

На правах рукописи

Туральчук Павел Анатольевич

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ СВЧ-РЕЗОНАТОРЫ НА ОБЪЕМНЫХ
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В ПЛЕНКЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА
В УСЛОВИЯХ НАВЕДЕННОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТА

Специальность: 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Вендик Ирина Борисовна

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, Козырев Андрей Борисович

кандидат физико-математических наук, Пронин Игорь Петрович

Ведущая организация: НИИ «Гириконд»

Защита состоится «29» июня 2010 г. в 17.00 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 университета.

Автореферат разослан «28» мая 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций,
к.т.н., доцент

Е.А. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие современных систем беспроводной связи невозможно без постоянного совершенствования характеристик отдельных составляющих системы. Повышенный интерес к устройствам на объемных акустических волнах проявляется благодаря таким их преимуществам как высокая добротность, миниатюрные размеры, низкая себестоимость и высокая степень интеграции, используя существующие интегральные технологии.

Решающим фактором, определяющим возможность применения объемных акустических резонаторов (ОАР) в СВЧ-устройствах, является высокая акустическая добротность, которая достигает порядка 1000-2000. Фильтры и дуплексеры на основе объемных акустических резонаторов успешно разрабатываются для использования в СВЧ-трактах систем сотовой связи, беспроводных сетей и систем спутниковой навигации для разделения чрезвычайно узких частотных каналов связи, обеспечивая низкий уровень вносимых потерь и высокую помехоустойчивость. Применение одиночных ОАР в составе СВЧ-генераторов, предназначенных для первичной обработки сигналов, позволяет обеспечить предельно низкий уровень мощности фазовых шумов.

Скорость звука в пьезоэлектрической среде на 3-4 порядка меньше скорости света, и, соответственно, открываются возможности для разработки устройств, массогабаритные показатели которых на несколько порядков меньше существующих аналогов. Кроме того, устройства на основе ОАР имеют хорошую совместимость с материалами, используемыми в монолитных интегральных схемах, что позволяет изготавливать СВЧ-устройства в едином технологическом цикле без использования операции монтажа навесных элементов.

ОАР выполняются с применением пьезоэлектрических материалов, характеризующихся высокой акустической добротностью и высоким значением пьезоэлектрического модуля. В то же время использование среды с электрически управляемыми акустическими параметрами даст возможность значительно расширить функциональные возможности устройств на основе ОАР. С этой целью может быть использован наведенный пьезоэлектрический эффект, проявляющийся в сегнетоэлектрических материалах с выраженным электрострикционным эффектом в присутствии постоянного поля смещения.

Исследование электромеханических явлений в пленке сегнетоэлектрика и возможностей применимости ОАР для перестраиваемых СВЧ-устройств определяет актуальность диссертационной работы. В работе исследуется электромеханическая модель наведенного пьезоэффекта в пленке твердого раствора титаната-бария стронция и титаната бария и анализируются характеристики перестраиваемого ОАР.

Цель диссертационной работы – исследование электроакустических характеристик резонатора на объемных акустических волнах в пленке сегнетоэлектрика в условиях наведенного пьезоэффекта и возможностей практического применения объемных акустических резонаторов для перестраиваемых СВЧ-устройств связи.

Цель диссертационной работы была достигнута решением следующих задач:

- 1) Разработка электромеханической модели наведенного пьезоэлектрического эффекта в тонкой пленке сегнетоэлектрика с учетом вклада четных и нечетных электромеханических эффектов, включая электрострикцию, нелинейную по механической деформации.
- 2) Исследование характеристик резонатора на объемных акустических волнах в пленках $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ и BaTiO_3 с использованием акустического зеркала и их экспериментальная верификация.
- 3) Моделирование характеристик СВЧ перестраиваемого полосно-пропускающего фильтра и СВЧ-генератора, управляемого напряжением, на основе объемного акустического резонатора и определение электрических и акустических характеристик резонатора, необходимых для его практического использования.

Научная новизна работы:

- 1) Установлен вклад коэффициента электрострикции, нелинейного по механической деформации, в изменение частот резонанса и антирезонанса объемного акустического резонатора на основе пленки сегнетоэлектрика.
- 2) Произведена оценка среднего значения коэффициента электрострикции нелинейной по механической деформации для пленок $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ и BaTiO_3 .
- 3) Предложена модель зависимости электромеханического коэффициента связи от приложенного напряжения, учитывающая пьезоэффект, электрострикцию и электрострикцию, нелинейную по механической деформации.
- 4) С использованием модели наведенного пьезоэффекта рассчитаны и экспериментально подтверждены характеристики входного эквивалентного импеданса объемного акустического резонатора на основе пленок $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ и BaTiO_3 с учетом брэгговского зеркала.
- 5) Выполнена оценка характеристик СВЧ перестраиваемого полосно-пропускающего фильтра и СВЧ-генератора, управляемого напряжением, на основе объемного акустического резонатора на пленке $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ с использованием разработанной модели.

Основные методы исследования:

- а) Теоретические: теория цепей, теория электромеханических процессов, уравнения электродинамики;
- б) Экспериментальные: измерения входного электрического импеданса ОАР.

Научные положения, выносимые на защиту:

- 1) Электромеханический коэффициент в материалах с наведенным пьезоэффектом имеет максимум в зависимости от приложенного напряжения, положение которого определяется качеством пленки.

- 2) Изменение частоты резонанса и антирезонанса в структуре с объемными акустическими волнами определяется вкладом коэффициента электрострикции M , нелинейного по отношению к механической деформации.
- 3) Нелинейный коэффициент электрострикции M может быть отрицательным и положительным в зависимости от температуры и типа сегнетоэлектрического материала.
- 4) Применимость перестраиваемых акустических резонаторов на сегнетоэлектрической пленке ограничена снизу диэлектрической проницаемостью пленки и ее акустической добротностью.

Практическая значимость результатов работы:

- 1) Разработанная теоретическая модель наведенного пьезоэффекта в сегнетоэлектрике на основе электромеханических уравнений может быть применена для разработки перестраиваемых устройств с использованием ОАР на сегнетоэлектрической пленке.
- 2) Определены электрические и акустические характеристики пленки $\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{TiO}_3$, необходимые для практического использования перестраиваемых ОАР в составе СВЧ-устройств.

Апробация работы: Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

На международных конференциях: международный студенческий семинар «Microwave and Optical applications of novel physical phenomena» Queen's University Belfast, UK 2008г; международный студенческий семинар «Microwave and Optical applications of novel physical phenomena» ETU, St. Petersburg, 2009г; международная европейская научная конференция European Microwave Conference, 8-12 Октября, 2007, Мюнхен; European Microwave Conference, 27-31 Октября, 2008, Нидерланды; международная конференция Eurocon 2009 (May 2009, Saint-Petersburg, Russia).

На конференциях: XVIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков ВКС - XVIII 2008г; семинары профессорско-преподавательского состава СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» 2007, 2008, 2009, 2010г, научно-технические семинары «Современные проблемы техники и электроники СВЧ» 2007, 2008, 2009, 2010г.

Публикации: Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 12 статьях и докладах, среди которых 2 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 10 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях, перечисленных в конце автореферата

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения. Работа изложена на 119 страницах машинописного текста, включает 81 рисунок, 7 таблиц и список литературы из 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Одиночные резонаторы на объемных акустических волнах и устройства на их основе» посвящена обзору литературы по теме работы.

В первом параграфе данной главы рассмотрены преимущества использования ОАР на основе пьезоэлектрических пленок в составе СВЧ-устройств для систем телекоммуникаций. Обсуждаются преимущества и недостатки различных конфигураций ОАР: мембранного типа и с акустической изоляцией от подложки. Во втором и третьем параграфах рассмотрены конфигурации и характеристики узкополосных фильтров на ОАР, а также различные схемотехнические решения конструкций генераторов, управляемых напряжением, с использованием высокодобротных ОАР.

Четвертый параграф посвящен описанию электромеханических явлений в пьезоэлектрической среде системой линейных электромеханических уравнений. Представлены выражения для определения входного эквивалентного импеданса, частот резонанса и антирезонанса и электромеханического коэффициента связи в структуре на объемных акустических волнах. Приводятся выражения для описания характеристик ОАР с использованием эквивалентной электрической схемы с сосредоточенными параметрами.

В последнем параграфе данной главы обсуждаются возможности электрической перестройки акустических параметров ОАР. В заключение сформулированы задачи исследований в рамках диссертационной работы.

Глава 2 «Электромеханическая модель наведенного пьезоэлектрического эффекта» посвящена разработке теоретической модели наведенного пьезоэлектрического эффекта в тонкой пленке сегнетоэлектрика и исследованию характеристик ОАР на пленках $Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO_3$ и $BaTiO_3$.

В сегнетоэлектрических материалах с центросимметричной кубической структурой $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BSTO) пьезоэлектрический эффект в параэлектрической фазе не наблюдается. При приложении постоянного электрического поля, возникает наведенный пьезоэффект, являющийся следствием электрострикции. Это явление может быть использовано для электрического управления акустическими параметрами сегнетоэлектрической среды. Перестраиваемый ОАР представляет собой сегнетоэлектрический плоскопараллельный конденсатор, в котором при приложении постоянного и переменного электрического поля возможно электрострикционное преобразование энергии при толщине пленки, сопоставимой с длиной акустической волны.

Для получения термодинамических соотношений, описывающих электромеханические явления в сегнетоэлектрической среде, можно воспользоваться термодинамической функцией плотности свободной энергии. Для сегнетоэлектрической пленки, совершающей колебания по толщине в переменном электрическом поле, параллельном направлению распространения аку-

стической волны целесообразно использовать в качестве независимых переменных механическую деформацию и электрическую индукцию. Тогда плотность свободной энергии примет вид:

$$dF(u_{ij}, D_m) = -\sigma_i du_j - E_m dD_n - B_m dH_n - SdT, \quad (1)$$

где σ_{ijkl} – компоненты тензора механических напряжений, u_{ijkl} – компоненты тензора механической деформации, D_n – компоненты вектора электрической индукции, E_m – компоненты вектора напряженности электрического поля, H_n – компоненты вектора напряженности магнитного поля, B_m – компоненты вектора магнитной индукции, S – энтропия, T – температура.

Если произвести разложение компонент механического напряжения и электрического поля по компонентам деформации и электрической индукции без учета роли тепловых эффектов и магнитного взаимодействия, можно получить следующие электромеханические уравнения в обобщенном виде, ограничиваясь членами третьего порядка:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} = & \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial u_{kl}} \right) du_{kl} + \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial D_n} \right) dD_n + \frac{1}{2!} \left[\left(\frac{\partial^2 \sigma_{ij}}{\partial u_{kl} \partial u_{qr}} \right) du_{kl} du_{qr} + \right. \\ & \left. + 2 \left(\frac{\partial^2 \sigma_{ij}}{\partial u_{kl} \partial D_n} \right) du_{kl} dD_n + \left(\frac{\partial^2 \sigma_{ij}}{\partial D_o \partial D_n} \right) dD_o dD_n \right] + \left(\frac{\partial^3 \sigma_{ij}}{\partial u_{kl} \partial D_o \partial D_n} \right) du_{kl} dD_o dD_n + \dots, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E_m = & \left(\frac{\partial E_m}{\partial u_{kl}} \right) du_{kl} + \left(\frac{\partial E_m}{\partial D_n} \right) dD_n + \frac{1}{2!} \left[\left(\frac{\partial^2 E_m}{\partial u_{kl} \partial u_{qr}} \right) du_{kl} du_{qr} + \right. \\ & \left. + 2 \left(\frac{\partial^2 E_m}{\partial u_{kl} \partial D_n} \right) du_{kl} dD_n + \left(\frac{\partial^2 E_m}{\partial D_n \partial D_o} \right) dD_n dD_o \right] + \left(\frac{\partial^3 E_m}{\partial u_{ij} \partial u_{kl} \partial D_n} \right) du_{ij} du_{kl} dD_n + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Учитывая пьезоэффект, электрострикцию и нелинейную по отношению к механической деформации электрострикцию, электромеханические уравнения преобразуются к виду:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^D u_{kl} - h_{ijn} D_n + G_{ijmn} D_n D_m + M_{ijklmn} u_{kl} D_n D_m, \quad (4)$$

$$E_m = -h_{ijm} u_{kl} + \beta_{mn}^u D_n + \frac{1}{2} G_{ijmn} u_{kl} D_n + M_{ijklmn} u_{ij} u_{kl} D_n. \quad (5)$$

Для тонкой пленки BSTO при комнатной температуре в параэлектрической фазе, в которой колебания совершаются по толщине пленки, данная задача может быть решена в одномерном приближении. В этом случае материал представляет собой изотропную среду, и все тензоры электромеханических уравнений можно представить в виде скалярных величин, т.е. компонент тензора в направлении распространения волны. В присутствии поля смещения и переменного во времени поля $D = D^{(ac)} + D^{(dc)}$ электромеханические уравнения для переменного механического напряжения и переменного электрического поля запишутся в виде:

$$\sigma^{(ac)} = c^D u^{(ac)} - h D^{(ac)} + 2G D^{(ac)} D^{(dc)} + M D^{(dc)^2} u^{(ac)}, \quad (6)$$

$$E^{(ac)} = -h u^{(ac)} + \varepsilon_0^{-1} \varepsilon_r^{-1} D^{(ac)} + 2G D^{(dc)} u^{(ac)}. \quad (7)$$

Электромеханические уравнения учитывают пьезоэлектрический эффект. Возникновение слабого пьезоэлектрического эффекта в пленке BSTO в пара-

электрической фазе объясняется наличием механических напряжений и деформаций в кристаллической решетке. При приложении постоянного электрического поля за счет электрострикции возникает наведенный пьезоэффект. Нелинейная по отношению к деформации электрострикция (или квадратичная электрострикция) проявляется как изменение упругих модулей под действием электрической индукции.

Преобразуем электромеханические уравнения (6) и (7) к виду:

$$\sigma^{(ac)} = \tilde{c}(E^{(dc)})u^{(ac)} - \tilde{h}(E^{(dc)})D^{(ac)}, \quad (8)$$

$$E^{(ac)} = -\tilde{h}(E^{(dc)})u^{(ac)} + \varepsilon_0^{-1}\varepsilon_r^{-1}(E^{(dc)})D^{(ac)}, \quad (9)$$

Здесь $\tilde{c}(E^{(dc)})$ и $\tilde{h}(E^{(dc)})$ - соответственно эффективный модуль упругости и эффективный пьезомодуль:

$$\tilde{c}(E^{(dc)}) = c^D + M \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r (E^{(dc)}) E^{(dc)})^2, \quad (10)$$

$$\tilde{h}(E^{(dc)}) = h - 2G\varepsilon_0 \varepsilon_r (E^{(dc)}) E^{(dc)}. \quad (11)$$

Таким образом, эффективные параметры (10) и (11) являются функциями приложенного постоянного поля смещения.

Во втором параграфе главы определяются электромеханические характеристики акустического резонатора в условиях наведенного пьезоэффекта. Для распространяющихся продольных звуковых колебаний решается волновое уравнение для компоненты механического смещения в направлении приложенного поля, решение которого с соответствующими граничными условиями позволяет определить в (8) и (9) механическую деформацию и переменное электрическое поле в активной области ОАР. Акустическая волна характеризуется волновым числом $k_{ac} = \frac{\omega}{v_{ac}}$, где v_{ac} – скорость акустической волны:

$$v_{ac} = \sqrt{\frac{c^D + M \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r (E^{(dc)}) E^{(dc)})^2}{\rho}}, \quad (12)$$

где ρ – объемная плотность материала. Очевидно, что акустическая скорость в выражении (12) является функцией постоянного поля смещения, что обусловлено вкладом нелинейной по отношению к деформации электрострикцией.

Эквивалентный входной электрический импеданс объемного акустического резонатора со свободными границами определяется выражением:

$$Z_{eq} = \frac{1}{j\omega C_0} \left(1 - K_t^2 \frac{\tan(k_{ac}t)}{k_{ac}t} \right), \quad (13)$$

где C_0 - емкость между электродами акустического резонатора, t – толщина пленки, K_t^2 – электромеханический коэффициент связи, который является функцией приложенного поля смещения и количественно характеризует наведенный пьезоэффект:

$$K_t^2(E^{(dc)}) = 2\varepsilon_0 \varepsilon_r (E^{(dc)}) \tilde{h}(E^{(dc)})^2 \frac{1}{\tilde{c}(E^{(dc)})}. \quad (14)$$

Частоты резонанса f_{res} и антирезонанса f_{ares} находится из условия $Z_{in} \rightarrow 0$ и $Y_{in} \rightarrow 0$. В результате получаем следующие соотношения:

$$f_{res} = \frac{v_{ac}^0 \sqrt{1 + \frac{1}{c^D} M \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \left(E^{(dc)} \right) E^{(dc)} \right)^2 \left(1 - \frac{4}{\pi^2} K_t^2 \left(E^{(dc)} \right) \right)}}{4t}; \quad (15)$$

$$f_{ares} = \frac{v_{ac}^0 \sqrt{1 + \frac{1}{c^D} M \left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \left(E^{(dc)} \right) E^{(dc)} \right)^2}}{4t}, \quad (16)$$

где v_{ac}^0 – акустическая скорость в отсутствии поля смещения

Из выражений (15) – (16) следует, что нелинейный коэффициент электрострикции определяет изменение резонансных частот от приложенного напряжения в условиях антирезонанса и резонанса. Следует обратить внимание, что изменение частоты антирезонанса в условиях наведенного пьезоэффекта обусловлено только вкладом нелинейной по отношению к деформации электрострикции, тогда как сдвиг частоты резонанса определяется вкладом нелинейной электрострикции и электромеханического коэффициента связи.

В третьем параграфе была произведена оценка коэффициента нелинейной электрострикции M . В литературе отсутствуют данные по оценке значений компонентов тензора квадратичной электрострикции, в виду того факта, что найти значения компонентов тензора прямым образом невозможно. Однако среднее значение коэффициента нелинейной электрострикции M может быть оценено из экспериментальных зависимостей диэлектрической проницаемости от приложенного к образцу давления.

Для описания зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика в условиях сжатия следует рассмотреть разложение упругой функции Гиббса по степеням электрической индукции и механического напряжения. Тогда после двукратного дифференцирования упругой функции Гиббса по электрической индукции получим уравнение, определяющее зависимость диэлектрической проницаемости от деформации:

$$\varepsilon_{mn}(D, u) = \frac{1}{\varepsilon_{mn}^{-1} + \xi_{klmn} D_m D_n - G_{ijkl} u_{ij} + M_{ijklmn} u_{ij} u_{kl}} \quad (17)$$

Обратная диэлектрическая проницаемость при одномерной постановке задачи может быть записана в следующем виде:

$$\varepsilon^{-1}(u) = \varepsilon(0)^{-1} - Gu + Mu^2 \quad (18)$$

Из приведенного уравнения следует, что коэффициент нелинейной электрострикции определяет квадратичную часть зависимости обратной диэлектрической проницаемости от механической деформации.

В результате, используя экспериментальные зависимости диэлектрической проницаемости от давления при всестороннем сжатии, было найдено усредненное значение квадратичной электрострикции для монокристаллических образцов титаната стронция и титаната бария. Для SrTiO_3 усредненное значение нелинейного коэффициента электрострикции было оценено в пределах $M \approx - (3 \div 7) \cdot 10^{11} [\text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{А}^2 \cdot \text{с}^2]$. Полагаем, что для материала BSTO коэффициент M того же порядка и знака. Для BaTiO_3 усредненное значение не-

линейного коэффициента электрострикции было найдено в пределах $M \approx (3 \div 8) \cdot 10^{11} [\text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{А}^2 \cdot \text{с}^2]$.

Результаты моделирования относительного изменения частот резонанса и антирезонанса ОАР в условиях наведенного пьезоэффекта с параметрами $c = 0.25 \cdot 10^{12} \text{ Н/м}^2$, $Q = 0.066 \text{ м}^4 / \text{А}^2 \cdot \text{с}^2$ ($Q = G/c^D$) и $|M| = 3 \cdot 10^{11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{А}^2 \cdot \text{с}^2$, принимающего положительный и отрицательный знак, представлены на рис. 1. Знак коэффициента квадратичной электрострикции определяет направление

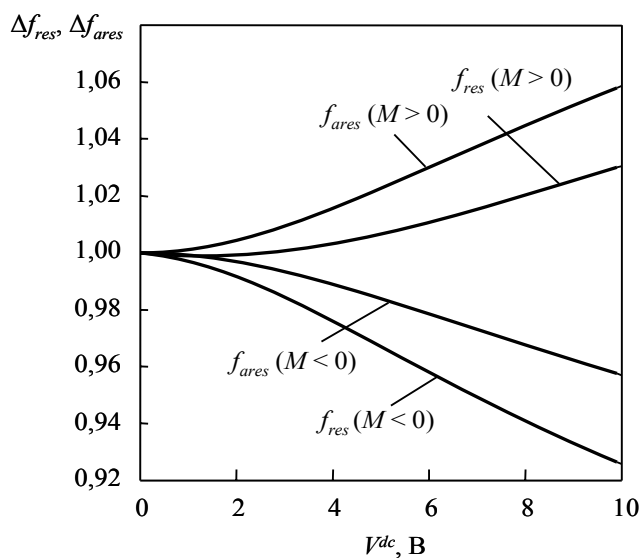


Рис. 1

сдвига резонансных частот ОАР в условиях наведенного пьезоэффекта. Для SrTiO_3 ($M < 0$) наблюдается сдвиг частоты резонанса и антирезонанса при приложении постоянного напряжения в область низких частот, в то время как для BaTiO_3 при $M > 0$ частоты резонанса и антирезонанса в условиях наведенного пьезоэффекта увеличиваются. В соответствии с выражением (15) направление и величина сдвига резонансной частоты обуславливается также вкладом коэффициента электромеханической связи.

В четвертом параграфе произведен анализ многослойного брэгговского зеркала. Брэгговское зеркало, состоящее из чередующихся тонкопленочных четвертьволновых слоев с высоким и низким акустическим импедансом, позволяет акустически изолировать ОАР от материала подложки. Обобщенная структура ОАР на основе пленки BSTO с многослойным брэгговским зеркалом показана на рис.2. Анализ структур выполнялся с использованием эквивалентного представления ОАР, в котором каждый слой резонатора пред-

Al (110 нм)
Au (20 нм)
$\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$
Au (80 нм)
SiO_2 (280 нм)
Au (150 нм)
SiO_2 (280 нм)
Au (150 нм)
SiO_2 (280 нм)
Si (0.5 мм)

Рис. 2

ставлялся в виде отрезка линии передачи со своими волновыми параметрами: акустический импеданс и акустическая скорость. В результате был рассчитан акустический импеданс электродов, находящихся в контакте с пленкой BSTO, с учетом брэгговской структуры (рис. 3). Наблюдается минимум действительной части импеданса электродов в ограниченной полосе частот, что эквивалентно свободным границам.

В пятом параграфе представлены результаты моделирования ОАР на пленке $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ с акустической изоляцией от подложки, полученные с

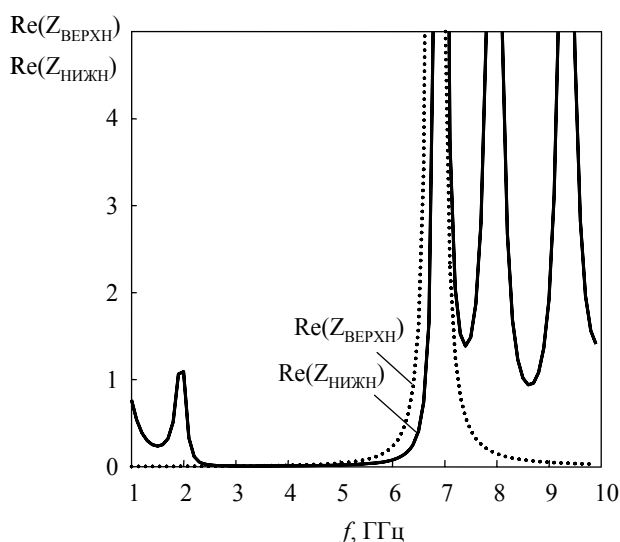


Рис. 3

использованием электромеханической модели наведенного пьезоэффекта. На рис. 4 и рис. 5 показаны действительная часть входного эквивалентного импеданса и проводимости ОАР при различном управляющем постоянном напряжении. В соответствии с результатами анализа акустического отклика ОАР в условиях наведенного пьезоэффекта, наблюдается сдвиг частоты резонанса и антирезонанса в область нижних частот, что определяется знаком коэффициента нелинейной электрострикции M . Сдвиг частоты резонанса

более эффективен за счет дополнительного вклада электромеханического коэффициента связи. Анализ частотной зависимости входного эквивалентного импеданса ОАР в широкой полосе частот позволяет сделать вывод о том, что использование брэгговской структуры полностью подавляет паразитные высшие гармоники на кратных частотах основного резонанса.

В соответствии с результатами моделирования входного эквивалентного импеданса ОАР на пленке BaTiO_3 при изменении приложенного постоянного напряжения частоты резонанса и антирезонанса перестраиваются в область высоких частот, что обусловлено положительным знаком коэффициента M . При этом частота антирезонанса меняется более эффективно по сравнению с частотой резонанса, так как коэффициент электромеханической связи и коэффициент нелинейной электрострикции в выражении (15) имеют разные знаки.

В следующем параграфе произведено моделирование характеристик ОАР на пленке $\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{TiO}_3$ в широком диапазоне температур.

Полагаем, что коэффициент электрострикции, нелинейный по механической деформации, меняет знак вблизи температуры фазового

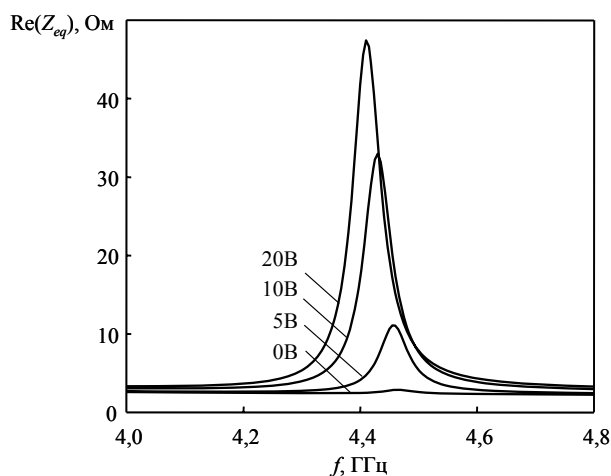


Рис. 4

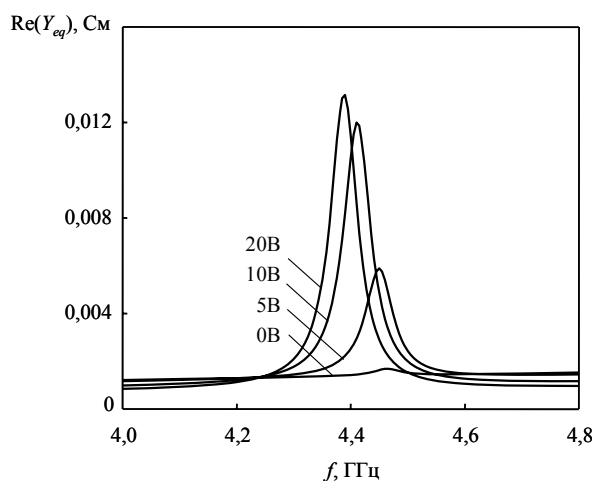


Рис. 5

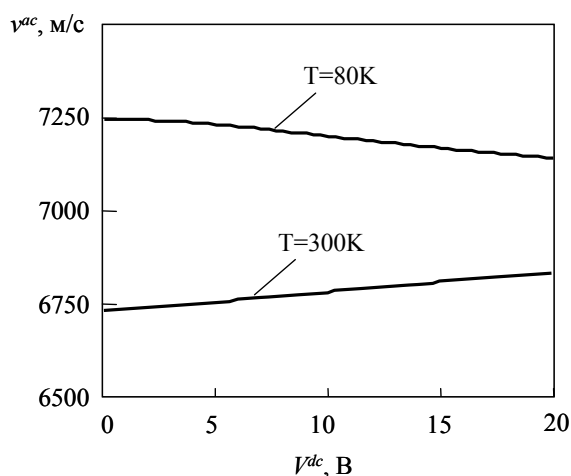


Рис. 6

перехода (T_C) $\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{TiO}_3$. В этом случае для $M < 0$ при $T > T_C$ акустическая скорость волны по толщине пленки BSTO увеличивается в условиях наведенного пьезоэффекта; для $M > 0$ при $T > T_C$ акустическая скорость уменьшается при изменении постоянного поля. Зависимость акустической скорости в пленке $\text{Ba}_{0.25}\text{Sr}_{0.75}\text{TiO}_3$ от приложенного постоянного напряжения показана на рис. 6. Таким образом, было продемонстрировано, что нелинейный

коэффициент электрострикции M может быть отрицательным и положительным в зависимости от температуры и типа сегнетоэлектрического материала.

Для описания зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры и постоянного поля смещения использовалась феноменологическая модель сегнетоэлектрика [1]. Для описания температурных зависимостей пьезомодуля, коэффициента электрострикции и модуля податливости – обратной величины модуля упругости использовались эмпирические модели [2].

В восьмом параграфе произведена оценка влияния дефектности пленки BSTO на электроакустические характеристики ОАР. Было установлено, что электромеханический коэффициент в материалах с наведенным пьезоэффектом характеризуется наличием максимума в зависимости от приложенного напряжения, положение которого определяется качеством пленки.

Степень дефектности материала учитывается параметром ξ_S , используемым в феноменологической модели сегнетоэлектрика [1]. С уменьшением параметра ξ_S наблюдается значительный рост диэлектрической проницаемости пленки BSTO на зависимости $\epsilon_r(V^{dc})$ (рис.7). Исходя из полученных зависимостей было показано, что электромеханический коэффициент связи в ус-

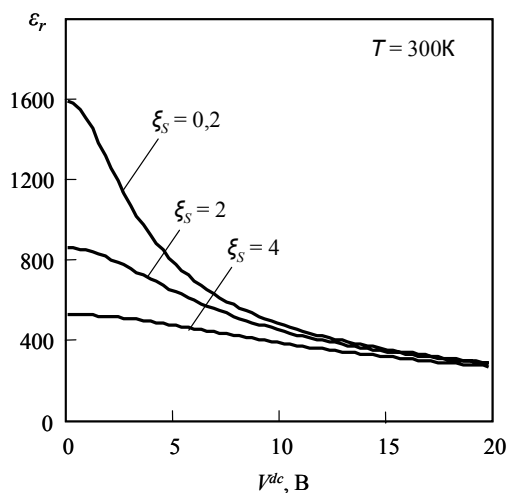


Рис. 7

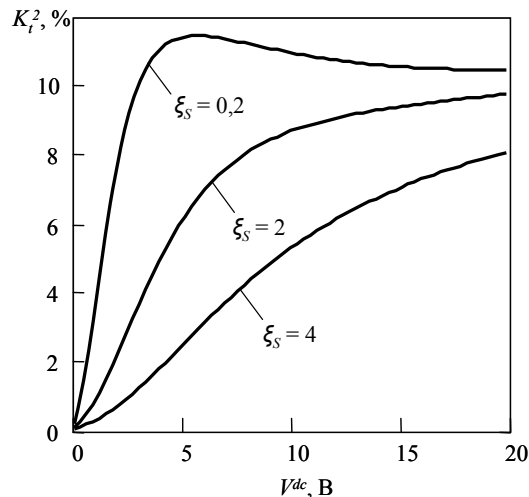


Рис. 8

ловиях приложенного напряжения с увеличением структурного качества материала существенно увеличивает свое значение, при этом наблюдается смещение максимума (рис.8). Для пленок, характеризующихся высоким структурным качеством, т.е. $\xi_S < 2$, коэффициент электромеханической связи имеет выраженный максимум, и его значение может превышать 6% при $V^{dc} = 10$ В ($t = 350$ нм). Продемонстрирован существенный рост относительной перестройки резонансных частот ОАР до 10 % при увеличении диэлектрической проницаемости.

В Главе 3 «Экспериментальное исследование ОАР на основе пленки сегнетоэлектрика в условиях наведенного пьезоэффекта» приводятся результаты экспериментального исследования диэлектрических характеристик пленки BSTO и входного эквивалентного импеданса ОАР на пленках $Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO_3$ и $BaTiO_3$ в сравнении с результатами моделирования. ОАР изготовлен и экспериментально исследован в Чалмерском университете [3].

В первом параграфе обсуждаются диэлектрические характеристики пленки $Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO_3$, полученные методом импульсного лазерного напыления. Микроструктура пленки BSTO и, следовательно, её диэлектрические характеристики существенно зависят от условий осаждения: температуры подложки и давления кислорода в рабочей камере. Рост температуры и уменьшение давления кислорода приводят к увеличению диэлектрической проницаемости, относительной электрической перестройки и, в тоже время, ростом диэлектрических потерь в пленке. Оптимальными условиями для осаждения пленки $Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO_3$ являются: 680°C и 20 Па. Дальнейшее повышение температуры в процессе роста пленки BSTO может привести к деградации тонких электродов и структуры акустического зеркала. Кроме того, для пленки BSTO с более высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_r = 660$), то есть для менее дефектного образца, электромеханическое преобразование энергии является более эффективным.

Сравнивая экспериментальные результаты температурных зависимостей диэлектрических проницаемостей пленок $Ba_{0,25}Sr_{0,75}TiO_3$ и $BaTiO_3$ с диэлектрической проницаемостью керамических образцов [4] (рис. 9 и рис. 10), хорошо видно, что относительная электрическая перестройка пленочных об-

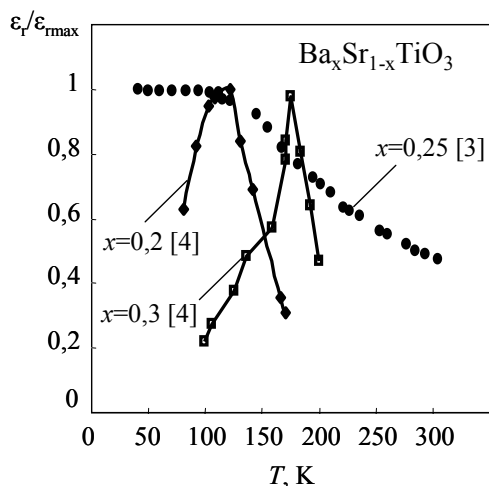


Рис. 9

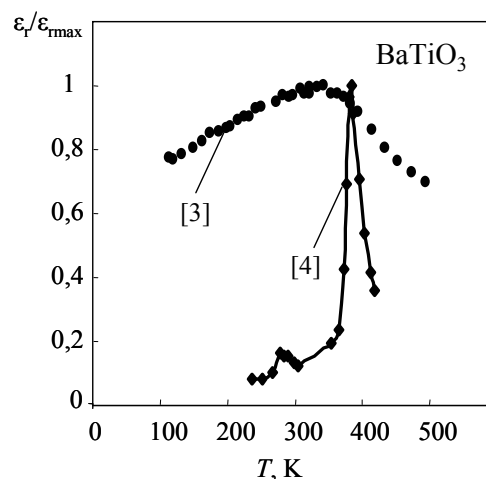


Рис.10

разцов существенно уступает монокристаллическим материалам, что является следствием значительной степени дефектности исследуемых пленок.

Во втором параграфе представлены экспериментальные характеристики ОАР на пленке $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$.

Структура брэгговского зеркала, состоящая из трех пар чередующихся слоев на основе Au и SiO_2 , а также нижний электрод ОАР были осаждены на оксидированной высокоомной кремниевой подложке с использованием постоянного и ВЧ магнетронного распыления. Ионное травления использовалось для формирования структуры брэгговского зеркала и нижнего электрода. Далее на полученную брэгговскую структуру осаждалась пленка

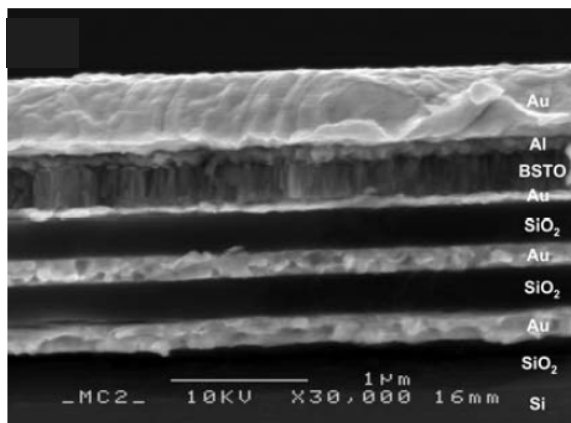


Рис. 11

$\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ методом импульсного лазерного напыления. В процессе осаждения пленки BSTO поддерживались температура поверхности образца 650°C и давление кислорода в рабочей камере 20 Па. Толщина пленки $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ составляет 300 нм. Микрофотографии поперечного сечения всей структуры ОАР на BSTO, содержащей слои акустического зеркала и электродов, представлены на рис. 11.

Результаты экспериментального исследования входного эквивалентного импеданса и проводимости ОАР на пленке $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ в сравнении с результатами моделирования, полученными с использованием электромеханической модели наведенного пьезоэффекта, представлены на рис. 12 и рис. 13. Использовались следующие акустические параметры пленки $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$: $c = 0,25 \cdot 10^{12} \text{ Н/м}^2$, $h = 3,8 \cdot 10^8 \text{ В/м}$, $Q = 0,066 \text{ м}^4/\text{А}^2 \cdot \text{с}^2$ и $M = -1,7 \cdot 10^{12} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{А}^2 \cdot \text{с}^2$. Величина нелинейного коэффициента электрострикции была использована в качестве подгоночного параметра. Использовались табличные значения акустических параметров электродов и слоев брэгговской структуры. Наблюда-

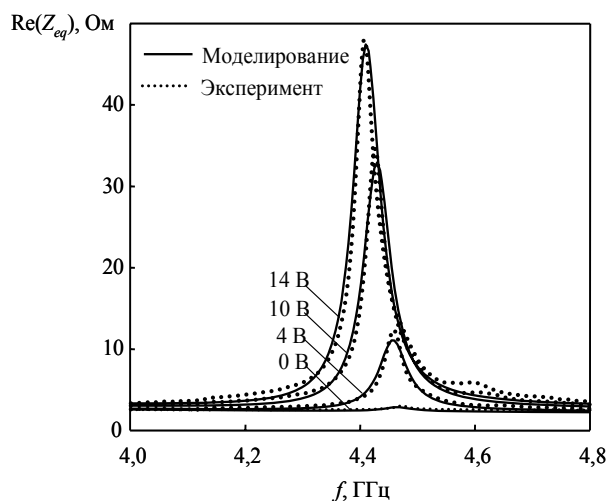


Рис. 12

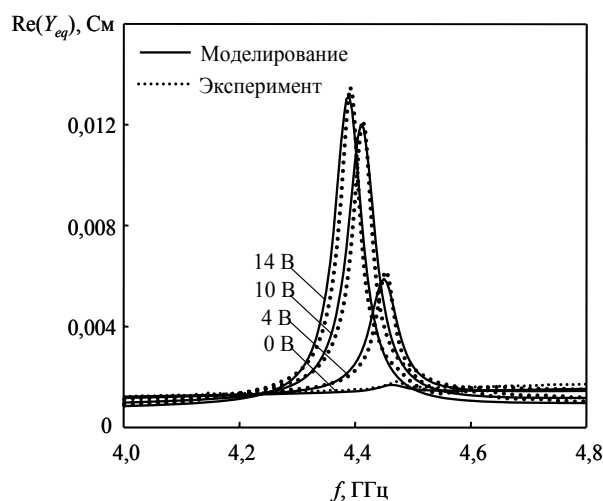


Рис. 13

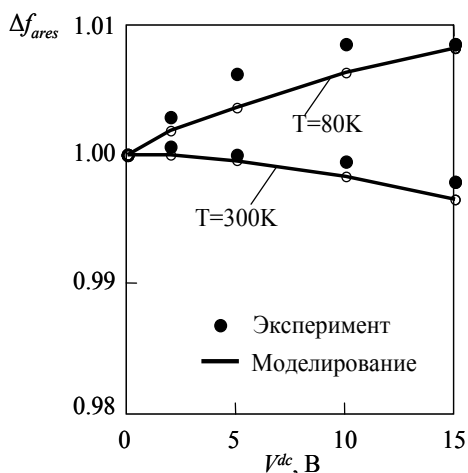


Рис. 14

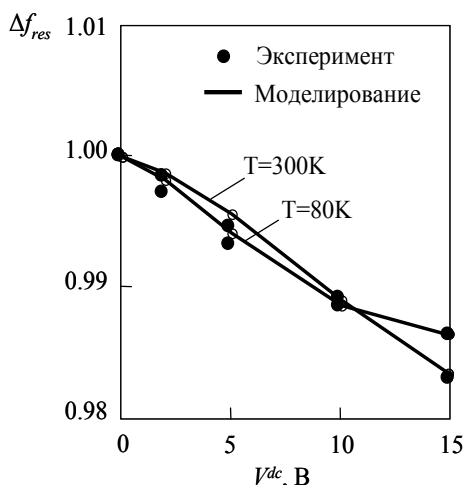


Рис. 15

ется хорошее совпадение результатов моделирования и экспериментальных данных для исследуемой структуры ОАР, что говорит о достоверности предложенной модели наведенного пьезоэффекта. Перестройка резонансных частот ОАР на пленке $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ составила -64 МГц для антирезонанса и -78 МГц для резонанса. Наблюдается отрицательный сдвиг частоты антирезонанса и резонанса, обусловленный вкладом коэффициента нелинейной электрострикции отрицательного знака. Добротность ОАР составила 120. Электромеханический коэффициент связи для исследуемых образцов ОАР не превышает 2% при $V^{dc} = 14$ В.

В третьем параграфе в результате экспериментальных исследований температурных характеристик ОАР было подтверждено, что коэффициент электрострикции, нелинейный по механической деформации M , меняет знак вблизи фазового перехода. При комнатной температуре при изменении постоянного напряжения наблюдается сдвиг частоты антирезонанса в область низких частот, что обусловлено $M < 0$ (рис. 14). При температуре ниже фазового перехода $M > 0$, и в условиях наведенного пьезоэффекта частота антирезонанса увеличивается.

Перестройка частоты резонанса (рис. 15) описывается дополнительным вкладом коэффициента электромеханической связи. Исследование температурных характеристик электромеханического коэффициента связи в условиях наведенного пьезоэффекта показало, что уменьшение температуры образца сопровождается ростом значения коэффициента связи.

Результаты экспериментального исследования входного импеданса и

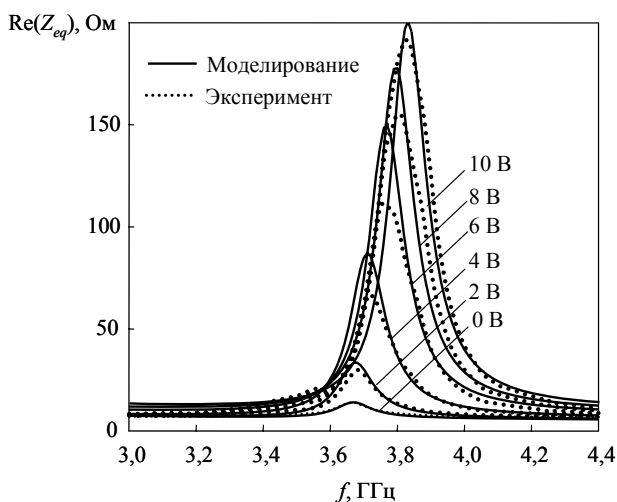


Рис. 16

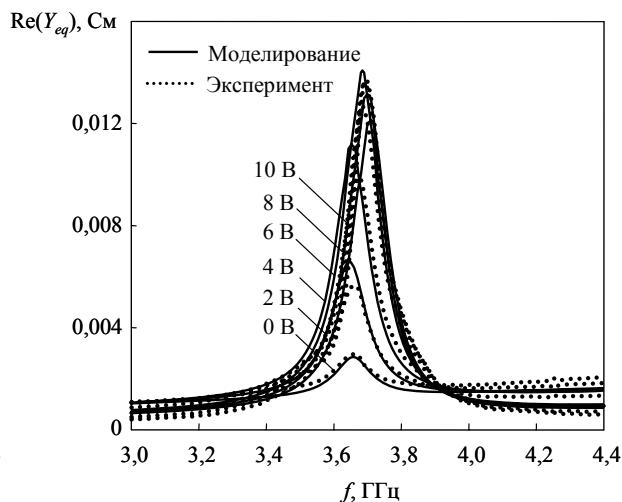


Рис. 17

проводимости ОАР на основе BaTiO_3 в сравнении с результатами моделирования для пленки с акустические параметры $c = 0,13 \cdot 10^{12} \text{ Н/м}^2$, $h = 2,7 \cdot 10^8 \text{ В/м}$, $Q = 0,066 \text{ м}^4/\text{А}^2 \cdot \text{с}^2$ и $M = 4,3 \cdot 10^{12} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{А}^2 \cdot \text{с}^2$ показаны на рис. 16 и рис. 17. Перестройка частот антирезонанса и резонанса ОАР на пленке $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ составила 150 МГц и 47 МГц. Положительная перестройка резонансных частот ОАР обусловлена положительным знаком коэффициента нелинейной электрострикции.

В Глава 4 «Возможности практического применения ОАР на пленке сегнетоэлектрика в составе СВЧ-устройств» было показано, что исследуемые образцы ОАР на BSTO характеризуются низкими значениями коэффициента электромеханической связи, акустической добротностью и перестройкой ОАР, что связано с высокой дефектностью пленок BSTO. Таким образом, применимость перестраиваемых акустических резонаторов на сегнетоэлектрической пленке BSTO ограничена снизу диэлектрической проницаемостью пленки и ее акустической добротностью: $\epsilon_r(0) = 600 \div 800$, $Q_{ac} > 200$. В результате были получены новые параметры модели диэлектрического отклика с учетом величины ϵ_r . В этом случае коэффициент связи в условиях наведенного пьезоэффекта в $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ может превышать 6% при $V^{dc} > 10\text{В}$.

В первом параграфе была предложена методика проектирования перестраиваемого ППФ на BSTO ОАР с учетом модели наведенного пьезоэффекта, на основе которой был разработан перестраиваемый трехзвенный ППФ с рабочей частотой 5,25 ГГц. В результате с учетом вышеуказанных ограничений, т.е. $\epsilon_r(0) = 600$ и $Q_{ac} > 200$ были получены частотные зависимости модуля коэффициента передачи и отражения перестраиваемого ППФ на $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ ОАР (Рис. 18). Перестройка центральной частоты полосы пропускания фильтра составила 5,5 ГГц - 5,0 ГГц (10%) при изменении напряжения смещения в пределах 10В - 35В. В результате была предложена многослойная структура ППФ на ОАР.

Во втором и третьем параграфах был проведен анализ характеристик СВЧ-генераторов с использованием ОАР на пленке нитрида алюминия (AlN) и на основе перестраиваемого $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ ОАР. Разработанный ГУН на

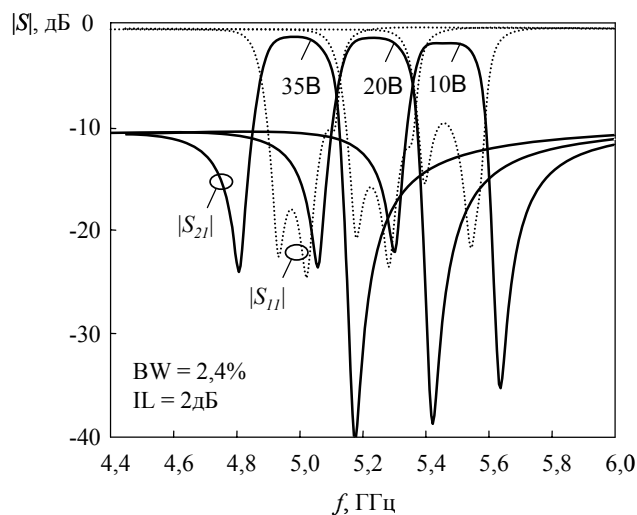


Рис. 18

высокодобротном AlN ОАР, демонстрирует уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов на частоте генерации 1,875 ГГц не хуже, чем -138 дБн/Гц при отстройке 10 кГц. Результаты получены на основе данных экспериментального исследования AlN ОАР. Была разработана топология ГУН. Было показано, что использование полупроводникового варактора позволяет управлять частотой генерации ГУН в пределах 1,2%. Пере-

стройка частоты генерации может быть существенно расширена применением ОАР на основе BSTO в составе генератора. В результате был спроектирован СВЧ-генератор на $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ ОАР, предназначенный для функционирования на частоте 5ГГц. В соответствии с результатами моделирования характеристик ГУН с учетом $\varepsilon_r(0) = 600$ и $Q_{ac} > 200$ перестройка частоты генерации составляет 5,58ГГц - 5,0ГГц (9%) при изменении постоянного напряжения смещения на ОАР в пределах 10В - 35В. Уровень мощности фазовых шумов ГУН не выше, чем -110дБн/Гц при отстройке от несущей 10кГц.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1) Вендик О.Г. Феноменологическое описание зависимости диэлектрической проницаемости титаната стронция от приложенного электрического поля и температуры [текст] / О.Г. Вендик, С.П. Зубко // Журнал Технической Физики. -1997. - Том 67. - Вып. 3. - С.29 - 33.
- 2) Rupprecht G. Electromechanical Behavior of Single-Crystal Strontium Titanate [текст] / G. Rupprecht, W. H. Winner // Physical Review, - 1967. - V.155. № 3. - P.1019-1028
- 3) Berge J. Field and temperature dependent parameters of the dc field induced resonances in $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ films [текст] / J. Berge, M. Norling, A. Vorobiev, S. Gevorgian // Journal of Applied Physics, - 2008. - V.103, №6. - P.0645081-8
- 4) Смоленский Г. А. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики [текст] / Смоленский Г.А., Боков В. А., Исупов В. А., Крайник Н. Н., Пасынков Р. Е., Шурм М. С. // Изд-во Наука, - 1971. - С.476

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

- [1] Туральчук П. А., Моделирование перестраиваемого резонатора на объемных акустических волнах в пленке BSTO в присутствии наведенного пьезоэффекта [текст] / П. А. Туральчук, И. Б. Вендик, О. Г. Вендик // Известия высших учебных заведений, серия "Радиоэлектроника", -2007. №5, -С.60-65
- [2] Vendik I. 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 (Моделирование перестраиваемого резонатора на объемных акустических волнах в пленках $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{TiO}_3$ и BaTiO_3 в условиях наведенного пьезоэффекта) [текст] / I. Vendik, O. Vendik, P. Turalchuk, J. Berge // Journal of Applied Physics, - 2008. V.103, Is.1. - P.014107

Другие статьи и материалы конференций:

- [3] Turalchuk P. Modelling of Tuneable Acoustic Resonators based on BSTO Films with Induced Piezoelectric Effect (Моделирование перестраиваемого объемного акустического резонатора на пленке BSTO в условиях наведенного пьезоэффекта) [текст] / P. Turalchuk, I. Vendik, O. Vendik, and J.

- го пьезоэффекта) [текст] / P. Turalchuk, I. Vendik, O. Vendik, and J. Berge // Proc. of 37th European Microwave Conference, - 2007. - P.282-285
- [4] Turalchuk P.A. Modelling of Tuneable Acoustic Resonators based on Barium Titanate Films with Induced Piezoelectric Effect (Моделирование перестраиваемого объемного акустического резонатора на пленке титаната бария в условиях наведенного пьезоэффекта) [текст] // Proc. of 14th Int. Student Seminar on Microwave Application of Novel Physical Phenomena, -2007, -P.60-62
- [5] Turalchuk P. Modelling of Tunable Bulk Acoustic Resonators and Filters with Induced Piezoelectric Effect in BSTO Film in a Wide Temperature Range (Моделирование перестраиваемого объемного акустического резонатора на пленке BSTO в условиях наведенного пьезоэффекта в широком диапазоне температур) [текст] / P. A. Turalchuk, I. B. Vendik // Proc. of Eurocon, - 2009. - P.64-69
- [6] Turalchuk P. Electrically Tunable Bulk Acoustic Filters with Induced Piezoelectric Effect in BSTO Film (Перестраиваемые фильтры на объемных акустических волнах в пленке BSTO в условиях наведенного пьезоэффекта) [текст] / P. Turalchuk, Irina Vendik, Orest Vendik, John Berge // Proc. of 38th European Microwave Conference, Amsterdam, The Nederland, - 2008, - P.1695-1698
- [7] Turalchuk P.A. Electrically Tunable Bulk Acoustic Filters with Induced Piezoelectric Effect in BSTO Film (Перестраиваемые фильтры на объемных акустических волнах в пленке BSTO в условиях наведенного пьезоэффекта) [текст] // Proc. of 15th Int. Student Seminar on Microwave Application of Novel Physical Phenomena, -2008, -P.60-62
- [8] Туральчук П.А. Перестраиваемые СВЧ-фильтры на объемных акустических волнах в пленке сегнетоэлектрика при использовании наведенного пьезоэлектрического эффекта [текст] / П.А. Туральчук, И.Б.Вендик, О.Г.Вендик // материалы XVIII всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков, - 2008. – С.229-230.
- [9] Туральчук П.А. Перестраиваемый резонатор на объемных акустических волнах в пленке BSTO с наведенным пьезоэффектом [текст] / П.А. Туральчук, И.Б.Вендик, О.Г.Вендик // материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2007. – С.27.
- [10] Туральчук П.А. Перестраиваемые СВЧ фильтры на объемных акустических волнах в пленке BSTO [текст] / П.А. Туральчук, И.Б.Вендик // материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2008. – С.26.
- [11] Туральчук П.А. Моделирование перестраиваемых резонаторов на объемных акустических волнах в пленке BSTO в широком диапазоне температур [текст] / материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2009. – С.14.
- [12] Туральчук П.А. СВЧ-Генератор с низким уровнем фазовых шумов на основе высокочастотного объемного акустического резонатора [текст] / материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2010. – С.22.