

На правах рукописи

Михайлов Анатолий Константинович

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ
ЭФФЕКТЫ В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВАРАКТОРАХ**

Специальность 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы
на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор Козырев А.Б.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Мироненко И.Г.
кандидат технических наук Федотов А.Н.

Ведущая организация — Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе, РАН.

Защита диссертации состоится “24” декабря 2009 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “24” ноября 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Успехи технологии получения тонких пленок сложных оксидов (в частности $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$), проявляющих сильную нелинейность диэлектрической проницаемости (ϵ) при относительно низких потерях в параэлектрическом состоянии, привели к реализации на их основе ряда устройств микроэлектроники сверхвысоких частот (СВЧ), таких как фазовращатели, перестраиваемые фильтры, управляемые линии задержки. Эти устройства содержат сосредоточенные или распределенные элементы, содержащие сегнетоэлектрическую пленку. Однако обширные литературные данные, посвященные как физике сегнетоэлектриков, так и их техническим приложениям на СВЧ, как правило, связаны с нелинейностью по низкочастотному сигналу управления (U_{dc}) при малом уровне СВЧ сигнала ($U_c \ll U_{dc}$). Сведений о нелинейном поведении сегнетоэлектрических пленок на СВЧ крайне мало, хотя нелинейный отклик на этих частотах ограничивает рабочий диапазон мощности линейных устройств и, с другой стороны, служит основой для реализации нелинейных устройств СВЧ, перспективных для современных систем передачи информации, таких как преобразователи частоты и нелинейные линии передачи (НЛП). Использование нелинейных линий передачи, в которых осуществляется сжатие фронта сигнала вплоть до формирования ударной волны является уникальной возможностью расширения частотного спектра формирователя сверхширокополосных (СШП) сигналов и перехода от нано- к пикосекундному временному масштабу, что, в свою очередь, должно привести к принципиально новым возможностям по скорости передачи информации в системах беспроводной связи и по степени разрешения и скрытности в радиолокационных системах.

На сегодняшний день наиболее хорошо разработанными являются полупроводниковые НЛП, содержащие сотни диодов Шоттки на арсениде галлия (GaAs). Однако достигнутые результаты надо рассматривать как предельные для данного класса полупроводниковых устройств в связи с малой рабочей мощностью GaAs диодов. В настоящее время возможности современной технологии получения сегнетоэлектрических пленок открывают перспективу создания на их основе нового класса сегнетоэлектрических НЛП, превосходящих полупроводниковые аналоги.

Плоскопараллельные емкостные структуры, содержащие тонкую пленку $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ в параэлектрическом состоянии, рассматриваются как альтернатива полупроводниковым варакторам при создании электрически управляемых СВЧ устройств. Однако при подаче постоянного управляющего напряжения наблюдаются аномалии на частотных зависимостях как емкости структуры, так и её диэлектрических потерь. Аномальное частотное поведение электрических характеристик связано с резонансным возбуждением СВЧ сигналом акустических колебаний в объеме структуры за счет

наведенного пьезоэффекта. В связи с этим актуальными являются исследования электроакустических эффектов в подобных структурах. С другой стороны, эти эффекты являются полезными для создания новых устройств, в частности, перестраиваемых СВЧ фильтров на объемных акустических волнах. Актуальность создания управляемых электроакустических СВЧ фильтров обусловлена возможностью реализации нового поколения быстродействующих перестраиваемых СВЧ приборов повышенной радиационной стойкости и компактности для мобильной связи, устройств спутниковой навигации (системы «Глонасс», GPS) и космической связи.

Основной целью диссертационной работы является а) исследование нелинейного диэлектрического отклика $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ пленок на воздействии СВЧ электрического поля для увеличения рабочей мощности и функциональных возможностей структур на их основе; б) исследование и разработка нелинейной линии передачи на основе сегнетоэлектрических пленок для устройств формирования СШП сигналов для телекоммуникационных и радарных систем; в) исследование электроакустических эффектов в многослойных сегнетоэлектрических СВЧ варакторах и анализ их использования для реализации нового типа СВЧ фильтров с переключением полосы пропускания. Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие **задачи**:

1. Моделирование и анализ электрического и теплового нелинейного отклика сегнетоэлектрических ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$) варакторов различной конструкции на СВЧ сигнал повышенного уровня мощности.
2. Экспериментальные исследования нелинейных явлений в $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ варакторах при воздействии бигармонических и импульсных СВЧ сигналов повышенного уровня мощности для разделения влияния электрического и теплового нелинейного отклика.
3. Определение предельно допустимых мощностей СВЧ сигнала и граничных частот эффективной применимости $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ варакторов в устройствах СВЧ диапазона.
4. Моделирование процесса преобразования формы сигнала в сегнетоэлектрической линии передачи, представляющей собой как распределенную структуру, так и периодически нагруженную сегнетоэлектрическими варакторами.
5. Разработка конструкции НЛП в соответствии с электрическими параметрами сегнетоэлектрических варакторов.
6. Расчет собственных мод в многослойном акустическом резонаторе с одной и двумя сегнетоэлектрическими пленками и определение эффективности их возбуждения полем СВЧ при разных комбинациях распределения управляющего поля.

Научной новизной обладают следующие результаты:

1. Рассчитаны значения граничной частоты ($f_{гр}$) для типичных планарных и плоскопараллельных $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ конденсаторов. Показано, что для планарных конденсаторов $f_{гр}$ лежит в диапазоне частот 0.1...1 ГГц, а для плоскопараллельных конденсаторов – в диапазоне 1...10 ГГц.
2. Экспериментально показано, что при комнатной температуре уровень сигнала комбинационных частот на выходе устройств на основе планарных $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ конденсаторов обусловлен только электрическим эффектом, однако для устройств на основе плоскопараллельных $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ конденсаторов тепловой эффект может вносить вклад в уровень сигнала комбинационных частот.
3. Определены уровни потерь для квазибездисперсионных НЛП различных конструкций, допускающие формирование ударных электромагнитных волн.
4. Получены спектры собственных частот акустических мод и распределения амплитуды смещений в многослойном резонаторе с одной и двумя пленками сегнетоэлектрика.
5. Получены распределения управляющего поля в сегнетоэлектрических пленках, обеспечивающие условие селективного возбуждения на заданной частоте собственной акустической моды.
6. Рассчитаны характеристики трехпольного переключаемого фильтра на основе акустических резонаторов с несколькими сегнетоэлектрическими пленками.

Научные положения выносимые на защиту:

1. Граничные частоты, на которых вклады электрической и тепловой диэлектрической нелинейности в сегнетоэлектрических пленках $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, ($X=0.3-0.7$) сопоставимы, лежат в области сотен мегагерц для планарных емкостных структур, рассчитанных на высокий уровень рабочей мощности (~10 Вт), и в области десятков гигагерц для плоскопараллельных, предназначенных для низких рабочих мощностей (≤ 10 мВт).
2. Формирование ударной волны в квазибездисперсионной линии передачи на основе сегнетоэлектрика с коэффициентом управляемости по электрическому полю 2...3 достигается при потерях в линии вплоть до 10 дБ.
3. Аномальный рост диэлектрических потерь, наблюдаемый при приложении напряжения управления к плоскопараллельной емкостной структуре с сегнетоэлектрической пленкой, обусловлен возбуждением нечетных акустических мод.

4. В емкостных структурах с двумя сегнетоэлектрическими пленками избирательное возбуждение нечетных или четных акустических мод достигается выбором взаимной ориентации полей управления, что позволяет реализовать переключаемый СВЧ фильтр.

Практическая ценность новых научных результатов заключается в следующем:

1. Проведен теоретический анализ нелинейного отклика емкостных элементов на основе тонких сегнетоэлектрических пленок на гармонический и бигармонический сигналы СВЧ. Анализ основан на феноменологическом описании зависимости дифференциальной емкости сегнетоэлектрических элементов от напряжения выражением, содержащим два параметра, величины которых специфичны для конкретного емкостного элемента и определяются его геометрией, а также микроструктурой и составом пленки сегнетоэлектрика.
2. Получены выражения для изменения средней емкости конденсатора под действием гармонического и бигармонического сигналов СВЧ как за счет электрического эффекта, так и за счет нагрева сегнетоэлектрической пленки. Полученные выражения, а также результаты проведенных экспериментов позволяют оценивать предельные уровни мощности СВЧ сигналов, до которых управляющие устройства СВЧ на основе сегнетоэлектрических пленок успешно функционируют без искажения их характеристик.
3. Получено выражение для граничной частоты, $f_{гр}$, на которой влияние теплового и электрического эффектов на изменение средней емкости конденсатора под действием гармонического СВЧ сигнала одинаково.
4. Разработана методика исследования нелинейного поведения сегнетоэлектрических элементов в повышенном электрическом поле СВЧ, позволяющая разделить эффекты электрической и тепловой нелинейности. Определены предельно допустимые уровни СВЧ мощности, не приводящие к деградации характеристик устройств СВЧ, содержащих сегнетоэлектрические элементы.
5. Предложен метод оценки эффективности НЛП, предназначенной для формирования ударной волны, основанный на феноменологическом описании ВФХ сегнетоэлектрических варакторов. Метод может быть использован разработчиками радиоаппаратуры для экспресс-анализа эффективности нелинейных сегнетоэлектрических линий различных конструкций.
6. Показано, что планарные НЛП с тонкими сегнетоэлектрическими пленками перспективны для обострения фронтов исходно малой длительности (субнаносекундного диапазона) при амплитуде импульса

до сотен вольт, тогда как полосковые НЛП на объемной керамике могут быть использованы для обострения фронтов наносекундной длительности при амплитуде импульса вплоть до десятков киловольт.

7. Предложен новый способ переключения полосы пропускания электроакустического фильтра за счет электрического управления эффективностью возбуждения СВЧ полем собственных акустических мод в конденсаторной структуре, содержащей две сегнетоэлектрические пленки.

По результатам работы получено 3 патента на изобретение РФ, еще одна заявка на патент на изобретение РФ находится в стадии рассмотрения.

Публикации и апробация работы. Основные результаты диссертации изложены в 13 научных работах, среди которых 4 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и молодежных школах:

1. 2004 International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena, Saint-Petersburg, Russia, 7-9 June, 2004.
2. Международная научно-техническая школа-конференция «Молодые ученые – науке, технологиям и профессиональному образованию в электронике», Москва, Россия, 26 – 30 сентября 2005 г.
3. MMA 2006, Oulu, Finland, 12-15 June, 2006.
4. 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина, 11-15 сентября 2006г.
5. European Microwave Week 2006, Manchester, UK, 20-15 September, 2006.
6. Fifth Week of the Metamorphose Distributed European Doctoral School on Metamaterials, Saint-Petersburg, Russia, 4-6 October, 2006.
7. ISIF 2007, Bordeaux, France, 8-12 May, 2007.
8. 18-я Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков, Санкт-Петербург, Россия, 9 – 14 июня 2008 г.
9. ELECTROCERAMICS XI, Manchester, UK, 31 August - 4 September, 2008.
10. European Microwave Week 2008, Amsterdam, Netherlands, 27-31 October, 2008.
11. PIERS 2009, Moscow, Russia, 18-21 August, 2009.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и списка литературы, включающего

90 наименований. Основная часть работы изложена на 135 страницах машинописного текста. Работа содержит 82 рисунка и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава носит обзорный характер.

Приведен обзор сведений из научно-технической литературы по исследованию нелинейного отклика пленочных сегнетоэлектрических конденсаторов и планарных линий передачи на сигналы СВЧ повышенного уровня мощности. Представленные в обзоре данные свидетельствуют, что диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрических пленок в параэлектрической фазе практически безынерционно управляется электрическим полем СВЧ частотой 10^{11} Гц и обусловлена динамикой отклика кристаллической решетки на электрическое поле СВЧ.

Обсуждаются сведения из научно-технической литературы по НЛП различного типа. Основное внимание уделено сегнетоэлектрическим НЛП и их прототипам на полупроводниковых диодах. Результаты обзора свидетельствуют о том, что хорошо разработанные и выпускаемые в настоящее время в продажу НЛП на GaAs варакторах предназначены для использования в устройствах преобразования формы сигналов низкого уровня (до 10 В) и пикосекундной длительности. Коаксиальные НЛП на объемных ферритах позволяют преобразование сигналов большой амплитуды и наносекундной длительности, но они конструктивно сложны (требуют создания постоянного магнитного поля), а большие значения токов рабочего сигнала приводят к большим уровням мощности потерь в проводниках линии. Поэтому в настоящее время активно ведутся поиски новых материалов и обсуждение новых моделей НЛП с целью реализации новых нелинейных элементов, обеспечивающих повышение уровня рабочего сигнала (вплоть до сотен киловольт) и снижение стоимости НЛП.

Рассматриваются разрабатываемые в настоящее время электроакустические СВЧ фильтры на основе пьезоэлектрических материалов. Приводятся результаты исследований наведенного пьезоэффекта в плоскопараллельных емкостных структурах с одной пленкой сегнетоэлектрика. Показано, что данные о профилях распределения стоячих акустических волн в подобных структурах в литературе отсутствуют. Кроме того, в литературе нет данных об экспериментальных и теоретических исследованиях эффекта возбуждения акустических колебаний в емкостных структурах с двумя сегнетоэлектрическими пленками.

На основе анализа литературных данных формулируются цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** приводятся методики исследования, результаты моделирования и экспериментальных исследований нелинейного отклика емкостных элементов на основе тонких сегнетоэлектрических пленок на СВЧ сигнал повышенного уровня мощности.

Нелинейный отклик сегнетоэлектрического конденсатора на сигнал СВЧ проявляется генерацией в нем гармоник основной частоты при гармоническом (однотоновом) сигнале, а также генерацией сигналов комбинационных частот при бигармоническом (двухтоновом) воздействии. При этом изменяются характеристики сегнетоэлектрических устройств: для резонансной цепи нелинейность включенного в нее сегнетоконденсатора проявляется деформацией резонансной кривой; для нерезонансных устройств, например, фазовращателей на основе отрезка сегнетоэлектрической линии передачи, СВЧ нелинейность сегнетоэлектрической пленки приводит к нежелательному сдвигу фазы выходного сигнала.

Основой для анализа нелинейного отклика емкостных сегнетоэлектрических элементов (конденсаторов, отрезков линий передачи) на сигнал СВЧ является зависимость дифференциальной емкости конденсатора, $C(u) = dq/du$, от СВЧ напряжения – вольт-фарадная характеристика (ВФХ).

ВФХ как планарных, так и плоскопараллельных сегнетоконденсаторов может быть адекватно описана выражением [1]:

$$C(U) = \frac{C(0)}{K} \left[1 + \frac{K-1}{1 + \left(\frac{U}{U_0}\right)^2} \right], \quad (1)$$

где U – напряжение, приложенное к конденсатору, $C(0)$ – емкость при нулевом напряжении, $K = C(0)/C(\infty)$ характеризует предельную управляемость емкости, $C(\infty)$ – емкость при весьма большом напряжении ($U \rightarrow \infty$), U_0 – феноменологический параметр, зависящий от микроструктуры и состава пленки сегнетоэлектрика, а также от геометрии конденсатора.

С использованием выражения (1) получено выражение, характеризующее изменение средней емкости сегнетоконденсатора под действием напряжения СВЧ (Е-эффект):

$$\frac{\Delta C_0^E}{C(0)} = \frac{K-1}{2K} \left(\frac{U_c}{U_0} \right)^2. \quad (2)$$

За счет потерь тепловые эффекты могут оказать заметное влияние на отклик конденсатора на сигнал СВЧ. На практике в большинстве случаев преобладающий вклад в потери конденсатора вносят диэлектрические потери в сегнетоэлектрике. Для относительного изменения средней емкости за счет теп-

ловых явлений (Т-эффект), связанных с диссипацией СВЧ мощности в активной области сегнетоэлектрической пленки получено следующее выражение:

$$\frac{\Delta C^T}{C(0)} \cong \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot C(0) \cdot U_c^2 \cdot \text{tg} \delta \cdot \frac{\gamma \cdot \tau_T}{C_V \cdot V} \cdot \frac{H_{eff} + h}{H_{eff}}, \quad (3)$$

где V – объем активной области пленки сегнетоэлектрика, h – толщина пленки сегнетоэлектрика, H_{eff} – эффективная толщина подложки, определяемая геометрией конденсатора, коэффициент γ характеризует наклон температурной зависимости емкости вблизи рабочей температуры, τ_T – время тепловой релаксации, $\text{tg} \delta$ – характеризует СВЧ потери в сегнетоэлектрике, C_V – удельная объемная теплоемкость.

Выражение (3) справедливо для непрерывного сигнала СВЧ и импульсного сигнала, длительность которого τ_p значительно превышает τ_T . В противном случае правая часть выражения (3) должна содержать множитель $(1 - \exp(-\tau_p/\tau_T))$.

Согласно выражениям (2) и (3), вариация емкости за счет нелинейности сегнетоэлектрика в электрическом поле СВЧ, ΔC^E , частотно-независима, тогда как ΔC^T линейно зависит от частоты. В первом приближении

($\left(\frac{U_c}{U_0}\right)^2 \ll 1$) граничная частота, при которой имеет место равенство $\frac{\Delta C_0^E}{C(0)}$ и $\frac{\Delta C^T}{C(0)}$ может быть определена как:

$$f_{гр} \cong \frac{K-1}{K \cdot U_0^2} \cdot \frac{C_V \cdot V}{2p \cdot C(0) \cdot \text{tg} \delta \cdot \gamma \cdot \tau_T \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_p}{\tau_T}\right)\right)} \cdot \frac{H_{eff}}{h + H_{eff}}. \quad (4)$$

При $f < f_{гр}$ влияние электрического поля СВЧ (Е-эффект) на среднее значение емкости преобладает над тепловыми процессами (Т-эффект). Таким образом граничная частота определяет верхний предел рабочего диапазона частот, в котором тепловые эффекты малы и не оказывают влияния на работу линейных управляемых устройств СВЧ на сегнетоэлектрических варакторах. Видно, что величина $f_{гр}$ определяется параметрами сегнетоэлектрической пленки (ϵ , $\text{tg} \delta$, γ) и параметрами ВФХ (K , U_0).

На рисунке 1 показаны расчетные частотные зависимости относительного изменения средней емкости, $\frac{\Delta C_0^E}{C(0) \cdot U_c^2}$ и $\frac{\Delta C^T}{C(0) \cdot U_c^2}$, нормированного на квадрат амплитуды СВЧ напряжения на конденсаторе.

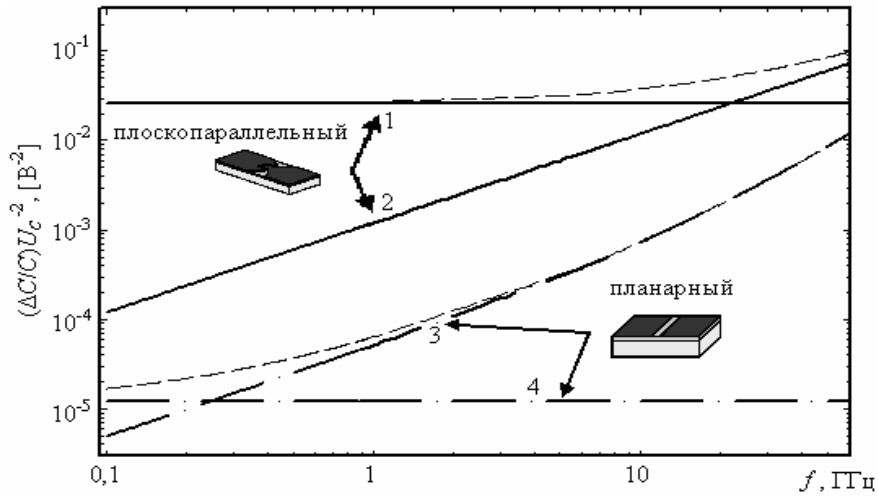


Рис. 1 – Частотные зависимости относительного изменения средней емкости, нормированного на квадрат амплитуды СВЧ напряжения на конденсаторе, вследствие влияния электрического поля (кривые 1 и 4) и температуры (кривые 2 и 3) для плоскопараллельного (кривые 1 и 2) и планарного (кривые 3 и 4) конденсаторов. Пунктиром изображен суммарный эффект.

Экспериментальные исследования проводились с сегнетоэлектрическими конденсаторами планарной и плоскопараллельной конструкции, содержащими пленки $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ различной толщины (от 0.1 мкм до 10 мкм) и состава ($x=0.3-0.7$). Свойства пленок и геометрия конденсаторов обеспечивали изменения параметров ВФХ в диапазонах $K = 2 \dots 3.5$, $U_0 = 3 \text{ В} \dots 160 \text{ В}$. Для исследования планарных конденсаторов использовался резонатор на подвешенной подложке, а для плоскопараллельных конденсаторов – микрополосковый резонатор.

Две методики измерений были использованы для исследования нелинейного отклика сегнетоконденсаторов на сигнал СВЧ: стандартная методика измерений интермодуляционных искажений и исследование ангармонического отклика резонатора на импульсный сигнал СВЧ.

Первая методика предполагает измерение мощности (P_{3out}) сигналов комбинационных частот 3-го порядка ($\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2$) на выходе резонатора с включенным в него сегнетоэлектрическим конденсатором при возбуждении резонатора бигармоническим сигналом СВЧ ($U(t) = U_c(\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t)$, $\omega_1 = \omega_2 - \Omega$). На рисунке 2 приведены экспериментальные результаты измерений P_{3out} в зависимости от уровня падающей мощности на основной частоте P_{1inc} . Сплошными линиями показаны расчетные зависимости выходной мощности на основной частоте и на комбинационной частоте 3-го порядка, обусловленные диэлектрической нелинейностью, P_{3out}^E , и колебанием температуры активной области $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ пленки с частотой биений (Ω), P_{3out}^T . Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что для планарных конденсаторов уровень сигналов комбинационных частот определяется только Е-эффектом, тогда как для плоскопараллельных конденсаторов с ма-

лой ($h < 0.2$ мкм) толщиной пленки сегнетоэлектрика влияние теплового эффекта может вносить существенный вклад в нелинейный отклик конденсатора.

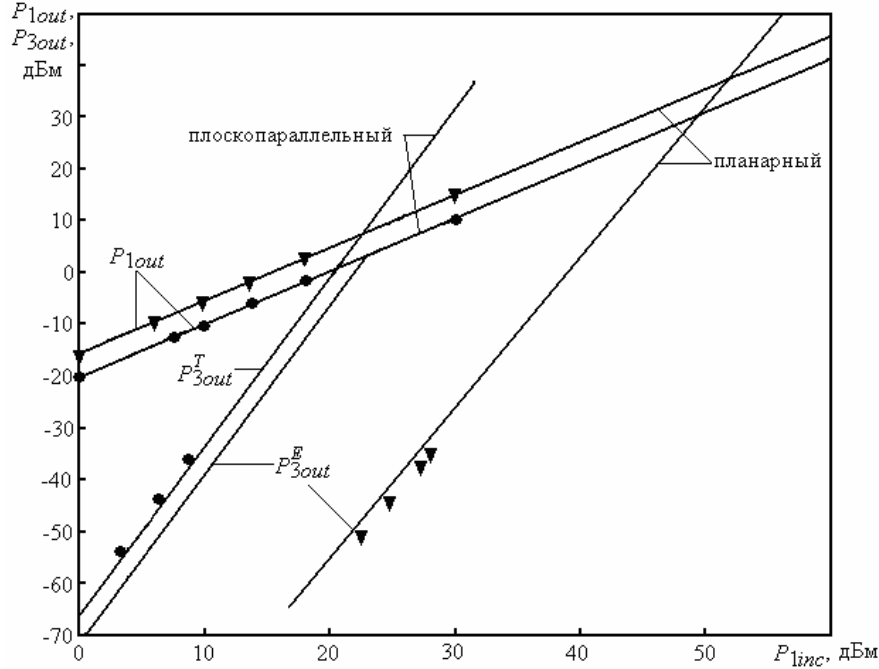


Рис.2 – Зависимость выходной мощности на основной частоте ω_1 (P_{1out}) и комбинационной частоте ω_3 (P_{3out}) от падающей мощности на основной частоте. Символы – результаты экспериментов с $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ планарным (треугольники, $h = 10$ мкм) и плоскопараллельным (точки, $h = 0.14$ мкм) конденсаторами

Исследования ангармонического отклика проводились в импульсном режиме путем измерения резонансных кривых резонатора при различных уровнях импульсной СВЧ мощности. Использование коротких ($\tau_p = 100$ мкс...500 мкс) импульсов СВЧ с длительностью фронта $\tau_f = 0.1$ мкс позволяет разделить электрический и тепловой эффекты за счет регистрации коэффициента передачи резонатора на переднем и заднем фронтах импульса, если $\tau_T > \tau_f$ и $\tau_T < \tau_p$. В проведенных экспериментах для плоскопараллельных конденсаторов с толщиной пленки сегнетоэлектрика $h < 0.2$ мкм ($\tau_T < 100$ нс) неравенство $\tau_T > \tau_f$ оказалось несправедливым и влияние теплового эффекта проявилось даже на переднем фронте импульса (рисунок 3).

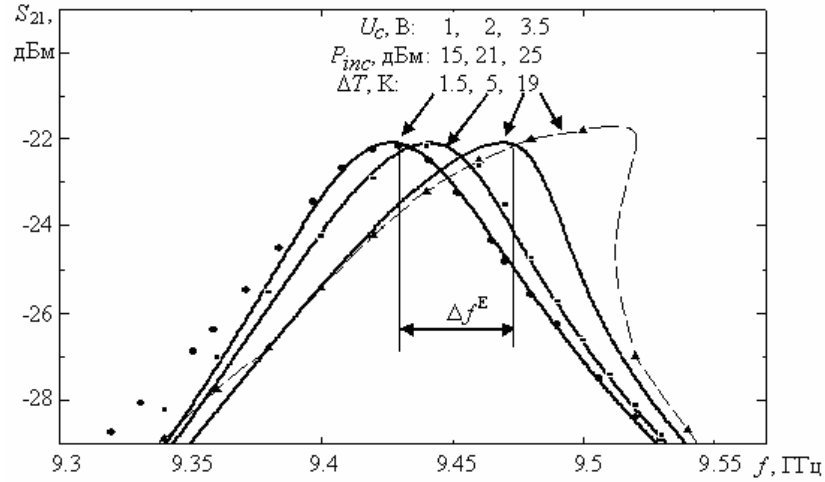


Рис. 3 – Резонансные кривые резонатора, измеренные на переднем фронте импульса (точки) и рассчитанные с учетом только электрической нелинейности (сплошные линии) при различных уровнях падающей мощности. Падающая мощность, P_{inc} , рассчитанное значение амплитуды СВЧ напряжения, U_c , и перегрев конденсатора, ΔT , обозначены над резонансными кривыми. Толщина пленки $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ $h = 0.14$ мкм, $\tau_T \approx 40$ нс

Третья глава посвящена исследованию и разработке нелинейных линий передачи на основе сегнетоэлектриков. Принцип работы НЛП основывается на зависимости от напряжения скорости, $V(U)$, распространения электромагнитной волны в периодически нагруженной сегнетоэлектрическими варакторами или распределенной (полосковая, копланарная) сегнетоэлектрической линии передачи.

Для оценки эффективности (F) НЛП, предназначенной для формирования ударной волны предложено выражение:

$$F = \frac{\frac{\tau_0}{U_{\text{ВХ}}} - \frac{\tau_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}}}{\frac{\tau_0}{U_{\text{ВХ}}}}, \quad (5)$$

где τ_0 – длительность фронта на входе НЛП, $\tau_{\text{ВЫХ}} = \tau_l$ – длительность фронта на выходе НЛП с распределенными параметрами длиной l или $\tau_{\text{ВЫХ}} = \tau_N$ для содержащей N звеньев цепочечной НЛП.

С учетом выражения (1) для ВФХ погонной емкости линии для определения эффективности НЛП получены следующие выражения.

Для НЛП с распределенными параметрами:

$$F = 1 - \exp(\alpha l) \cdot \left\{ 1 - \frac{l}{V(0)\tau_0} + \frac{1}{V(0)\tau_0} \int_0^l \frac{1}{K} \sqrt{1 + \frac{K-1}{1 + \left(\frac{U_{\text{ВХ}}}{U_0}\right)^2 \exp(-2\alpha x)}} dx \right\}, \quad (6a)$$

где α – погонное затухание в распределенной НЛП или затухание на звено в цепочечной схеме НЛП.

Для НЛП на сосредоточенных элементах:

$$F = 1 - \exp(\alpha N) \left\{ 1 - \frac{N}{\pi f_c \tau_0} + \frac{1}{\pi f_c \tau_0} \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{1}{K} \left[1 + \frac{K-1}{1 + \left(\frac{U_{\text{вх}}}{U_0} \right)^2 \exp(-2\alpha n)} \right]} \right\}, \quad (6б)$$

где $f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{LC(0)}}$ – частота отсечки НЛП. Частота отсечки определяет минимально достижимую длительность фронта на выходе НЛП как $\tau_{N \text{ min}} \approx \frac{0.611}{f_c}$ и, следовательно, ограничивает максимально достижимое значение эффективности соотношением:

$$F_{\text{max}} = 1 - \frac{0.611}{f_c \cdot \tau_0} \exp(\alpha N). \quad (7)$$

Как следует из выражений (6а) и (6б), эффективность сегнетоэлектрической НЛП ударной волны определяется параметрами (K , U_0) ВФХ емкостных элементов линии, максимальным напряжением распространяющегося сигнала ($U_{\text{вх}}$) и зависит от потерь в линии.

На рисунке 4а в качестве примера показаны зависимости эффективности от длины распределенной НЛП, рассчитанные из выражения (6а) для разных значений погонного затухания (кривая 1 – без потерь, кривая 2 – $\alpha=0.9$ дБ/мм, кривая 3 – $\alpha=1.1$ дБ/мм). Зависимости получены при длительности фронта $\tau_0=35$ пс, максимальном напряжении на входе НЛП $U_{\text{вх}}=2U_0$, $K=2$. Потери снижают параметр качества при заданной длине НЛП, причем начиная с определенного уровня потерь (свыше 10 дБ в линии) ударная волна не может сформироваться. Точками на рисунке 4а отмечены значения F , полученные в результате численного решения нелинейного дифференциального уравнения для напряжения в НЛП при подаче на вход колоколообразного (гауссовского) импульса. Рисунок 4б иллюстрирует изменение формы импульса на выходе НЛП длиной 3.4 мм (пунктиром изображен импульс на выходе линии при отсутствии нелинейности).

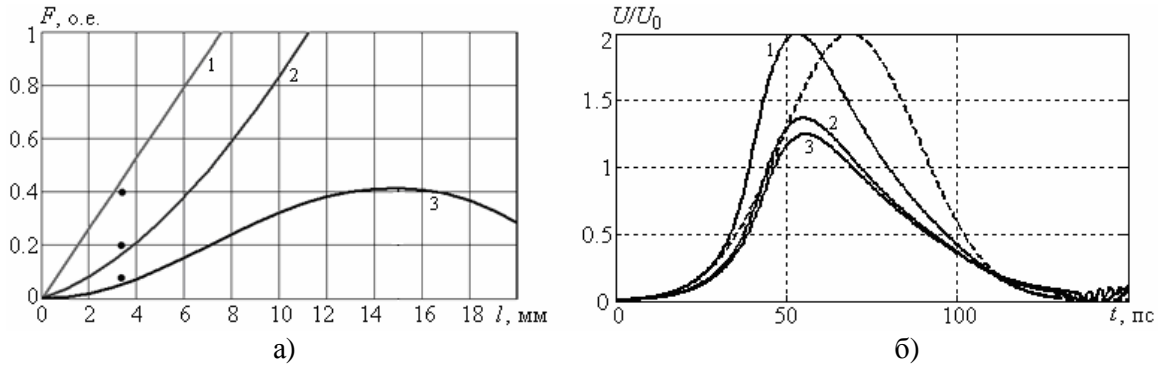


Рис. 4 – а) Зависимости эффективности от длины распределенной НЛП, рассчитанные из выражения (6а) для разных значений погонного затухания (кривая 1 – без потерь, кривая 2 – $\alpha=0.9$ дБ/мм, кривая 3 – $\alpha=1.1$ дБ/мм). б) Изменение формы импульса на выходе НЛП длиной 3.4 мм (пунктиром изображен импульс на выходе линии при отсутствии нелинейности)

На рисунке 5 приведены зависимости параметра качества от числа звеньев цепочечной схемы НЛП с граничной частотой 6 ГГц при затухании на ячейку как параметре (значения указаны рядом с кривыми), рассчитанные из выражений (6б) (слева от максимума) и (7) (справа от максимума) для $U_{вх}=3U_0$, $K=3$, $\tau_0=1$ нс. Точкой отмечено значение F , полученное на экспериментальном макете НЛП, разработанной в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» группой В.Н. Осадчего [2].

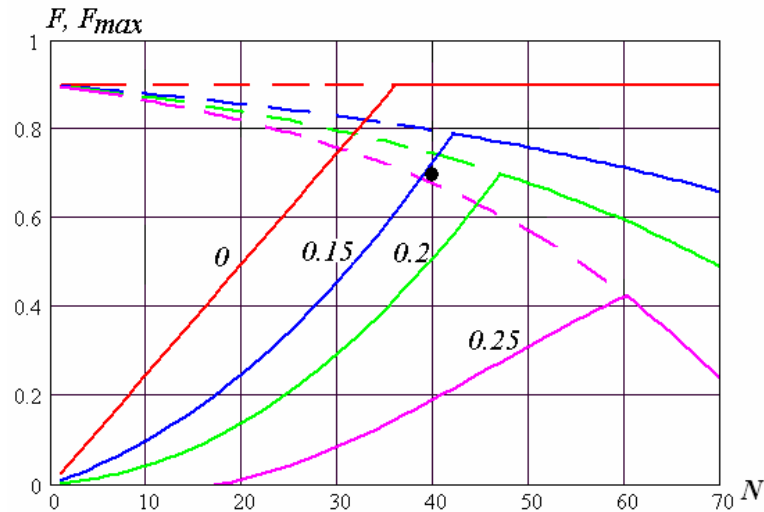


Рис. 5 – Зависимости эффективности от числа звеньев цепочечной схемы НЛП с граничной частотой 6 ГГц при затухании на ячейку как параметре

Представленный анализ удобен для использования разработчиками радиоаппаратуры для экспресс-анализа эффективности нелинейных сегнетоэлектрических линий различных конструкций.

В четвертой главе представлено исследование наведенного пьезоэффекта в плоскопараллельных сегнетоэлектрических варакторах, представляющих собой многослойный акустический резонатор.

Задача о возбуждении СВЧ полем конденсатора собственных мод резонатора решена с использованием следующих модельных представлений. Акустическая волна в сегнетоэлектрической пленке с ненулевым пьезомодулем (e) неразрывно сосуществует с электрическим полем волнового типа. Функциональная зависимость потенциала (j) электрического поля от координаты и времени определяется из совместного решения волнового уравнения для механических смещений (h) и уравнения Пуассона:

$$\begin{cases} c^D \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = r \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(-e_0 e \frac{\partial j}{\partial x} + e \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

где $e_0 e$ – диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической пленки; $c^D = c + e^2/e_0 e$ – модуль упругости. Решение системы уравнений (8) имеет вид:

$$\begin{cases} h(x, t) = A e^{j(\omega t + kx)} + B e^{j(\omega t - kx)} \\ j(x, t) = \frac{e}{e_0 e} h(x, t) - \frac{D(t)}{e_0 e} x + b \end{cases}, \quad (9)$$

где ω , k – частота волны и модуль волнового вектора; $D(t)$ – однородная составляющая индукции электрического поля; b – произвольная постоянная. Структура функции $j(x, t)$ свидетельствует о том, что однородное в сегнетоэлектрической пленке СВЧ поле способно возбудить собственную акустическую моду резонатора.

Пьезоэлектрический модуль сегнетоэлектрика, находящегося в параллельном состоянии, имеет ненулевое значение только при воздействии постоянного электрического поля. Феноменологическая теория сегнетоэлектриков с фазовым переходом второго рода устанавливает следующую взаимосвязь между управляющим полем и искомым пьезоэлектрическим модулем: $e = 2e_0 e G P_{DC}$, где G – коэффициент электрострикции сегнетоэлектрика, P_{DC} – поляризация в сегнетоэлектрической пленке, созданная управляющим полем.

Расчет поля гиперзвуковых смещений в трехслойном резонаторе основан на решении системы уравнений, описывающих непрерывность механических смещений (η_i) и напряжений (s_i) на границе ($x=x_j$) раздела соседних слоев:

$$\begin{cases} h_i(x_j) = h_{i+1}(x_j) \\ s_i(x_j) = s_{i+1}(x_j) \end{cases}, \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (10)$$

В результате численного решения системы уравнений (10) были определены комплексные амплитуды стоячих акустических волн в составных частях многослойного резонатора Pt/Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO₃/Pt/Si.

На рисунке 6 представлены графики пространственного распределения амплитуды стоячей акустической волны, возбуждаемой СВЧ полем на двух резонансных частотах, соответствующих нечетной (кривая 1) и четной (кривая 2) моде. Амплитуды h_{mi} на рисунке 6 нормированы на параметр, имеющий размерность длины: $h_0 = U_c / 2GP_{DC}$. Ненулевые значения $h_m(x)$ в точках минимума, принадлежащих СЭ пленке и нижнему электроду, указывают на дополнительное присутствие в этих слоях бегущей акустической волны, обеспечивающей перенос энергии в сторону подложки.

Анализ полученных данных показывает, что однородное СВЧ поле в СЭ пленке обеспечивает возбуждение только собственных мод нечетного типа. При воздействии СВЧ поля на частоте четной моды (рисунок 6, кривая 2), в структуре возникает стоячая волна с распределением амплитуды,

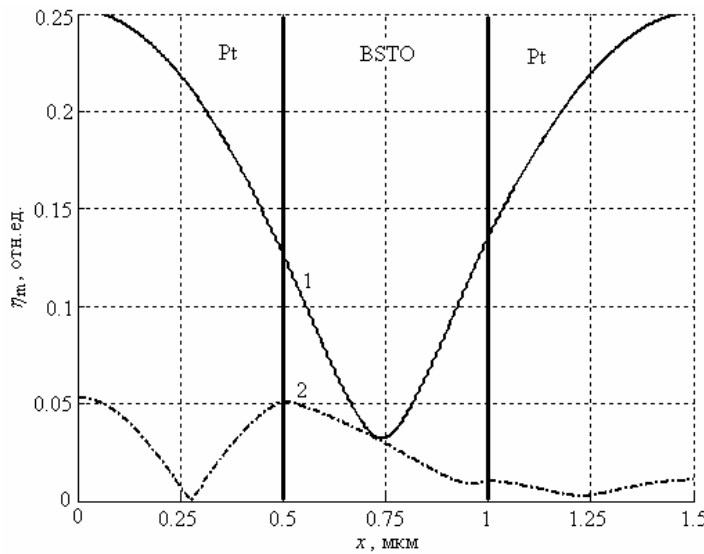


Рис. 6 – Графики пространственного распределения амплитуды стоячей акустической волны, возбуждаемой СВЧ полем на двух резонансных частотах, соответствующих нечетной (кривая 1) и четной (кривая 2) моде

которое не соответствует собственной моде резонатора.

На основе анализа (8) показано, что в структуре с двумя сегнетоэлектрическими слоями, имеющими пьезомодули одного знака (рис. 7а) возбуждаются только нечетные моды. Для нечетных мод смещения внешних границ имеют разный знак, т.е. происходят в разных направлениях, поэтому происходит изменение линейных размеров структуры, что соответствует пьезоэффекту. Для четных мод смещения внешних границ происходят

в одном направлении, т.е. не происходит изменения линейных размеров структуры, и пьезоэффект отсутствует. Таким образом при одинаковом направлении постоянного электрического поля в обоих слоях сегнетоэлектрика возбуждение четных мод не происходит. В структуре с двумя сегнетоэлектрическими слоями, имеющими пьезомодули разных знаков (рис. 7б), уже нечетные моды являются не пьезоэлектрическими, т.к. вследствие разных знаков у пьезомодулей смещения внешних границ происходят в одном направлении. Для четных мод происходит изменение линейных размеров структуры. Т.е. в случае противоположных направлений постоянного элект-

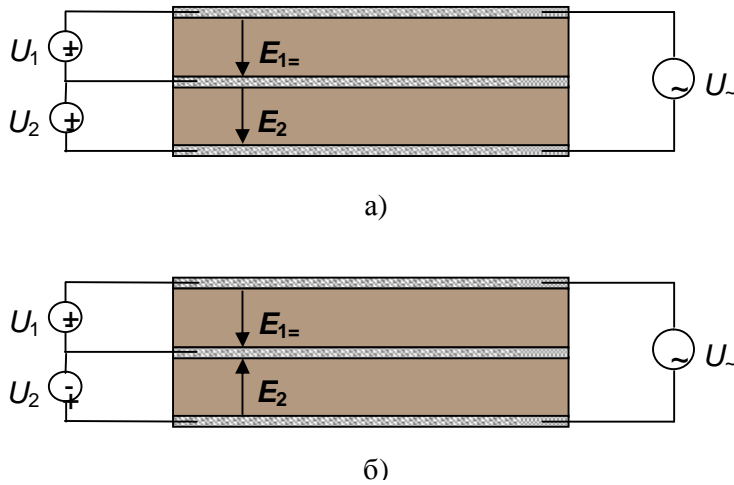


Рис. 7 – Варианты распределения управляющего поля для селективного возбуждения собственной моды заданной частоты

тора), либо разных знаков (возбуждение четных мод резонатора).

Электрический отклик акустического резонатора с сегнетоэлектрической пленкой на СВЧ-сигнал проявляется в виде аномальной зависимости электрического импеданса (Z) от частоты в области собственного акустического резонанса. На рисунке 8 представлены результаты моделирования перестройки полосы пропускания трехпольного полоснопропускающего фильтра на основе сегнетоэлектрических акустических резонаторов.

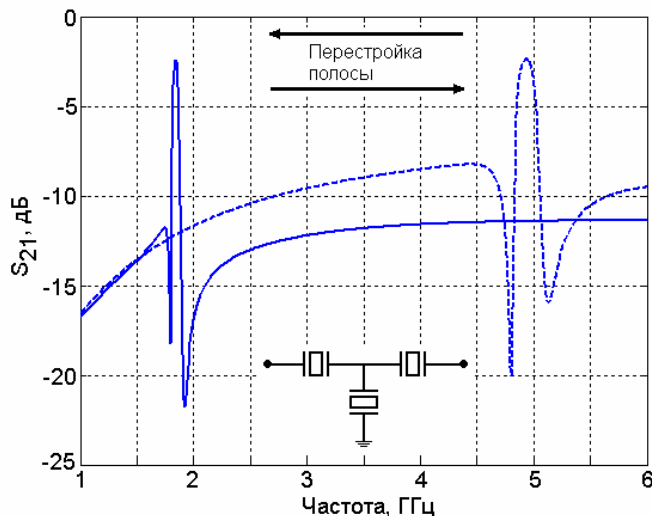


Рис. 8 – Перестройка полосы пропускания трехпольного полоснопропускающего фильтра

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы, полученные автором.

трического поля в слоях сегнетоэлектрика происходит возбуждение только четных мод.

Таким образом способ перестройки частоты сегнетоэлектрического акустического резонатора заключается в создании в сегнетоэлектрических слоях пьезомодулей либо одного знака (возбуждение нечетных мод резонатора),

либо разных знаков (возбуждение четных мод резонатора). На основании вышеизложенного предложен способ перестройки частоты пропускания электроакустического фильтра за счет электрического управления эффективностью возбуждения СВЧ полем собственных акустических мод в конденсаторной структуре, содержащей две сегнетоэлектрические пленки (заявка на патент на изобретение РФ находится в стадии рассмотрения).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен теоретический анализ нелинейного отклика емкостных элементов на основе тонких сегнетоэлектрических пленок на гармонический и бигармонический сигналы СВЧ.
2. Показано, что на СВЧ как диэлектрическая нелинейность сегнетоэлектрической пленки, так и тепловые процессы, обусловленные диссипацией СВЧ мощности, определяют нелинейный отклик емкости сегнетоэлектрического варактора на сигнал СВЧ. Полученные выражения и результаты проведенных экспериментов позволяют оценивать предельные уровни рабочей мощности устройств СВЧ на различных частотах.
3. Получено выражение для граничной частоты, определяющей верхний предел рабочего диапазона частот, в котором тепловые эффекты малы и не оказывают влияния на работу линейных управляемых устройств СВЧ на сегнетоэлектрических варакторах. Рассчитаны значения граничной частоты для типичных планарных и плоскопараллельных $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ конденсаторов. Показано, что для планарных конденсаторов $f_{\text{гр}}$ попадает в диапазон частот 0.1...1 ГГц, а для плоскопараллельных конденсаторов – в диапазон 1...10 ГГц.
4. Экспериментально исследован ангармонический отклик микрополоскового резонатора с включенным в него планарным или плоскопараллельным $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ конденсатором на радиоимпульс (частота несущей 7...10 ГГц). Использование импульсного режима позволило экспериментально разделить эффекты диэлектрической нелинейности и нагрева активной области пленки $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ за счет увеличения на 2 порядка граничной частоты конденсатора на переднем фронте импульса.
5. Экспериментально показано, что при комнатной температуре уровень сигнала комбинационных частот на выходе устройств на основе планарных $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ конденсаторов обусловлен только электрическим эффектом, однако для устройств на основе плоскопараллельных $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ конденсаторов тепловой эффект может вносить вклад в уровень сигнала комбинационных частот.
6. Предложен метод оценки эффективности НЛП, предназначенной для формирования ударной волны, основанный на феноменологическом описании ВФХ сегнетоэлектрических варакторов. Метод может быть использован разработчиками радиоаппаратуры для экспресс-анализа эффективности нелинейных сегнетоэлектрических линий различных конструкций.
7. Показано, что планарные НЛП с тонкими сегнетоэлектрическими пленками перспективны для обострения фронтов исходно малой длительности (субнаносекундного диапазона) при амплитуде импульса

до сотен вольт, тогда как полосковые НЛП на объемной керамике могут быть использованы для обострения фронтов наносекундной длительности при амплитуде импульса вплоть до 10кВ.

8. Получены спектры собственных частот акустических мод и распределение амплитуды смещений в многослойном резонаторе с одной и двумя пленками сегнетоэлектрика. Определена эффективность возбуждения собственных акустических мод СВЧ полем, присутствующим в сегнетоэлектрических пленках.
9. Предложен новый способ переключения полосы пропускания электроакустического фильтра за счет электрического управления эффективностью возбуждения СВЧ полем собственных акустических мод в конденсаторной структуре, содержащей две сегнетоэлектрические пленки.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Н.Н. Антонов, И.М. Бузин, О.Г. Вендик и др. // М.:Сов.радио, 1979. - 272с.
- [2] Samoiloва Т., The generalized analysis of ferroelectric-based nonlinear transmission lines (Анализ нелинейной линии передачи на основе сегнетоэлектрика) / Т. Samoiloва, V. Osadchy, D. Kosmin, A. Mikhailov, D. Ginley, Т. Kaydanova, A. Kardo-Sysoev and A. Kozurev // 2006 European Microwave Conference, Conference Proceedings Book. – 2006. – С. 1590-1593.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Тумаркин А. В., Влияние температуры синтеза на структурные свойства сегнетоэлектрических пленок титаната бария-стронция [текст] / А. В. Тумаркин, А. К. Михайлов // Известия Государственного электротехнического университета, – 2005. – Вып. 2. – С. 34 - 37.
2. Тумаркин А. В., Влияние температуры осаждения на структурные и электрофизические свойства тонких пленок титаната бария-стронция [текст] / А. В. Тумаркин, А. К. Михайлов, А. Г. Алтынников // Письма в Журнал Технической Физики, – 2008. – Том 34. – Вып. 18. – С. 14 - 19.
3. Козырев А. Б., Поле гиперзвуковых смещений в многослойном конденсаторе с сегнетоэлектрической пленкой на частотах дисперсии импеданса [текст] / А. Б. Козырев, А. К. Михайлов, А. М. Прудан, С. В. Пташник // Письма в Журнал Технической Физики, – 2009. – Том 35. – Вып. 19. – С. 75 - 83.
4. Михайлов А. К., Эффективность сегнетоэлектрических нелинейных линий передачи для формирования ударной волны [текст] / А. К. Михайлов, А. Б. Козырев, Т. Б. Самойлова // Письма в Журнал Технической Физики, – 2009. – Том 35. – Вып. 20. – С. 62 - 69.

Другие статьи и материалы конференций:

5. Mikhailov A. K., The influence of synthesis temperature on structure properties of BSTO ferroelectric films (Влияние температуры синтеза на структурные свойства тонких пленок титаната бария-стронция) [текст] / A.K. Mikhailov, A. V. Tumarkin, and S. V. Razumov // 11th International Student Seminar on Microwave and Optical Applications of Novel Physical Phenomena, Seminar Proceedings Book. – 2004. – С. 88-90.

6. Вольпяс В. А., Воздействие ультрафиолетового излучения на электрофизические свойства нелинейных диэлектриков [текст] / В. А. Вольпяс, А. Б. Козырев, А. К. Михайлов // Материалы Международной научно-технической школы-конференции «Молодые ученые – науке, технологиям и профессиональному образованию в электронике», – 2005. – Часть 1. – С. 191 - 194.

7. Михайлов А. К., Анализ нелинейной линии передачи на основе распределенной структуры содержащей сегнетоэлектрик для устройств формирования сверхширокополосных сигналов [текст] / А. К. Михайлов, Т. Б. Самойлова // 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: Материалы конференции, – 2006. – Том 2. – С. 619 - 620.

8. Samoiloва T., The generalized analysis of ferroelectric-based nonlinear transmission lines (Анализ нелинейной линии передачи на основе сегнетоэлектрика) [текст] / T. Samoiloва, V. Osadchy, D. Kosmin, A. Mikhailov, D. Ginley, T. Kaydanova, A. Kardo-Sysoev and A. Kozyrev // 2006 European Microwave Conference, Conference Proceedings Book. – 2006. – С. 1590-1593.

9. Mikhailov A., The nonuniform nonlinear transmission line based on parallel-plate ferroelectric capacitors (Неоднородная нелинейная линия передачи на основе плоскопараллельных сегнетоэлектрических конденсаторов) [текст] / A. Mikhailov, T. Samoiloва and A. Kozyrev // 2008 European Microwave Conference, Conference Proceedings Book. – 2008. – С. 440-442.

10. Технология, свойства и применение сегнетоэлектрических пленок и структур на их основе / Под ред. В. П. Афанасьева, А. Б. Козырева. СПб.: ООО «Техномедиа» / Изд-во «Элмор», 2007. 248 с. / Михайлов А. К.: Глава 5 «Свойства тонкопленочных СВЧ-элементов на основе $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ », глава 6 «Высокочастотные нелинейные эффекты в сегнетоэлектрических пленочных структурах».

11. Патент РФ от 04.04.2008 № 2367964 С1, «Коаксиальный резонатор для измерения добротности конденсатора» / Козырев А.Б., Осадчий В.Н., Косьмин Д.М., Котельников И.В., Михайлов А.К.

12. Патент РФ от 12.05.2008 № 2361360 С1, «Управляемый формирователь импульсов на основе связанных сегнетоэлектрических нелинейных линий передачи» / Козырев А.Б., Осадчий В.Н., Косьмин Д.М., Самойлова Т.Б., Михайлов А.К.

13. Патент РФ от 31.07.2008 № 2371843 С1, «Формирователь импульсов» / Козырев А.Б., Осадчий В.Н., Косьмин Д.М., Самойлова Т.Б., Михайлов А.К.