

Пташник Сергей Викторович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ РЕЗОНАТОРЫ НА ОБЪЕМНЫХ
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В СТРУКТУРАХ, СОДЕРЖАЩИХ СЛОИ
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА В ПАРАЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

Специальность 01.04.03 — Радиофизика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель —
доктор технических наук,
профессор Козырев Андрей
Борисович

Санкт-Петербург
2014

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ) на кафедре физической электроники и технологии

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Козырев Андрей Борисович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Таганцев Александр Кириллович, заведующий лабораторией физики ферроиков Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург;

доктор физико-математических наук, профессор Бугров Владислав Евгеньевич, заведующий кафедрой светодиодных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Гириконд», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 29 декабря 2014 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан 28 октября 2014 г.

Ученый секретарь совета Д 212.238.08 по защите докторских и кандидатских диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

Е.А. Смирнов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

СВЧ системы нового поколения для спутниковой навигации (такие как ГЛОНАСС и GPS), телекоммуникации (цифровая связь по стандартам IEEE 802.11 «Wi-Fi», IMT-2000 «3G» и IMT-Advanced «4G») и космической связи предъявляют жесткие требования к габаритам электронных устройств, в том числе, к размерам полосно-пропускающих фильтров. В указанных системах используются электроакустические фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Размеры встречно-штыревых электродов, необходимых для эффективного возбуждения поверхностных акустических волн в пьезоэлектрике, ограничивают как возможность создания сверхминиатюрных СВЧ фильтров, так и частотный диапазон таких устройств (до 2 ГГц) [1].

Альтернативой фильтрам на ПАВ являются фильтры на объемных акустических волнах (ОАВ), которые также получили широкое распространение в целом ряде фильтровых устройств благодаря значительно более широкому частотному диапазону (свыше 10 ГГц), более высоким уровням мощности обрабатываемого сигнала, и меньшим габаритным размерам [1, 2].

Однако, общим недостатком существующих на сегодняшний день фильтров на ПАВ и ОАВ является отсутствие электрической перестройки их частоты пропускания [2]. Актуальность данной проблемы также подтверждается патентами ряда крупных компаний, в частности, LG, Samsung, Nokia, Intel и др.

Одним из подходов к реализации перестройки является замена в резонаторе пленки традиционного пьезоэлектрика (AlN, ZnO) на пленку материала, проявляющего наведенный пьезоэффект под действием постоянного электрического поля (смещения), например, титаната бария-стронция, находящегося в параэлектрической фазе. Электрические, механические и пьезоэлектрические параметры такого материала зависят от величины управляющего напряжения. Манипулирование этой величиной позволяет добиться небольшой (порядка нескольких процентов) перестройки резонансной частоты устройства [2–4].

В настоящей работе предлагаются ОАВ-резонаторы, содержащие несколько (два и более) слоев подобного материала (активных слоев). Показано, что при помощи манипуляций поляриностью приложенных к различным активным слоям управляющих электрических полей, можно добиться скачкообразной перестройки резонансной частоты устройства на 100% и более, за счет селективного возбуждения в структуре тех или иных собственных акустических мод. Подобные резонаторы и созданные на их основе перестраиваемые фильтры станут более простой, дешевой и компактной альтернативой используемым в настоящее время банкам из нескольких не перестраиваемых фильтров на различные частотные диапазоны.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей работы является исследование многослойных структур, содержащих слои сегнетоэлектрика в параэлектрическом состоянии, а также разработка методов управления такими структурами для создания перестраиваемых СВЧ резонаторов и фильтров с перестройкой по частоте порядка 100%.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Разработан математический аппарат, моделирующий работу ОАВ-резонаторов с двумя и более активными слоями.

- Проведена апробация полученного аппарата на существующих экспериментальных данных.
- Рассмотрены механизмы перестройки между собственными акустическими модами в моделях резонаторов с двумя, тремя и четырьмя активными слоями.
- Проанализированы принципы, описывающие селективность возбуждения собственных акустических мод в структурах с произвольным количеством активных слоев.
- Разработаны рекомендации по проектированию перестраиваемых резонаторов.

Научная новизна работы

- Предложен новый принцип перестройки ОАВ-резонаторов, основанный на манипулировании как величинами, так и полярностями управляющих напряжений на нескольких слоях сегнетоэлектрика с наведенным пьезоэффектом.
- Представлена методика моделирования поведения ОАВ-резонаторов с произвольным числом активных слоев при различных величинах и полярностях управляющих напряжений на них.
- Теоретически описаны существующие экспериментальные данные, свидетельствующие о перестройке резонансных частот ОАВ-резонатора с двумя активными слоями, при изменении взаимной полярности управляющих напряжений на этих слоях.
- Сформулированы принципы, позволяющие управлять возбуждением собственных акустических мод при помощи манипуляций величинами и полярностями управляющих напряжений на активных слоях.

Обоснованность и достоверность

Корректность математического аппарата, используемого в настоящей работе, подтверждается существующими экспериментальными данными, свидетельствующими о перестройке резонансных частот ОАВ-резонатора с двумя активными слоями, при изменении взаимной полярности управляющих напряжений на этих слоях. Кроме того, в случае применения данного аппарата к структуре с одним активным слоем, он вырождается в хорошо известную классическую формулу [5], которая давно и успешно используется на практике.

Практическая значимость

- Показана возможность создания ОАВ-резонаторов, электрически перестраиваемых между несколькими собственными акустическими модами.
- Подготовлены рекомендации по проектированию таких резонаторов.
- Представлена математическая модель, позволяющая проектировать подобные резонаторы и оптимизировать их конструкционные параметры для получения требуемых выходных характеристик.

Научные положения, выносимые на защиту

- Математический аппарат, основанный на матричном представлении системы граничных условий электромеханических уравнений, позволяет проводить модельный анализ электрического и акустического отклика структур с произвольным числом пьезоэлектрических и не пьезоэлектрических слоев.
- Управление величинами смещающих напряжений на слоях сегнетоэлектрика с наведенным пьезоэффектом, в сочетании с манипулированием их полярностью, позволяет обеспечить селекцию возбуждаемых внешним СВЧ полем собственных мод акустических колебаний резонатора.
- Функция-критерий f^i позволяет оценить эффективность возбуждения любой собственной моды акустических колебаний при различных сочетаниях величин и полярностей напряжений смещения на слоях сегнетоэлектрика с наведенным пьезоэффектом, что дает возможность разработки перестраиваемых резонаторов и фильтров с большим числом переключаемых рабочих частот.
- Наиболее эффективное возбуждение n -й собственной моды акустических колебаний обеспечивается в резонаторе, состоящем из n одинаковых по свойствам и толщине слоев сегнетоэлектрика с наведенным пьезоэффектом, при условии одинаковых величин и чередующихся полярностей смещающих напряжений на слоях. При этом также возбуждаются высшие собственные моды акустических колебаний с номерами, идущими с шагом $2n$.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (2010 г.), European Microwave Conference (2010 г.), XII международная конференция «Физика диэлектриков» (2011 г.), всероссийская научно-техническая конференция «Микроэлектроника СВЧ» 2012 и 2013 годов.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 статей, из них 4 в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 публикации в трудах научно-технических конференций, 2 патента на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 60 наименований. Основная часть работы изложена на 108 страницах машинописного текста. Работа содержит 51 рисунок и 6 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследований, сформулированы научная новизна, практическая значимость полученных результатов и научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературных данных по резонаторам на объемных акустических волнах. В ней рассматриваются две основные разновидности их конструкций: мембранные резонаторы (FBAR) и резонаторы на подложке с брэгговским зеркалом (SMR). Каждый из этих двух подходов представляет свое решение проблемы с акустической изоляцией резонатора от подложки.

Приводится краткое сравнение ОАВ-резонаторов с устройствами на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Ключевым достоинством ПАВ-устройств является относительно простой технологический процесс, позволяющий создавать такие устройства в общем цикле изготовления интегрального элемента. К ключевым преимуществам ОАВ-резонаторов относятся широкий частотный диапазон, добротность на высоких частотах, высокие допустимые уровни мощности и миниатюрные размеры. Как следствие, ОАВ-резонаторы широко применяются в современных системах связи, прежде всего в фильтрах и дуплексерах.

Рассматриваются методы моделирования ОАВ-резонаторов, начиная с простейшей однослойной модели, дающей представление о селективности возбуждения собственных мод резонатора, и простейшей эквивалентной схемы Баттерворта–Ван Дайка, описывающей поведение ОАВ-резонатора вблизи частоты собственной моды. Также рассматриваются более детализированные модели, в частности, подходы Лакина[5] и Мэзона[6]. Эти методы позволяют моделировать электрический отклик структуры, основываясь на ее конструктивных параметрах (толщины слоев, характеристики материалов). Однако, возможности модели Лакина ограничиваются структурами с одним активным (пьезоэлектрическим) слоем. Модель Мэзона не имеет такого ограничения, однако, в силу замены прямого описания акустических процессов в структуре, их эквивалентным электрическим представлением, представляет определенную сложность для расчета, особенно при исследовании структур с большим числом слоев.

Дается краткое описание одной из важнейших характеристик ОАВ-резонаторов — коэффициента электромеханической связи, определяющей эффективность преобразования энергии из электромагнитной в акустическую и обратно.

Также обсуждаются вопросы, связанные с проектированием и изготовлением ОАВ-резонаторов, в частности, факторы, влияющие на характеристики резонатора (добротность, температурная стабильность, коэффициент электромеханической связи и др.), достоинства и недостатки различных материалов, используемых в технологии ОАВ-резонаторов. Кратко рассматривается технологический процесс изготовления резонаторов.

Приводятся области применения ОАВ-резонаторов, в частности, СВЧ-фильтры, осцилляторы, датчики физических величин.

В завершение главы, рассматриваются современные достижения в области перестраиваемых ОАВ-резонаторов, в том числе методы управления резонаторами на основе классических линейных пьезоэлектриков. Обсуждается более перспективное направление — использование материалов с наведенным пьезоэффектом, характеристики которых зависят от величины смещающего поля. Приводятся основные соотношения, описывающие такие зависимости.

Перспективной выглядит возможность замены нескольких резонаторов, работающих в различных частотных диапазонах, одним перестраиваемым устройством. Это позволит значительно упростить и уменьшить многие современные мобильные устройства коммуникации, поддерживающие связь по различным стандартам, каждый из которых имеет свои частотные диапазоны. Однако, современные возможности по управлению резонансной частотой ОАВ-резонатора ограничиваются перестройкой порядка нескольких процентов[2, 3, 7].

Вторая глава посвящена разработке математического аппарата, позволяющего моделировать электрический отклик резонаторных структур с произвольным числом активных слоев. Как уже упоминалось выше, модель Лакина ограничивается структурами с одним активным слоем, в то время, как модель Мэзона, не имеющая такого ограничения, представляет значительную сложность для расчета из-за использования эквивалентных представлений.

В настоящей работе рассматривается более простой и прозрачный математический аппарат, основанный на непосредственном расчете электроакустических процессов в структуре. Распространение электромеханических колебаний в одномерной однородной пьезоэлектрической непроводящей среде описывается следующей системой дифференциальных уравнений [1, 5]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma}{\partial x} &= c \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + e \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial \eta}{\partial t} \\ \frac{\partial D}{\partial x} &= e \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \varepsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где σ — механическое напряжение, c — коэффициент упругости, η — механическое смещение (отклонение точки от положения равновесия), x — координата, e — пьезоэлектрический коэффициент, φ — электрический потенциал, ρ — плотность среды, t — время, D — электрическое смещение, ε — диэлектрическая проницаемость.

Решением такой системы будут являться функции

$$\begin{aligned}\eta(x) &= \beta_- e^{jkx} + \beta_+ e^{-jkx} \\ \sigma(x) &= c \frac{\partial \eta}{\partial x} + e \frac{\partial \varphi}{\partial x} = j\omega Z_a (\beta_- e^{jkx} - \beta_+ e^{-jkx}) - e\alpha \\ \varphi(x) &= \frac{e}{\varepsilon} \eta(x) - \alpha x + C,\end{aligned}\tag{2}$$

где β_+ , β_- — амплитуды прямой и обратной волн, $k = \omega/V$ — волновое число ($V = \sqrt{(c + e^2/\varepsilon)/\rho}$ — фазовая скорость звука в среде), α и C — постоянные интегрирования. Зависимость от времени при гармоническом воздействии описывается множителем $e^{j\omega t}$, который здесь и в дальнейшем опущен для простоты записи.

Присутствующие в выражениях (2) неизвестные коэффициенты β_+ , β_- , α и C определяются исходя из граничных условий. Исследуемая в рамках рассматриваемой модели структура представляет собой набор слоев из различных материалов, граничащая с двумя полубесконечными средами (слева и справа от нее). Каждый из этих компонентов имеет свои акустические, электрические и пьезоэлектрические параметры (ρ , c , ε , e). Как следствие, количественные параметры электроакустических процессов (в частности, фазовая скорость распространения акустических колебаний) может меняться от слоя к слою. Выражения (2) при этом остаются неизменными, однако значения коэффициентов будут свои для каждого слоя.

В качестве граничных условий, позволяющих определить конкретные значения этих коэффициентов, используются условия непрерывности механических смещений (величина отклонения точки от положения равновесия при акустических колебаниях) и механических напряжений на границах слоев.

Система, составленная из таких условий, записанных для каждой границы в структуре, будет связывать между собой только коэффициенты β . При нулевом векторе правых частей (отсутствии прямых механических воздействий на структуру), такая система будет описывать собственные акустические колебания структуры. Они возможны только в том случае,

если система допускает ненулевое решение, что возможно только при вырождении матрицы системы. Подбирая частоту (от которой зависят фазовые набег акустических волн в слоях) таким образом, чтобы определитель матрицы системы был равен нулю, можно определить собственный спектр системы, а также получить распределения механических смещений и напряжений на собственных модах (с точностью до постоянного множителя).

Чтобы рассчитать электрический отклик такой структуры, необходимо ввести в систему дополнительные уравнения, описывающие электрическое воздействие. Сделать это можно двумя способами: задав условия на ток или напряжения. Как показано в работе, коэффициенты α прямо пропорциональны токам смещения через слои. Следовательно, задав условия на ток, можно сразу получить эти коэффициенты. Далее остается лишь найти коэффициенты β , затем рассчитать падения потенциала на слоях, и затем по закону Ома определить импедансы слоев.

Для проверки полученного математического аппарата, было произведено контрольное моделирование существующих экспериментальных данных, описывающих работу структур с двумя активными слоями [8, 9], подтвердившее корректность математического аппарата.

Третья глава посвящена исследованию условий формирования возбуждаемого спектра собственных мод акустических колебаний при различных вариантах взаимных полярностей управляющих напряжений на слоях сегнетоэлектрика с наведенным пьезоэффектом.

В качестве простейшей модели, пригодной для исследования и пояснения общих принципов, используется так называемый *примитивный резонатор* — структура из нескольких активных слоев одинаковой толщины, с полностью свободными внешними границами. Боковые и промежуточные электроды полагаются бесконечно тонкими.

Явление перестройки с первой моды на вторую при смене взаимной полярности в структуре с двумя активными слоями, иллюстрируется на примере двухслойного примитивного резонатора (см. рис. 1). При суммарной толщине резонатора $8 \mu\text{м}$, первые четыре собственных моды должны иметь частоты 0.55, 1.10, 1.66 и 2.21 ГГц соответственно.

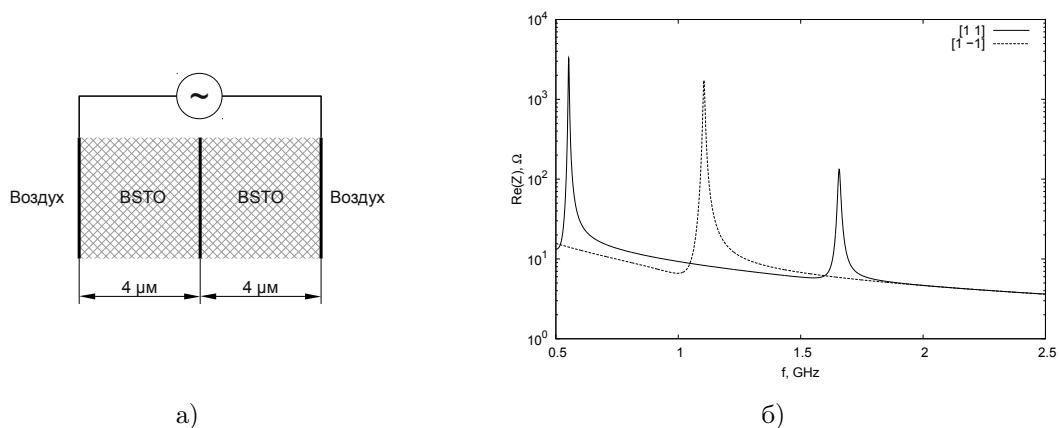


Рисунок 1 — Двухслойный резонатор: конструкция и схема подключения (а), частотные зависимости действительной части импеданса при различных полярностях управляющих напряжений (б)

Для определения факта возбуждения тех или иных собственных мод при выбранном сочетании полярностей, используется частотная зависимость действительной части электрического импеданса структуры ($\text{Re}(Z)$), измеренного на порту подключения источника. При

возбуждении моды, на этой зависимости, на соответствующей частоте, возникает характерный пик.

Как видно из графика, при одинаковых полярностях управляющих напряжений на обоих слоях (кривая «[1 1]») структура ведет себя, как однослойный резонатор, т.е. в ней возбуждаются только моды с нечетными номерами (в наблюдаемом частотном диапазоне это первая и третья моды). Вторая и четвертая моды при этом не возбуждаются.

При противоположных полярностях управляющих напряжений (кривая «[1 - 1]»), возбуждается только вторая мода. Первая, третья и четвертая не возбуждаются.

Факт возбуждения первой моды только при совпадающей полярности управляющих напряжений, а второй — только при противоположной, согласуется с экспериментальными данными. В то же время, факт возбуждения третьей моды при совпадающих полярностях также вполне закономерен: при одинаковых полярностях вся структура функционирует как однослойная. И как уже известно из простейших выкладок, рассмотренных в литературном обзоре, в таких структурах возбуждаются все моды с нечетными номерами (первая, третья, пятая и т.д.). Таким образом, поведение используемой модели в этом вопросе согласуется с существующим теоретическим подходом.

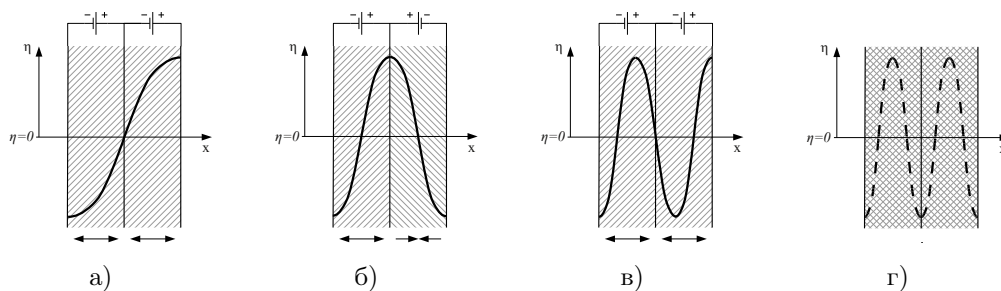


Рисунок 2 — Эпюры механических смещений для первой (а), второй (б), третьей (в) и четвертой (г) собственных акустических мод в двухслойном примитивном резонаторе

Вернемся к возбуждению второй моды. Как видно из эпюры механических смещений этой моды (см. рис. 2б), при колебаниях в данной моде, внешние границы структуры движутся в одной фазе, и расстояние между ними остается неизменным. При этом средняя плоскость структуры движется в противофазе к ним. Таким образом, структура, с точки зрения внешнего наблюдателя, колеблется, не сжимаясь и не расширяясь. Возбудить при помощи внешнего гармонического сигнала вторую моду в простейшей однослойной структуре невозможно (а, как было показано выше, при одинаковой полярности управляющих напряжений двухслойный резонатор ведет себя как однослойный).

Из эпюр первой и третьей мод (см. рис. 2) видно, что на этих модах границы структуры движутся в противофазе, и вся структура, с точки зрения стороннего наблюдателя, ритмически сжимается и расширяется. Возбуждение однослойной структуры на таких модах не представляет трудности — достаточно лишь подать вынуждающий сигнал соответствующей частоты.

Что же происходит, когда к двухслойной структуре прикладываются управляющие напряжения противоположных знаков? В результате смены знака перед членами уравнений, содержащими в качестве множителя пьезокоэффициент материала второго слоя, этот слой начинает воспринимать воздействие внешнего сигнала *в противофазе* относительно первого

слоя. В результате, фактически формируются два механически связанных однослойных резонатора, каждый из которых колеблется на своей первой моде (частота которой соответствует частоте второй моды всей структуры). При этом их колебания сдвинуты по фазе друг относительно друга на половину цикла. Полученная в результате картина точно соответствует эюре второй моды.

Таким образом, фактически создается систему из двух резонаторов, каждый из которых возбуждается на своем спектре мод (первой, третьей, пятой и т.д.), что соответствует второй, шестой, десятой и т.д. модам всей структуры.

Аналогичного эффекта можно достичь также путем подключения каждого из слоев к своему источнику сигнала, со сдвигом фаз между сигналами источника на π .

Стоит отметить, что возбуждение первой (см. рис. 2а) и третьей (см. рис. 2в) мод в таком режиме не происходит, так как эти моды предполагают движение границ слоев в одной фазе друг относительно друга.

Интересно, что четвертая мода (см. рис. 2г) не возбуждается ни при каком сочетании полярностей: даже при «разделении» системы на два резонатора, с точки зрения каждого из них эта мода является второй, и ее возбуждение в однослойной структуре невозможно.

Четвертая глава посвящена дальнейшему развитию и математическому описанию принципов селекции собственных мод в резонаторах с произвольным количеством слоев сегнетоэлектрика с наведенным пьезоэффектом, при манипуляции как полярностями, так и величинами управляющих напряжений на слоях.

Рассмотрим резонатор с четырьмя активными слоями. Конструкция такого резонатора, схема его подключения к источнику сигнала, а также частотные зависимости действительной части импеданса при различных сочетаниях полярностей управляющих напряжений на слоях, приведены на рис. 3.

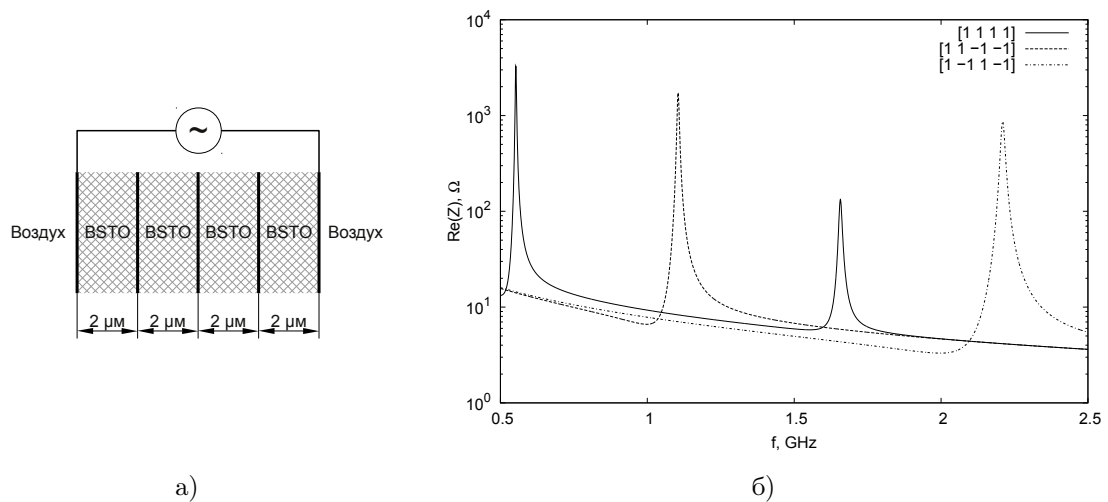


Рисунок 3 — Четырехслойный резонатор: конструкция и схема подключения (а), частотные зависимости действительной части импеданса при различных полярностях управляющих напряжений (б)

Как видно из графика (см. рис. 3б),

- При одинаковых полярностях управляющих напряжений на всех слоях («[1 1 1 1]»), резонатор ведет себя аналогично монолитному однослойному: возбуждаются только нечетные моды (первая и третья).
- При одинаковой полярности управляющих напряжений на первых двух слоях, и противоположной — на двух других («[1 1 -1 -1]»), резонатор ведет себя аналогично двухслойному, взятому при противоположных полярностях на слоях: из четырех наблюдаемых мод, возбуждается только вторая.
- При чередующихся полярностях управляющих напряжений на слоях («[1 -1 1 -1]»), в резонаторе возбуждается только четвертая мода. Действительно, режим, когда структура делится на четыре резонатора, причем каждый из них работает в противофазе относительно соседних, точно соответствует эпюре механических управляющих напряжений на четвертой моде (см. рис. 4).

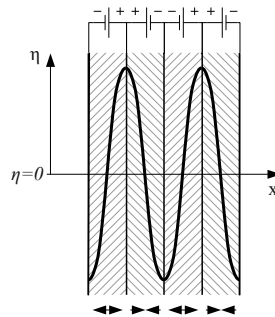


Рисунок 4 — Возбуждение четвертой моды в четырехслойном резонаторе

Таким образом, можно выделить три режима, в двух из которых возбуждается только по одной моде, и в одном — сразу две. Однако, для практического применения подобных резонаторов (например, в качестве элементов перестраиваемых фильтров) необходимо подавление паразитных полос пропускания, т.е. перестройка между четырьмя режимами, в каждом из которых возбуждается только одна мода. Можно ли добиться такого эффекта?

Чтобы ответить на этот вопрос, вернемся к эпюрам распределений механических смещений на первой и третьей модах, приведенных в начале предыдущей главы. Разделим резонатор на три секции: первая и третья содержат по одному боковому слою, вторая — два центральных. Такое разделение наиболее геометрически близко к конструкции трехслойного резонатора, в которой рассматриваемую задачу удалось решить хотя бы частично — добиться возбуждения третьей моды при подавлении первой. Попробуем воспроизвести такую ситуацию в четырехслойном резонаторе, подав на слои смещения [1 -1 -1 1]. Результат моделирования приведен на рис. 5. Для сравнения также показано исходное распределения при одинаковых полярностях.

Как видим, полностью избавиться от первой моды не удалось, однако наблюдается уменьшение резонансного пика первой моды и увеличение пика третьей, по сравнению с режимом одинаковых полярностей. Чтобы добиться полного подавления «лишних» мод, необходимо выйти за рамки, в которых исследование оставалось до сих пор. В предыдущих модельных опытах менялись лишь полярности управляющих напряжений, в то время как их абсолютные величины оставались неизменными. Как было показано на примере двухслойной и четырехслойной структур, полярности управляющих напряжений определяют знаки, с учетом кото-

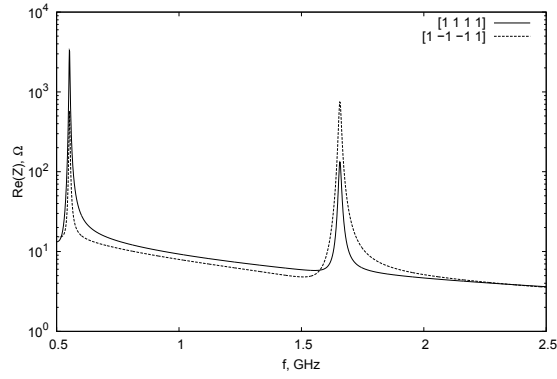


Рисунок 5 — Попытка разделения первой и третьей мод в четырехслойном резонаторе путем манипуляции полярностями управляющих напряжений (частотные зависимости действительной части электрического импеданса)

рых суммируются вклады амплитуд колебаний слоев в возбуждение моды (иными словами, будут ли колебания соседних слоев усиливать или, наоборот, компенсировать друг друга). Но также вполне логичным будет предположить, что *величина* смещения определяет множитель амплитуды. Действительно, изменение величины поля смещения в определенных пределах (до выхода на насыщение зависимости $e(P_{dc})$) приводит к практически пропорциональному изменению величины пьезокоэффициента e , который несомненно влияет на эффективность возбуждения акустических колебаний под действием СВЧ поля, а также на их обратное преобразование в электрический сигнал.

Чтобы вычислить величины управляющих напряжений, соответствующие подавлению одной моды, одновременно с эффективным возбуждением другой, на основании выявленных закономерностей, была предложена функция-критерий $f^i(\vec{c})$. Эта функция характеризует эффективность возбуждения i -й моды при сочетании напряжений смещения на слоях, заданных коэффициентами c_j , и имеет следующий вид:

$$f^i(\vec{c}) = \sum_{j=1}^n c_j \Delta\eta_j^{(i)}, \quad (3)$$

где n — число слоев в структуре, $\Delta\eta_j^{(i)}$ — амплитуда взаимных колебаний границ j -го слоя на i -й моде со знаком, характеризующим фазу колебаний относительно соседних слоев (если $\Delta\eta_j \Delta\eta_{j+1} > 0$, j -й и $(j+1)$ -й слои пульсируют в фазе, если меньше нуля — в противофазе), c_j — модулирующие коэффициенты, зависящие от поля смещения на j -м слое (величина c_j зависит от напряженности поля, знак c_j меняется при смене полярности).

Определение величин $\Delta\eta_j^{(i)}$ для первой и третьей мод в четырехслойной структуре иллюстрируется на рис. 6. Стоит отметить что, так как речь идет о *собственных* модах, эти величины можно определить лишь с точностью до постоянного множителя. Следовательно, то же самое можно сказать и про функцию f^i . Однако, для функции-критерия оптимизации, такой подход вполне приемлем.

Величины c_j также определяются с точностью до постоянного множителя. Поэтому, для удобства поиска оптимального решения, ограничим их значениями в диапазоне ± 1 :

$$-1 \leq c_j \leq 1 \quad j = 1 \dots n \quad (4)$$

Максимальное по абсолютной величине значение f^i соответствует эффективному возбуждению i -й моды, нулевое — отсутствию возбуждения. В силу однородности структуры,

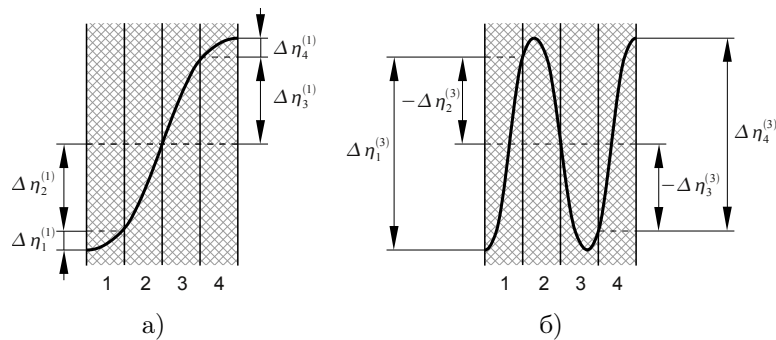


Рисунок 6 — Амплитуды колебаний границ слоев на первой (а) и третьей (б) модах. Верхний индекс — номер моды, нижний — номер слоя

распределения $\eta(x)$ для собственных мод примитивных резонаторов будут иметь синусоидальную форму. Расчет значений f^i для рассмотренных выше примеров подтверждает корректность данного критерия.

Вернемся к вопросу разделения первой и третьей мод в четырехслойном резонаторе. Для получения численного решения задачи, необходимо сформулировать ее в рамках возможностей современных численных методов. Итак, необходимо решить задачу максимизации (минимизации) $f(\vec{c})$ для одной моды, при условии $f(\vec{c}) = 0$ для другой. Наиболее простым и эффективным является симплекс-метод, используемый при решении задач линейного программирования. Он позволяет максимизировать/минимизировать линейные функции при наличии ограничений на диапазоны переменных (как в (4)), а также ограничений в виде линейных уравнений и неравенств.

Максимизировать или минимизировать функцию (3) — не принципиально, так как ее знак определяется лишь выбранной системой отсчета, в которой исчисляются фазы колебаний слоев и полярности управляющих напряжений. Для единообразия, будем придерживаться традиций теории численных методов, в рамках которой обычно решается задача минимизации.

Таки образом, требуется решить задачи

$$\min_{c_j} f^1(\vec{c}) \Big|_{f^3(\vec{c})=0} \quad (5)$$

$$\min_{c_j} f^3(\vec{c}) \Big|_{f^1(\vec{c})=0} \quad (6)$$

(ограничения (4) в этой записи опущены, однако они применяются к обеим задачам). Результаты решения приведены в таблице 1 (в первой колонке указывается номер возбуждаемой моды, для которой функция минимизируется).

Таблица 1 — Оптимальные коэффициенты полей смещения для разделения мод

№ моды	c_1	c_2	c_3	c_4
1	0.414	1.000	1.000	0.414
3	1.000	-0.414	-0.414	1.000

Результаты моделирования четырехслойной структуры с соответствующими значениями напряженности поля смещения приведены на рис. 7.

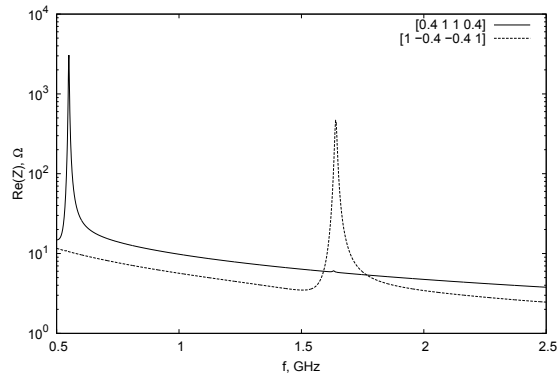


Рисунок 7 — Разделение первой и третьей мод в четырехслойном резонаторе (частотные зависимости действительной части импеданса при рассчитанных значениях управляющих напряжений)

Как видим, сделанные выше предположения о влиянии величин управляющих напряжений на возбуждение мод, полностью подтвердились. При условии $f^i(\vec{c}) = 0$, резонатор воспринимает i -ю моду аналогично тому, как однослойный резонатор воспринимает вторую и четвертую моды. Действительно, в однослойном резонаторе $\Delta\eta_1^{(i)} = 0$ и $f^i \equiv 0$ для $i = 2, 4, 6, \dots$. В таких условиях возбуждение i -й моды невозможно. И наоборот, если $f^i(\vec{c}) \neq 0$, происходит возбуждение моды.

Таким образом, методика оптимизации, основанная на использовании функции-критерия f^i , позволяет осуществлять управляемую селекцию собственных мод резонатора, путем манипулирования как полярностями, так и величинами управляющих напряжений на активных слоях. Стоит отметить, что аналогичный подход применим не только к примитивным резонаторам, но и к структурам с электродами конечной толщины. В частности, на рис. 8 приводится результат моделирования структуры с платиновыми электродами толщиной 200 нм. Несмотря на возникновение слабых «паразитных» пиков вследствие неоднородности структуры, возможность управляемого переключения между модами сохраняется.

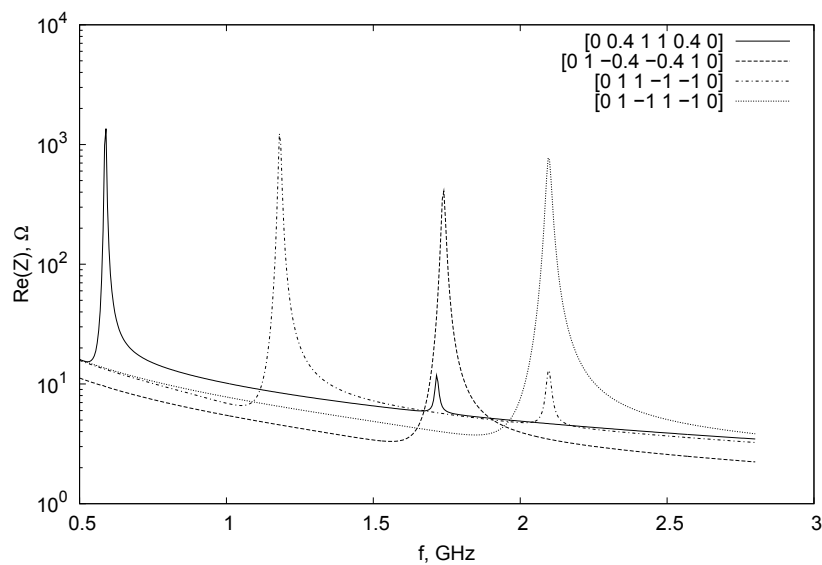


Рисунок 8 — Результаты моделирования оптимизированной четырехслойной структуры

В работе сформулирован *принцип селективности*, построенный на основании анализа функции f^i :

Наиболее эффективное возбуждение n -й моды обеспечивается в резонаторе из n одинаковых слоев при условии чередования полярностей на слоях. При этом также возбуждаются высшие моды с номерами, идущими с шагом $2n$.

Частные проявления этого принципа для рассмотренных резонаторов иллюстрируются графиками на рис. 9. В двухслойном резонаторе возбуждаются вторая, шестая, десятая, четырнадцатая и восемнадцатая моды (шаг 4); в трехслойном резонаторе — третья, девятая, пятнадцатая, двадцать первая моды (шаг 6); в четырехслойном — четвертая, двенадцатая, двадцатая (шаг 8).

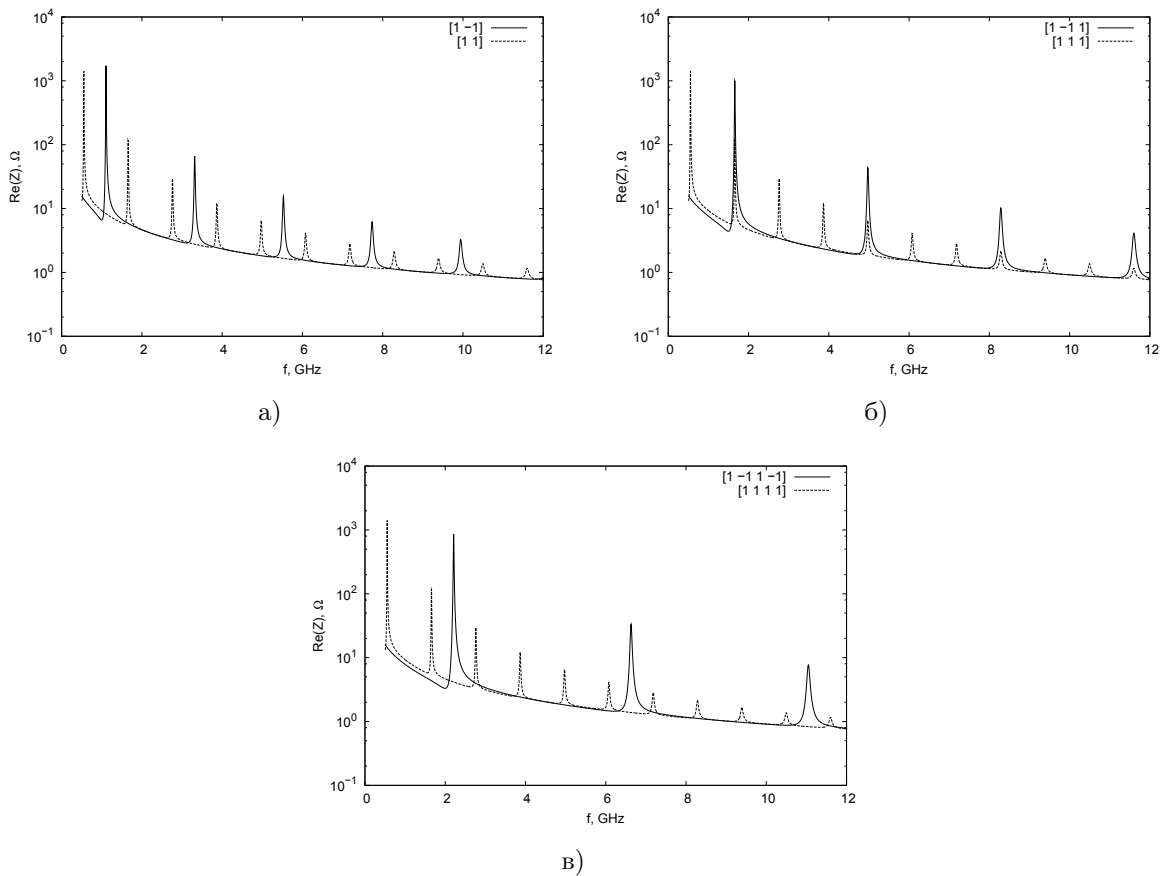


Рисунок 9 — Демонстрация принципа селективности: моделирование электрического отклика двухслойного (а), трехслойного (б) и четырехслойного (в) ОАВ-резонаторов в расширенном диапазоне частот

Данный принцип не только подтверждает корректность функции-критерия f^i , но и позволяет прогнозировать поведение многослойных структур в широком диапазоне частот.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

Основные результаты диссертационной работы

1. Разработан математический аппарат, основанный на матричном представлении системы граничных условий для электромеханических уравнений, позволяющий моделировать электрический отклик тонкопленочных структур с произвольным числом слоев (как активных, так и пассивных) в рамках одномерного линейного приближения.
2. Проанализированы существующие экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности перестройки спектра возбуждаемых мод в структурах с двумя слоями сегнетоэлектрика в параэлектрическом состоянии. Проведено контрольное моделирование с использованием разработанного математического аппарата, показавшее его корректность.
3. Смоделирована работа одно-, двух-, трех- и четырехслойных примитивных резонаторов при различных полярностях и величинах управляющих напряжений на слоях. Дано объяснение механизму перестройки спектра возбуждаемых мод при смене полярностей управляющих напряжений на слоях.
4. Показано, что эффективность возбуждения и детекции собственных мод определяется суммой амплитуд взаимных колебаний границ активных слоев с учетом коэффициентов, зависящих от полярностей и величин полей смещения на слоях.
5. Сформулирована функция f^i , позволяющая оценить эффективность возбуждения i -й моды при заданных величинах и полярностях управляющих напряжений на слоях. Рассмотрены вопросы постановки и решения задач по разделению мод в резонаторах с использованием функции f^i в качестве критерия.
6. Выведен принцип селективности, описывающий условия наиболее эффективного возбуждения выбранной моды. Проведено контрольное моделирование структур с различным числом активных слоев, показавшее корректность этого принципа.
7. Рассмотрены частные проявления этого принципа, включая
 - Возможность возбуждения второй моды в примитивном резонаторе путем использования двух слоев с противоположными полярностями управляющих напряжений.
 - Возможность возбуждения третьей моды отдельно от первой в трехслойном резонаторе.
 - Возможность перестройки между двумя спектрами мод («симметричными» и «антисимметричными») в резонаторе с двумя активными слоями, разделенными пассивным слоем.
 - Возможность возбуждения четвертой моды в четырехслойном резонаторе.
 - Возможность возбуждения первой и третьей мод отдельно друг от друга в четырехслойном резонаторе.
8. Приведен пример оптимизации спектра резонатора с четырьмя активными слоями и электродами ненулевой толщины, а также показана возможность его перестройки между первыми четырьмя модами.

Основные публикации по теме диссертации

Из перечня ВАК

1. А.Б. Козырев, А.К. Михайлов, А.М. Прудан, С.В. Пташник. Поле гиперзвуковых смещений в многослойном конденсаторе с сегнетоэлектрической пленкой на частотах дисперсии импеданса, Письма в Журнал технической физики, 2009, том 35, вып. 19, стр.75–83.
2. A. Mikhailov, A. Prudan, S. Ptashnik, T. Samoiloa and A. Kozyrev / Switchable FBAR Based on Paraelectric Films // 2010 European Microwave Conference, Conference Proceedings Book. — 2010. — P. 791–794.
3. Electronically switchable bulk acoustic wave resonator based on paraelectric state ferroelectric films / A.B. Kozyrev, A.K. Mikhailov, S.V. Ptashnik, S.V. Zinoviev, P. K. Petrov, N. McN Alford and T. Wang // Electronics Letters. — 2011. — Vol. 47. — Issue 24. — p.1326–1327.
4. Selective normal mode excitation in multilayer thin film bulk acoustic wave resonators / A. Kozyrev, A. Mikhailov, S. Ptashnik, P. Petrov, and N. Alford // Applied Physics Letters. — 2014. — Vol. 105. — p. 162910.

Патенты и свидетельства

5. Патент РФ №2397607 от 17.07.2009, «Сегнетоэлектрический акустический резонатор и способ перестройки его резонансной частоты» / Козырев А.Б., Михайлов А.К., Прудан А.М., Пташник С.В. // Опубликовано 20.08.2010 Бюл. №23. Патентообладатель: СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
6. Патент РФ на полезную модель от 29.09.2011, №115567 «Управляемый пьезоэлектрический трансформатор напряжения» / Козырев А.Б., Михайлов А.К., Пташник С.В. // Опубликовано 27.04.2012 Бюл. №12. Патентообладатель: СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
7. Патент РФ от 20.05.2011 №2468507, «Резонатор на основе высших типов объемных акустических волн» / Козырев А.Б., Михайлов А.К., Пташник С.В. // Опубликовано 27.11.2012 Бюл. №33. Патентообладатель: СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012610179 от 10.01.2012. «Программный комплекс для моделирования резонансных электроакустических явлений в многослойных структурах». Авторы: Козырев А.Б., Михайлов А.К., Пташник С.В.

Прочие публикации

9. Михайлов А. К., Пташник С. В., Козырев А. Б. Селективное возбуждение собственных акустических мод внешним СВЧ полем в многослойных структурах с двумя сегнетоэлектрическими пленками. Материалы XII международной конференции «ФИЗИКА ДИЭЛЕКТРИКОВ». — 2011. — Том 1, — с. 359–362.
10. Михайлов А. К., Пташник С. В., Зиновьев С.В., Козырев А. Б. Перестраиваемый СВЧ фильтр на объемных акустических волнах. Материалы всероссийской научно-технической конференции «Микроэлектроника СВЧ». — 2012, — с. 120–123
11. Михайлов А. К., Пташник С. В., Зиновьев С.В., Козырев А. Б. Экспериментальное исследование резонаторов на объемных акустических волнах. Материалы всероссийской научно-технической конференции «Микроэлектроника СВЧ». — 2013, — с. 141–143.

Цитированная литература

1. RF bulk acoustic wave filters for communications / Ed. by K.-Y. Hashimoto. — Norwood, MA, USA: Artech House, 2009.
2. *Gevorgian, S.* Tuneable Film Bulk Acoustic Wave Resonators / S. Gevorgian, A. Tagantsev, A. K. Vorobiev. Engineering Materials and Processes. — London: Springer-Verlag, 2013.
3. *Noeth, A.* Electrical tuning of DC bias induced acoustic resonances in paraelectric thin films / A. Noeth, T. Yamada, A. K. Tagantsev // *J. Appl. Phys.* — 2008. — Vol. 104. — P. 094102.
4. *Noeth, A.* Tuning of direct current bias-induced resonances in micromachined $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ thin-film capacitors / A. Noeth, T. Yamada, V. Sherman // *J. Appl. Phys.* — 2007. — Vol. 102. — P. 114110.
5. *Lakin, K.* High-Q microwave acoustic resonators and filters / K. Lakin, G. Kline, K. McCarron // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* — 1993. — Dec. — Vol. 41, no. 12. — Pp. 2139–2146.
6. *Mason, W. P.* Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics / W. P. Mason. — Van Nostrand Reinhold, 1950.
7. *Vendik, I. B.* Modeling tunable bulk acoustic resonators based on induced piezoelectric effect in BaTiO_3 and $\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{TiO}_3$ films / I. B. Vendik, P. A. Turalchuk, O. G. Vendik // *J. Appl. Phys.* — 2008. — Vol. 103. — P. 014107.
8. *Gururaja, T. R.* Medical ultrasonic transducers with switchable frequency bands centered about f_0 and $2f_0$ / T. R. Gururaja, A. Shurland, J. Chen // Proc. of 1997 IEEE Ultrasonic Symposium. — 1997. — August. — Pp. 1660–1662.
9. *Kozyrev, A.* US Patent 7,936,553. Capacitors adapted for acoustic resonance cancellation. — 2011. — May.