непригодна для расчета дисперсионных характеристик ПАВ.

В третьем разделе второй главы разработана двумерная конечно-элементная модель управляемого пьезометаматериала для ПАВ (Рисунок 5), учитывающая краевые эффекты и рассматривающая два варианта приложения управляющего поля – продольное и по толщине. В данной модели произведено конечно-элементное моделирование возбуждения ПАВ с помощью встречно-штыревых преобразователей (ВШП), распространение ПАВ в тонкой сегнетоэлектрической пленке $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, формирование периодической доменной структуры конечных размеров «диэлектрик/индуцированный пьезоэлектрик» в тонкой пленке посредством приложения электрического поля и взаимодействие ПАВ с сформированной периодической структурой. Распределение электрического поля под электродами показано на рисунке 6, где также видны краевые эффекты. На рисунках 7 а) и б) приведены частотные зависимости коэффициента прохождения метаматериала при планарном приложении поля и по толщине соответственно. Как видно из графика, при нулевом напряжении смещения линия задержки имеет широкую полосу пропускания. С увеличением управляющего напряжения на графике наблюдаются сужение полосы пропускания и спад амплитуды коэффициента прохождения, вызванные формированием доменов с периодически изменяющимися свойствами на поверхности сегнетоэлектрической пленки.

С помощью конечно-элементной модели показано, что наличие краевых эффектов и учет распределения электрического поля по второй координате уменьшает перестройку ширины запрещенной зоны в среднем на 20%.

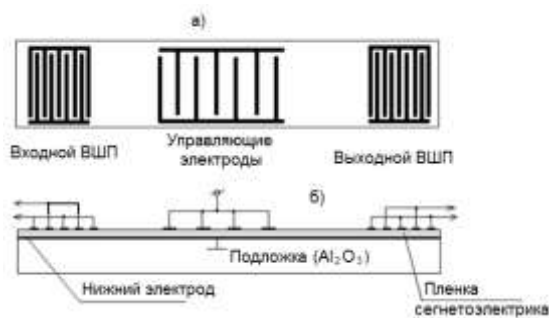


Рисунок 5. Схема фононного кристалла, управляемого электрическим полем. а) вид сверху; б) вид сбоку

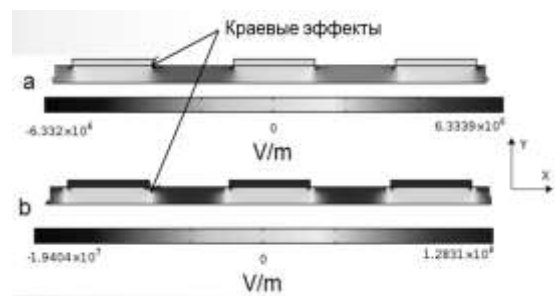
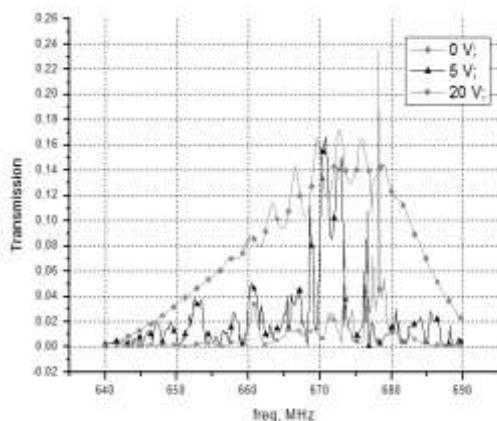
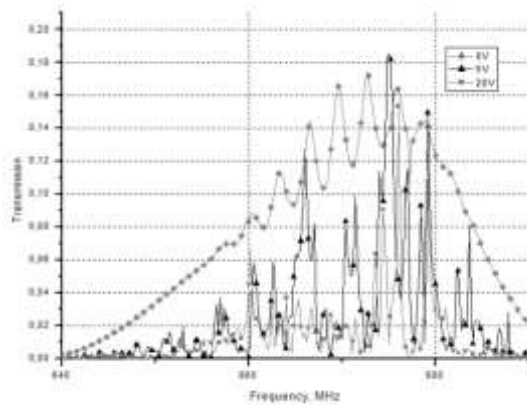


Рисунок 6. Распределение напряженности электрического поля в сегнетоэлектрической пленке под управляющими электродами.

Напряжение смещения 5 В. Толщина пленки 0,5 мкм. а) - поле приложено вдоль сегнетоэлектрика; б) – поле приложено по толщине сегнетоэлектрика



а)



б)

Рисунок 7. Частотная зависимость коэффициента прохождения ПАВ в метаматериале при различных напряжениях смещения.

а) - поле направлено вдоль пленки; б) - поле направлено по толщине пленки;

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям зависимости электроупругих свойств тонких сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция от напряженности внешнего электрического поля. Для исследования диэлектрических свойств сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция были изготовлены образцы планарных конденсаторов. Диэлектрическая проницаемость исследуемых пленочных образцов определялась из экспериментальных значений емкости планарного конденсатора методом конформных отображений [23], который имеет границы применимости, такие, как конечность структуры, краевые эффекты и неравномерность распределения электрического поля. Такие же ограничения рассматривались во второй главе диссертационной работы и были решены с помощью конечно-элементной модели.

Аналогичное решение предложено для определения диэлектрических свойств сегнетоэлектрических пленок. По данным топологии экспериментального образца строилась конечно-элементная модель. Экспериментальные значения емкости аппроксимировались в конечно-элементной модели, где решалась задача оптимизации, заключающаяся в нахождении оптимального значения параметра (в данном случае диэлектрической проницаемости) при котором выходные данные модели соответствуют экспериментальным данным.

С помощью предложенного феноменологического подхода, аппроксимацией экспериментальных данных, полученных в [24], определены зависимости упругих и пьезоэлектрических модулей сегнетоэлектрической пленки $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ от напряженности электрического поля. Различие рассчитанных коэффициентов с экспериментальными данными для пленки $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ ориентацией (001), приведенных в работе [21] составило около 6%.

Полученные с помощью предложенного феноменологического метода зависимости электроупругих коэффициентов сегнетоэлектрической пленки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Электроупругие постоянные сегнетоэлектрической пленки $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$

Титанат бария-стронция ($\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$)	Модули упругости	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{33}	C_{44}	C_{66}	
		303 GPa	173 GPa	150 GPa	287 GPa	58 GPa	120 GPa	
	Пьезоэлектрические постоянные	e_{15}		e_{31}		e_{33}		
		19.39134 C/m ²		-3.26213 C/m ²		0.00169 C/m ²		
	Относительная диэлектрическая проницаемость							ϵ_f
							1165.3	

В четвертой главе предложено практическое применение исследуемого управляемого пьезометаматериала в перестраиваемых полосовых радиочастотных фильтрах на ПАВ. Произведен расчет топологии и характеристик перестраиваемого ПАВ фильтра на центральную частоту 2450 МГц. Была выбрана конструкция фильтра на продольно связанных резонаторах [25]. В расчетах использовались полученные в предыдущей главе электроупругие коэффициенты пленки $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$.

Управляемый пьезометаматериал в рассчитанном фильтре выполнял роль перестраиваемого напряжением брэгговского отражателя ПАВ. Полученные характеристик фильтра – модуль коэффициента передачи в зависимости от амплитуды управляющего напряжения, приведены на рисунке 8.

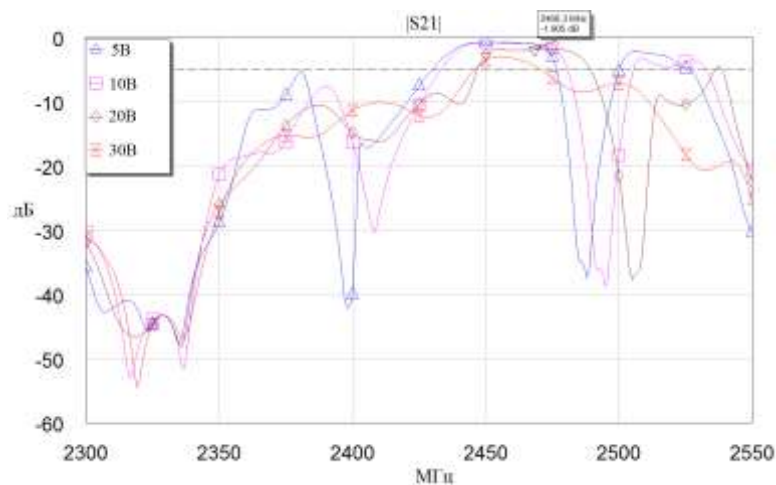


Рисунок 8. Модуль коэффициента передачи (в децибелах) ПЧВ фильтра на пьезометаматериале в зависимости от напряжения смещения

Из графика видно, что при подаче напряжения смещения происходит перестройка центральной частоты ПЧВ фильтра и смещение полосы пропускания. Рассчитанные затухания находятся на уровне 2 дБ, в реальном устройстве затухания будут больше из-за шероховатости сегнетоэлектрической пленки и дополнительных диэлектрических потерь. Поэтому следует уделять должное внимание технологии нанесения сегнетоэлектрической пленки. При увеличении напряжения смещения, происходит искажение частотной характеристики фильтра и увеличение вносимых потерь. При достижении некоторого порогового значения происходит рассинхронизация резонаторов фильтра, вследствие чего АЧХ фильтра разваливается. В рассматриваемом случае рассинхронизация резонаторов произошла при значении напряжения смещения 30В. Характеристики фильтра при различных значениях напряжения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики рассчитанного перестраиваемого фильтра при различных значениях управляющего напряжения

Параметр, единица измерения	Значение параметра фильтра при различных напряжениях смещения			
	5 В	10В	20 В	30 В
Центральная частота, МГц	2450	2460	2470,3	-
Полоса пропускания, МГц (по уровню -3 дБ)	42,9	44,3	42,1	-
Минимально вносимое затухание A_{min} , дБ, не более	0,69	0,84	1,9	-

Полоса пропускания фильтра изменяется в зависимости от напряжения и находилась в пределах 45 МГц. Из проведенных расчетов следует принципи-

альная возможность создания электрически перестраиваемых радиочастотных фильтров на основе управляемого пьезометаматериала.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Предложено использование индуцированного пьезоэлектрического эффекта в новом типе метаматериала для поверхностных акустических волн с управляемыми свойствами. Предложен оригинальный способ формирования периодических структур в сегнетоэлектрической пленке посредством внешнего электростатического поля. Разработана конструкция управляемого пьезометаматериала.

2. Разработана одномерная математическая модель распространения упругих волн в бесконечной периодической структуре «пьезоэлектрик / диэлектрик» при условии индуцированного пьезоэффекта.

3. Выведены уравнения волнового движения в периодической структуре «пьезоэлектрик / диэлектрик» в одномерном случае и найдены волновые числа для материала титаната бария стронция с учетом индуцированного пьезоэффекта.

4. Доказана перестройка частоты запрещенной зоны в предложенном пьезометаматериале за счет индуцированного пьезоэффекта при приложении внешнего управляющего электрического поля. Произведена оценка частотной перестройки запрещенной зоны пьезометаматериала.

5. С помощью конечно-элементного моделирования получены решения задачи волнового распространения в метаматериале с индуцированными периодическими доменными структурами неправильной формы. Учтены краевые эффекты, возникающие на границах управляющих электродов и, как следствие, эффект «расплывания» доменных структур. Оценено влияние краевых эффектов на дисперсионные характеристики метаматериала.

6. Предложен феноменологический подход к определению электроупругих свойств сегнетоэлектрических пленок. Искомые свойства извлекаются из конечно-элементной модели при аппроксимации амплитудно-частотных и вольт-фарадных характеристик экспериментальных образцов планарных конденсаторов и ПАВ резонаторов. С помощью феноменологического подхода определены диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической пленки титаната бария-стронция, пьезоэлектрические и упругие модули, а также их зависимость от напряженности электрического поля при индуцированном пьезоэффекте.

7. Построена конечно-элементная модель перестраиваемого полосно-пропускающего ПАВ фильтра на центральную частоту 2,45 ГГц с использова-

нием управляемого пьезометаматериала. Произведена оценка перестройки полосы пропускания фильтра. Показана принципиальная возможность использования перестраиваемых ПАВ фильтров с управляемым пьезометаматериалом для практических приложений.

Публикации по теме диссертации

1. Пащенко, В.П. Пьезоэлектрические тонкие пленки: свойства и применение в акустоэлектронике [Текст] / В.П. Пащенко // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Общетеchnическая (ОТ). – 2013. – Вып. 1. – С. 183 – 197.
2. Пащенко, В.П. Управляемый фононный кристалл на поверхностных акустических волнах на основе индуцированных периодических доменных структур [Текст] / В.П. Пащенко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – Санкт-Петербург. – 2013. – Вып. 3. – С. 55 – 59.
3. Pashchenko, V.P. Surface acoustic wave ferroelectric phononic crystal tunable by electric field [Text] / V.P. Pashchenko // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. – 2013, Vol. 4, Issue 5. – P. 630 – 634.
4. Пащенко, В.П. Преобразователь линейного ускорения консольного типа для эксплуатации в специальных условиях [Текст] / В.П. Пащенко, В.А. Калинин, К.А. Строганов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Общетеchnическая (ОТ). – 2012. – Вып. 1. – С. 131 – 141.
5. Пащенко, В.П. Тонкие пьезоэлектрические пленки в устройствах на поверхностных акустических волнах: свойства, и технология напыления [Текст] / В.П. Пащенко // Сборник научных трудов аспирантов, соискателей и студентов магистерской подготовки ОАО «Авангард». – Санкт-Петербург, 2013. – Вып. 5. – С. 235 – 261.
6. Пащенко, В.П. Перестраиваемый фильтр на ПАВ на основе индуцированного сегнетоэлектрического фононного кристалла [Текст] / В.П. Пащенко // Сборник научных трудов аспирантов, соискателей и студентов магистерской подготовки ОАО «Авангард». – Санкт-Петербург, 2013. – Вып. 5. – С. 170 – 176.
7. Pashchenko, V.P. Finite Element Modeling and Electrical Matching of Microwave Acoustoelectronic Delay Line Thin Film Piezoelectric Transducer [Text] / V.P. Pashchenko, A.Yu. Shimko. // Wave Electronics and its Applications in the Information and Telecommunication Systems. Proceedings. – St. Petersburg, 2012. – P. 40 – 43.

8. Пащенко, В.П. Дизайн акустоэлектронных устройств в среде FEMSAW: итоги стажировки в GVR Trade (Швейцария) [Текст] / В.П. Пащенко, А.Т. Галисултанов, А.Ю. Шимко, К.А. Строганов // Сборник докладов VI Научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 3 – 11.
9. Pashchenko, V.P. Electrical Field Tunable Ferroelectric Phononic Crystal [Text] / V.P. Pashchenko К.А. Stroganov // XVI Международная молодежная научная конференции Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 25.
10. Pashchenko, V.P. Surface Acoustic Wave Ferroelectric Phononic Crystal Based on Electric Field Induced Periodic Domains. [Электронный ресурс] / V. P. Pashchenko, S. S. Yankin // COMSOL Conference. – Rotterdam, 2013. Режим доступа: http://www.comsol.com/paper/download/182211/pashchenko_abstract.pdf.
11. Пащенко, В.П. Перестраиваемый фононный кристалл – метаматериал для приложений сенсорики. [Текст] / В.П. Пащенко // Международная научно-практическая конференция «Сенсорика 2013». – Санкт-Петербург, 2013. – С. 56.
12. Пащенко, В.П. Формирование индуцированной электрическим полем Пащенко, В.П. Формирование индуцированной электрическим полем акустической сверхрешетки в сегнетоэлектрической тонкой пленке. [Текст] / В.П. Пащенко // XV Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и микроэлектронике. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 41.
13. Пащенко, В.П. Конечно-элементное моделирование и электрическое согласование тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя гиперзвуковой линии задержки. [Текст] / В.П. Пащенко, А.Ю. Шимко // Сборник трудов Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург, 2012. – С. 232 – 237.
14. Пащенко, В.П. Пьезоэлектрические характеристики окиси цинка на подслое титаната стронция для гиперзвуковых линий задержки авиационных РЛС. [Текст] / В.П. Пащенко // Труды 54-й научной конференции МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе». – Москва, 2011. – С. 107 – 109.
15. Пащенко, В.П. Пьезоэлектрические пленочные структуры на основе окиси цинка и титаната стронция. [Текст] / В.П. Пащенко // Материалы пято-

- го всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 61 – 63.
16. Пашенко, В.П. Наноструктурированные пленки титаната стронция в тонкопленочных пьезопреобразователях сдвиговых волн. [Текст] / В.П. Пашенко // Труды XXX научно-практической конференции «Датчики и системы». – Пенза, 2011. – С. 231 – 233.
17. Пашенко, В.П. Акустический метаматериал с электрически управляемыми свойствами [Текст] / В.П. Пашенко // Материалы докладов XXVII сессии Российского акустического общества РАН. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 1015 – 1032.
18. Пашенко, В.П. Математическая модель одномерного управляемого акустического метаматериала [Электронный ресурс] / В.П. Пашенко // Акустический семинар Восточно - Европейской ассоциации акустиков. Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН). – Санкт-Петербург, 2013. Режим доступа: http://www.ipme.ru/ipme/edu/sem_kouzov/next_ru.html

Цитируемая литература

19. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах [Текст] / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 2-е издание, 1973. – 343 с.
20. Вендик, И.Б. Перестраиваемые объемные акустические резонаторы с индуцированным пьезоэффектом в сегнетоэлектрике [Текст] / И.Б. Вендик // Физика твердого тела. – 2009. – Том 51. – Вып. 8. – С. 1495 – 1498.
21. Tagantsev, A. Electrical tuning of dc bias induced acoustic resonances in paraelectric thin films [Text] / A. Tagantsev, A. Noeth, T. Yamada [et al.] // Appl. Phys. – 2008. – Vol. 104. – P. 094102-1 – 094102-10.
22. Блистанов, А.А. Акустические кристаллы: Справочник [Текст] / А.А. Блистанов, В.С. Бондаренко, Н.В. Переломова [и др.]. – М. Наука 1982. – 633 с.
23. Вендик, О.Г. Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора, содержащего тонкий слой сегнетоэлектрика [Текст] / О.Г. Вендик, С.П. Зубко, М.А. Никольский // ЖТФ. – 1999. – Т. 69. – Вып. 4. – С. 1 – 7.
24. Мухортов, В.М. Поверхностные акустические волны в тонких пленках титаната бария-стронция на подложках из оксида магния [Текст] / В.М. Мухортов, С.В. Бирюков, Ю.И. Головкин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – Вып. 5. – С. 31 – 37.
25. Rusakov, A.N. Design of wide band SAW coupled resonator filters on quartz [Text] / A.N. Rusakov, J.D. Dai, R.J. Kanyo // IEEE Ultrasonic Symposium – 2003. – Vol. 1. – P. 513 – 517.