

*На правах рукописи*



Котельников Игорь Витальевич

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ ТИПА ПЕРОВСКИТ ( $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ ) ДЛЯ СВЧ  
ПРИМЕНЕНИЙ: ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДИКИ  
ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность: 05.27.01 – Твёрдотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы  
на квантовых эффектах.

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре физической электроники и технологии.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор Козырев Андрей Борисович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, Парнес Михаил Давидович, ООО «Резонанс», главный конструктор

кандидат технических наук, Капитанова Полина Вячеславовна, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доцент кафедры нанофотоники и метаматериалов

Ведущая организация – АО Научно-Исследовательский Институт "Гириконд", г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится « 21 » декабря 2017 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. 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](http://www.eltech.ru)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан « 20 » октября 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.238.04  
д.ф.-м.н., профессор



Мошников В.А

## Введение

### Актуальность темы.

Спектр сверхвысокочастотных (СВЧ) элементов и устройств на основе диэлектрических материалов чрезвычайно широк: конденсаторы, резонаторы, фильтры, линии задержки, излучатели антенных решёток и др. Как правило, указанные элементы и устройства на основе линейных диэлектриков демонстрируют низкий уровень диссипативных потерь и являются электрически не перестраиваемыми по своим параметрам. Интенсивное развитие электроники предъявляет новые требования к указанным элементам и устройствам. Одним из основных является необходимость создания быстродействующих устройств, обеспечивающих частотно-фазовую перестройку по СВЧ сигналу за счёт приложения управляющих электрических полей. Использование нелинейных диэлектриков, таких как сегнетоэлектрики (СЭ), позволяет создание указанных устройств за счёт эффекта изменения диэлектрической постоянной материала под воздействием управляющего электрического поля ( $\epsilon(E)$ ). Одним из классов СЭ материалов, заслуживающих особого внимания с точки зрения использования в области СВЧ электроники, являются сегнетоэлектрики типа перовскит, в частности, твёрдые растворы  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BSTO). Перспективность использования указанных СЭ композитов на СВЧ определяется отсутствием частотной дисперсии диэлектрической проницаемости вплоть до частот миллиметрового диапазона ( $\sim 100$  ГГц) и сохранением нелинейных свойств в области частот ТГц диапазона.

СВЧ свойства плёнок, керамик и устройств на основе  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  сильно зависят от технологии их получения. Исследование влияния режимов технологических операций на СВЧ параметры керамики и плёнок связаны с проблемами улучшения быстродействия СЭ устройств, увеличением их предельных значений по рабочей СВЧ мощности и конструктивными особенностями, что является актуальными научно-техническими задачами. Указанные исследования требуют создания специализированных измерительных методик и устройств, позволяющих определять электродинамические параметры

СЭ материалов в различных диапазонах СВЧ.

Таким образом, исследования в области определения СВЧ параметров нелинейных диэлектриков и устройств на их основе, так же как и создание соответствующих методик измерений для проведения исследований, являются актуальными научно-техническими задачами, решение которых способствует развитию как традиционных подходов создания радиолокационных и телекоммуникационных систем, так и таких новых направлений как СВЧ-фотоники и Li-Fi.

**Цель диссертационной работы** - Исследование электродинамических свойств СЭ материалов типа перовскит  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BSTO) и элементов на их основе в СВЧ диапазоне с использованием разработанных методик измерений.

**Основные задачи работы:**

- создание методик электродных и безэлектродных измерений СВЧ параметров плёночных и объёмных (керамических) сегнетоэлектрических материалов;
- разработка модели и алгоритма, позволяющих на основе серии измерений определять вклад металлической и диэлектрической составляющих в общие СВЧ потери СЭ элементов при различных напряжений управления;
- измерение СВЧ параметров сегнетоэлектрических плёнок и керамик различного композиционного состава и элементов на их основе. Получение обобщённой картины поведения диэлектрических параметров ( $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$ ) и управляемости для композитов BSTO и элементов на их основе в широком диапазоне частот (0,1 – 60) ГГц;
- исследование влияния технологических операций на СВЧ свойства нелинейных диэлектриков (диэлектрическая проницаемость, управляемость, СВЧ потери, быстродействие);
- исследование нелинейных явлений в СЭ элементах, возникающих под воздействием сигнала СВЧ высокого уровня мощности.

### **Научная новизна работы :**

- разработаны новые и усовершенствованы существующие методики и устройства СВЧ измерений нелинейных диэлектрических материалов и ёмкостных элементов на их основе для ряда диапазонов частот в интервале (0,1-70) ГГц;
- предложена и экспериментально подтверждена методика разделения СВЧ диэлектрических и металлических потерь в ёмкостных нелинейных элементах на основе анализа зависимостей емкости и диэлектрических потерь от напряжения управления;
- проведены электродинамические расчёты и определены условия при исследовании диэлектрических материалов в резонаторах типа Фабри-Перро, обеспечивающие минимальную погрешность результатов измерений;
- проведены исследования впервые полученных структур BSTO/SiC/Алмаз, которые показали эффективность использования сегнетоэлектрических плёнок на алмазных подложках для увеличения СВЧ рабочей мощности устройств;
- показано влияние технологических операций (кислородный отжиг) на диэлектрические параметры BSTO и явления временной релаксации по  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  при импульсном воздействии  $E$  поля;
- получены обобщённые результаты частотных и полевых зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta(f, E)$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon(f, E)$   $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  в диапазоне частот 100 МГц - 60 ГГц.

### **Практическая значимость работы:**

1. Результаты измерений СВЧ параметров BSTO элементов позволяют разработку различных быстродействующих устройств, обеспечивающих фазово-частотную перестройку по СВЧ сигналу (перестраиваемы фильтры и линии задержки, адаптивные согласующие цепи радиофотонных преобразователей и т. п.)
2. Разработаны методика и устройства, обеспечивающие измерения

зависимостей добротности и ёмкости от напряжения управления для варикондов различных конструкций в диапазоне частот (1 – 6) ГГц. Методика предназначена для проведения СВЧ экспресс измерений сегнетоэлектрических и полупроводниковых варикондов при их серийном выпуске. Методика сертифицирована (Свидетельство МВИ № 18-09 от 12.03.2009) и используется на ряде предприятий в России и за рубежом.

3. Определены режимы, обеспечивающие минимальную величину погрешности безэлектродной методики экспресс измерений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь однослойных и 2х-слойных структур, включая сегнетоэлектрические плёнки, с использованием открытого резонатора в миллиметровом диапазоне длин волн.

4. Экспериментально подтверждены способы подавления нелинейности СЭ элементов по СВЧ сигналу (как тепловые, так и электродинамические) за счет их конструктивных особенностей и выбора материала подложки. Показано, что использование структур вариконда BSTO/SiC(500 нм)/Алмаз, радикально (более чем на порядок) уменьшает перегрев активной зоны сегнетоэлектрической плёнки при высоких уровнях СВЧ мощности

5. Разработаны методика и устройство измерений на основе анализа много-резонансного отклика керамического образца с возможностью подачи на него высоких управляющих напряжений. Методика позволяет проводить измерения ВЧ-СВЧ свойств нелинейной керамики в частотном диапазоне 100 МГц – 2 ГГц с возможностью подачи напряжения до 15 кВ.

6. Приведены результаты измерений многослойных структур с использованием резонатора типа Фабри-Перро и обобщенные результаты измерений диэлектрических параметров СВЧ керамик LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) различных зарубежных производителей в диапазоне частот (1 МГц – ТГц).

7. Показано, что отжиг сегнетокерамики в кислородной среде перед нанесением электродов, приводит к подавлению медленных релаксационных явлений при импульсном Е-полевым воздействии, что позволяет создание быстродействующих

СВЧ устройств.

Основные результаты исследований внедрены в ряд организаций в рамках договоров: СПбГЭТУ - Euclid Tech Labs (США) (Договор № 6850 МЛП-21/МК, 2009-2010); СПбГЭТУ - ООО «Керамика» (Договор № 2/2010 6945/МЛП-22, 2010); СПбГЭТУ - ОАО «НИИ «Гириконд» (Договор № 6740/МЛП-20, 2008); СПбГЭТУ - «Patarek Microwave Inc.» (США) (Договор № MLP19/МК 2006-2008); СПбГЭТУ – Imperial College (Британия) (Договор №6992/МЛП-23/МК, 2010).

### **Научные положения и результаты выносимые на защиту:**

1. Увеличение точности безэлектродных измерений СВЧ параметров диэлектрических керамик, как однослойных, так и двухслойных, с использованием полусферических резонаторов типа Фабри-Перро достигается при электрической толщине измеряемой структуры  $((2n-1)/4)\lambda_p$ , где  $n$  – натуральное число,  $\lambda_p$  – длина волны в материале.

2. Вариконд планарной конструкции со структурой BSTO/SiC/Алмаз позволяет как минимум в (3 – 4) раза увеличить амплитуду его рабочего СВЧ напряжения по сравнению с варикондами на основе традиционно используемых подложек  $Al_2O_3$  и MgO. Последовательно-параллельное включение  $N$  ёмкостных элементов вариконда на алмазных подложках, позволяет в  $((3\div 4) \times N)$  раз увеличить рабочее напряжение СВЧ сигнала вариконда

3. Экстраполяция зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь СЭ варикондов, как функции номинала ёмкости при различных напряжениях управления, позволяют определить вклад металлических и диэлектрических потерь как функцию напряжения.

4. Для структуры на основе симметричного полоскового керамического резонатора (М/СЭ/М/СЭ/М), использование несимметричных относительно центрального электрода СВЧ мод и симметричного поля управления в диэлектрической структуре, позволяет увеличить точность измерений параметров нелинейной керамики  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$ , а многомодовый режим возбуждения, обеспечивает измерения в широком диапазоне частот.

5. Кислородный отжиг BSTO керамических образцов, подавляет явления медленной релаксации под воздействием электрического поля, не ведёт к изменению диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материала и позволяет создание быстродействующих СВЧ устройств.

### **Апробация работы.**

Основные результаты работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях: European Conference on Applications of polar dielectrics (ECAPD), 2002 (Portugal), 2014 (Lithuania) гг.; International Symposium on Integrated Ferroelectric (ISIF) 2002 (Japan), 2003 (USA) гг.; Международная научно-техническая школа-конференция «Молодые Ученые – Науке, Технологиям и Профессиональному Образованию» 2002, Москва; Международная научно-техническая конференция «Электроника и Информатика - 2002», 2002, Москва; Международная Крымская конференция СВЧ –техника и телекоммуникационные технологии 2003, 2006 г. Украина; Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2009, Moscow; International Conference on Microwave Materials and their Applications (MMA), 2010, Poland; International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IEEE ISAF), Darmstadt, 2016. «Микроэлектроника СВЧ» Всероссийская конференция, 2012, 2014, 2015, 2016 Санкт-Петербург.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 24 научные работы, из них: 17 статей в научных журналах и трудах конференций (6 статей, опубликованных в изданиях, включенных в базы данных SCOPUS и Web of Science и перечень ВАК), 1 монография; принято участие в 11 международных, 4 всероссийских конференциях, получен 1 патент РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения, библиографического списка, включающего 86 наименований. Диссертация содержит 143 страницы машинописного текста, включая 97 рисунков и 8 таблиц.



## Основное содержание работы

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

**Глава 1** посвящена обзору литературы по теме работы.

Рассмотрены основные свойства объёмных и плёночных сегнетоэлектрических материалов типа перовскит ( $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  (BSTO)) как наиболее перспективных для применения на СВЧ.

Приведены конструкции элементов и устройств на основе сегнетоэлектриков. Показано, что ограничение в применении СЭ при высоком уровне мощности СВЧ сигнала, определяется двумя механизмами: электрической нелинейностью диэлектрической проницаемости в СВЧ поле и процессом нагрева, вызванным диссипацией мощности СВЧ сигнала в материале. Показано, что существует несколько способов подавления паразитного электрического отклика СЭ варикондов на мощный сигнал СВЧ [1 – 4], но проблема уменьшения нагрева остаётся актуальной. Рассмотрена концепция последовательно-параллельного включения элементов СЭ варикондов в цепи высокой СВЧ мощности с сохранением низких управляющих напряжений. Рассмотрены так же существующие в настоящее время методики измерения СВЧ параметров диэлектриков, определены дополнительные требования к методикам, учитывающие специфику сегнетоэлектрических материалов.

**Глава 2** посвящена описанию модифицированной автором методике безэлектродных измерений комплексной диэлектрической проницаемости плёнок, её апробации и измерению СВЧ свойств однослойных керамик и двухслойных структур ( $(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$  плёнка/подложка) в миллиметровом диапазоне длин волн.

Рассматривается резонатор Фабри-Перро полусферического типа, на плоское зеркало которого помещают исследуемый однослойный или двухслойный (подложка/плёнка) образец (рисунок 1). На основе анализа распределения электромагнитных полей в резонаторе с образцом, определена зависимость

коэффициента включения образца ( $\xi_0$ ) в резонатор (рисунок 2) Приводится соотношение, связывающее параметры диэлектрических слоёв (толщины слоёв, их диэлектрические проницаемости) с параметрами резонансной системы (резонансная частота, геометрические размеры резонатора) [5]. Делается вывод об условиях, обеспечивающих максимальную точность безэлектродных измерений СВЧ параметров диэлектрических образцов (как однослойных так и двухслойных), которая достигается при электрической толщине измеряемой структуры  $\frac{2n-1}{4}\lambda_p$ .

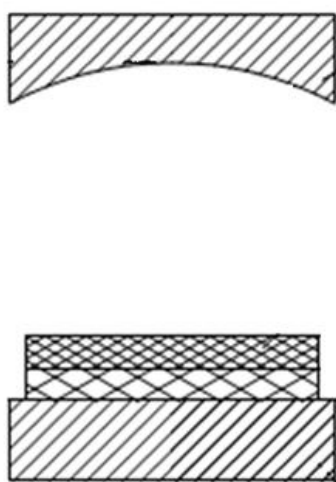


Рисунок 1 - резонатор Фабри – Перро с измеряемой двухслойной структурой

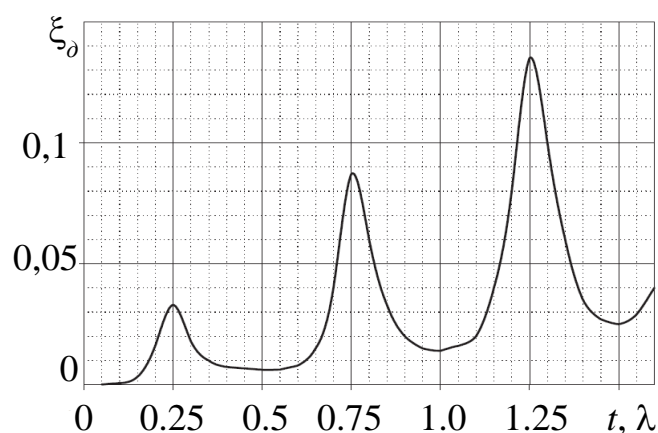


Рисунок 2 - зависимость коэффициента включения образца в резонатор  $\xi_0$  как функция его толщины

Заключительная часть главы посвящена апробации методики и результатам исследований различных материалов. Корректность предложенного метода подтверждена тестированием однослойных и двухслойных образцов с известными параметрами. Приведены результаты измерений однослойных керамик и двухслойных структур ((Ba,Sr)TiO<sub>3</sub> плёнка/подложка) (рисунок 3) и LTCC керамики в миллиметровом диапазоне длин волн. Приведённые графики позволяют создать обобщённую картину поведения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от частоты для различных по составу композитов (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>.

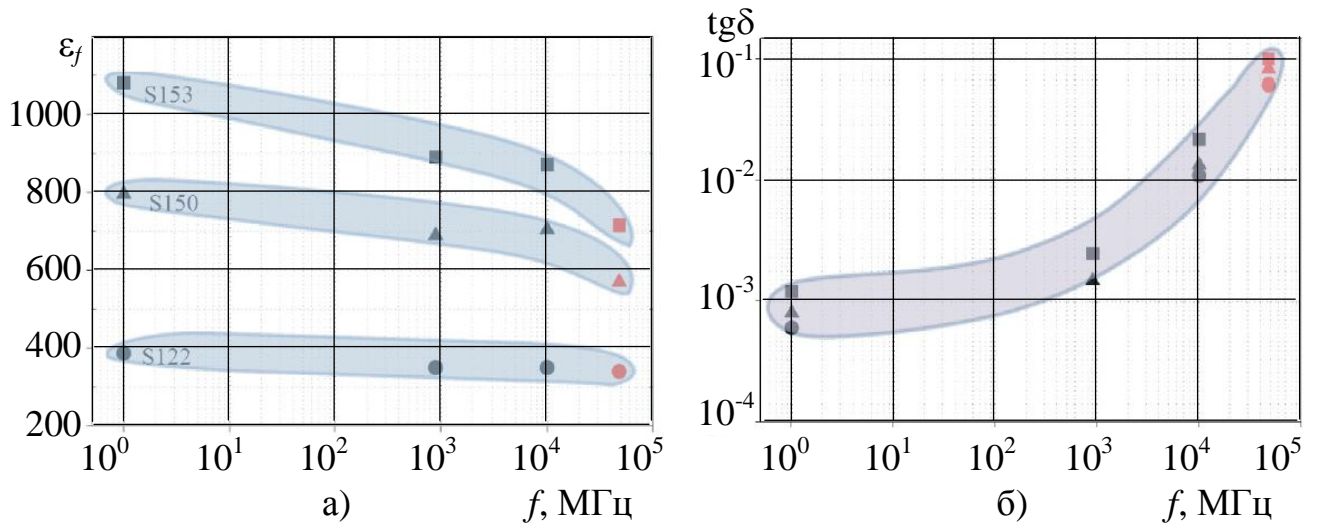


Рисунок 3 - Результаты измерений  $\epsilon$  (а),  $\text{tg}\delta$  (б) СЭ плёнок  $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$  различного состава

**Глава 3** посвящена описанию методики и устройства, обеспечивающих измерение зависимостей добротности ( $Q$ ) и ёмкости ( $C$ ) от напряжения смещения ( $U$ ) для СЭ варикондов и полупроводниковых варакторов различных размеров и конструкций (2х и 3х электродных) в диапазоне частот (1 – 6) ГГц [6].

Показано, что измерительное устройство (рисунок 4) позволяет улучшить точность измерений СВЧ характеристик элементов по сравнению с традиционными нерезонансными методиками с применением стандартного оборудования. Благодаря возможности установки измеряемых элементов вне замкнутого резонансного объёма, измерительное устройство может быть адаптировано для быстрой автоматизированной сертификации элементов при их серийном производстве.

Приведены данные измеренных зависимостей  $Q(U)$  и  $C(U)$  для полупроводниковых варакторов и сегнетоэлектрических варикондов (рисунок 5).



Рисунок 4 - Фото измерительного резонатора на частоту: 3 ГГц

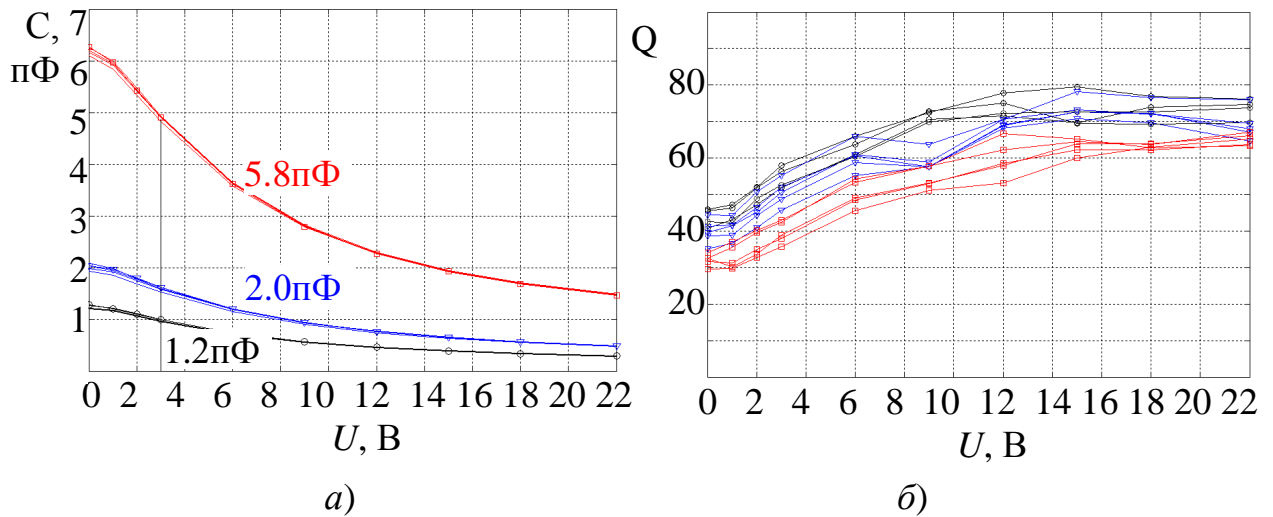


Рисунок 5- Вольт-фарадная зависимость варикондов  $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$  (а); зависимость добротности от напряжения (б), частота измерений 2 ГГц

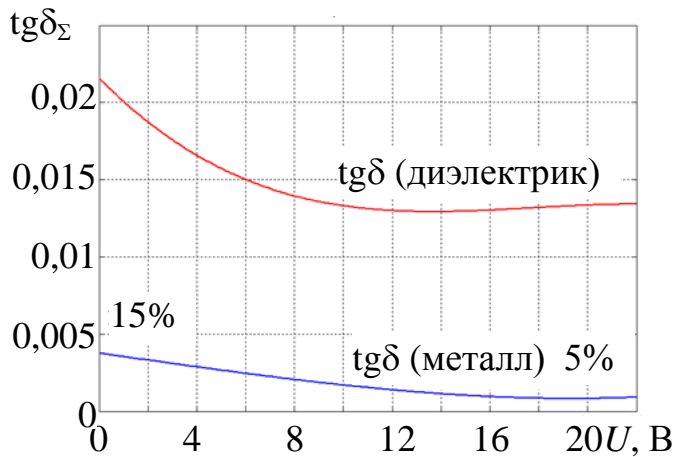


Рисунок 6 - Металлические и диэлектрические потери как функция напряжения для вариконда номиналом 2.0пФ

Дана иллюстрация нелинейных явлений в резонаторе с включёнными полупроводниковыми варакторами и сегнетоэлектрическими варикондами изготовленными на основе как традиционных (поликор,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ) так и алмазных подложек при повышенном уровне СВЧ мощности.

Предложена и экспериментально проверена методика разделения суммарных СВЧ потерь нелинейного конденсатора (вариконда) на диэлектрическую и металлическую составляющие при подаче напряжения управления (рисунок 6).

**Четвертая глава** посвящена описанию методики и устройства, обеспечивающих измерение зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) от напряжённости управляющего электрического поля ( $E$ ) для нелинейной диэлектрической керамики  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  в диапазоне частот  $f = (100 - 2000)$  МГц. Показано, что использование несимметричных СВЧ мод типа  $TE_{10n}$ , возбуждаемых в измеряемой структуре,

при симметричных относительно центрального электрода полях управления позволяют обеспечить эффективную развязку СВЧ цепи и цепи управления без использования дополнительных фильтров. Возбуждение образца в многомодовом режиме позволяет проводить измерения в широком диапазоне частот (рисунок 8).

Приведены данные измеренных зависимостей  $\text{tg}\delta(f, E)$ ,  $\varepsilon(f, E)$  для сегнетоэлектрических (СЭ) керамических образцов BSTO различного состава, при управляющих напряжениях до  $U = 10$  кВ. Исследованы отклик диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь на воздействие импульсного  $E$ -поля. Показана возможность подавления медленных (рисунок 7) и быстрых релаксационных явлений за счёт кислородного отжига керамики.

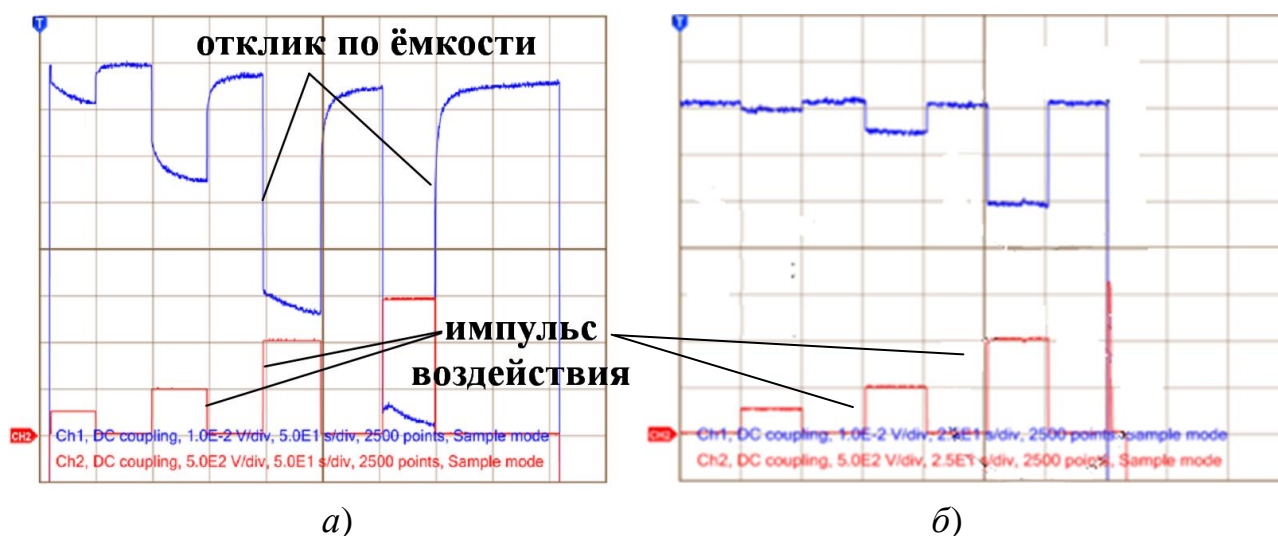


Рисунок 7 – Иллюстрация влияния отжига на подавление медленных релаксационных процессов в BSTO керамике при воздействии униполярных импульсов различной амплитуды. До отжига (а), после отжига (б).

**Приложение.** Приведены выражения для распределения электромагнитного поля внутри открытого резонатора, содержащего двухслойный образец. Показаны результаты измерения основных параметров резонатора.

### **Основные результаты работы:**

- разработан ряд новых и усовершенствованы существующие методики и устройства СВЧ измерений нелинейных диэлектрических материалов и ёмкостных элементов на их основе для ряда диапазонов частот в интервале (0,1-70) ГГц;

- определены условия исследования диэлектрических материалов в резонаторах типа Фабри-Перро, обеспечивающие минимальную погрешность результатов измерений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь однослойных и 2х-слойных структур, включая сегнетоэлектрические плёнки в миллиметровом диапазоне длин волн;
- предложена методика и на её основе определён вклад металлической и диэлектрической составляющих в общие СВЧ потери СЭ элементов при различных напряжениях управления;
- приведены результаты измерений многослойных структур с использованием резонатора типа Фабри-Перро, представлены обобщённые результаты измерений диэлектрических параметров СВЧ керамик LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) различных зарубежных производителей в диапазоне частот (1 МГц – ТГц);
- проведены исследования нелинейных явлений в СЭ элементах, возникающих под воздействием сигнала СВЧ высокого уровня мощности. Показано, что вариконд планарной конструкции со структурой BSTO/SiC/Алмаз позволяет как минимум в (3 – 4) раза увеличить амплитуду его рабочего СВЧ напряжения по сравнению с варикондами на основе традиционно используемых подложек  $Al_2O_3$  и MgO. Последовательно-параллельное включение N ёмкостных элементов вариконда на алмазных подложках, позволяет в ((3-4)хN) раз увеличить рабочее напряжение СВЧ сигнала вариконда;
- показано, что отжиг сегнетокерамики в кислородной среде перед нанесением электродов, приводит к подавлению медленных релаксационных явлений по  $\epsilon$  и  $tg\delta$  при импульсном E-полевом воздействии, что позволяет создание мощных быстродействующих СВЧ устройств.

### **Цитируемая литература:**

- [1] Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Н.Н. Антонов [и др.]; под ред. О.Г. Вендика -М.: Советское радио, 1979. -272с.
- [2] O. G. Vendik Ferroelectrics find their “niche” among microwave control devices / O. G. Vendik // Physics of the Solid State. – 2009. – Т. 51. – №. 7. – С. 1529-1534.
- [3] I.V. Kotelnikov Electrodeless measurement technique of complex dielectric permittivity of high-k dielectric films in the millimeter wavelength range / I.V. Kotelnikov [et al.]. // Progress In Electromagnetics Research M. – 2016. –V. 52. –P.161-167.
- [4] A. Kozyrev Nonlinear response and power handling capability of ferroelectric  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  film capacitors and tunable microwave devices / A. Kozyrev [et al.]. //Journal of Applied Physics. – 2000. – Т. 88. – №. 9. – С. 5334-5342.
- [5] А. Б. Козырев Измерения свойств сегнетоэлектрических плёнок с помощью открытого резонатора в миллиметровом диапазоне длин волн / А. Б. Козырев, В. Н. Кейс, И. В. Котельников // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. – 2003. – №. 8. – С. 28-32.
- [6] И.В. Котельников Методика измерений СВЧ параметров радиофотонных компонентов резонансным методом / И.В. Котельников [и др.]. // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Микроэлектроника СВЧ». – 2016, – с. 299-301.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Статьи, опубликованные в изданиях, включённых в базы данных SCOPUS и Web of Science и перечень ВАК:*

- 1) A. Kozyrev Procedures of measurements of ferroelectric films parameters in frequency range (20-60) GHz / A. Kozyrev [et al.]. // Integrated Ferroelectrics. – 2003. –V.55. –P. 895-903
- 2) A.B. Kozyrev A method and device for measuring the capacitance and Q-factor of microwave varactors and variconds / A.B. Kozyrev [et al.]. // Measurement Techniques. –2012. –V.55. –№7. –P. 834-838
- 3) I.V. Kotel’nikov Method and Apparatus for Measuring the Microwave Parameters of Nonlinear Ceramics in Control Electric Fields / I.V. Kotel’nikov [et al.]. // Measurement Techniques. – 2014. – Т. 57. – №. 9. – P. 1077-1081
- 4) Andrey Tumarkin Ferroelectric Varactor on Diamond for Elevated Power Microwave Applications / Andrey Tumarkin [et al.]. // IEEE Electron Device Letters. –2016. –V. 37. –№ 6. P. 762-765
- 5) I.V. Kotelnikov Electrodeless measurement technique of complex dielectric permittivity of high-k dielectric films in the millimeter wave length range / I.V.

Kotelnikov [et al.]. // Progress In Electromagnetics Research M. –2016. –V. 52. –P. 161-167

- 6) A.V. Tumarkin Thin film ferroelectric structures on diamond for high power microwave applications / A.V. Tumarkin [et al.]. // Diamond and Related Materials. –2017. –V.75 –P.176-180

***В трудах международных и всероссийских конференций:***

- 1) A. Kozyrev Measurements of ferroelectric film parameters in frequency range (20-70) GHz / A. Kozyrev [et al.]. // Proceedings of 6th European Conference on Applications of polar dielectrics (ЕСAPD-6). –2002
- 2) И.В. Котельников Измерения параметров сегнетоэлектрических пленок в диапазоне (20-70)ГГц. / И.В. Котельников, А.Г. Гагарин, П.В. Кулик. // Материалы Международной научно-технической школы-конференции «Молодые Ученые – Науке, Технологиям и Профессиональному Образованию». Москва, –2002. –С. 231-233
- 3) А.Б. Козырев Электродные и безэлектродные измерения СВЧ параметров сегнетоэлектрических плёнок / А.Б. Козырев [и др.]. // Электроника и Информатика – 2002. IV Международная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. Часть 2. М.: –2002. –С.194-195
- 4) И.В. Котельников Измерения свойств сегнетоэлектрических пленок методом открытого резонатора / И.В. Котельников [и др.]. // Материалы 13-й Международной Крымской конференции «СВЧ -техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: –2003.–С. 683 – 684
- 5) И. В. Котельников Измерение СВЧ свойств диэлектрических плёнок методом волноводно-диэлектрического резонанса / И. В. Котельников [и др.]. // Материалы 16-й Международной Крымской конференции «СВЧ -техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: –2006. –С. 784 – 785
- 6) И.В. Котельников Методика и устройство измерения емкости и добротности СВЧ варакторов / И.В. Котельников [и др.]. // Сборник трудов Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ» Том 2. СПб.: –2012. –С. 394-397



- 7) И.В. Котельников Методика и устройство измерения ВЧ-СВЧ параметров нелинейной керамики в широком частотном диапазоне под воздействием полей управления / И.В. Котельников [и др.]. // Сборник трудов Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ». СПб.: –2014. –С 509-512
- 8) И.В. Котельников Методика разделения металлических и диэлектрических СВЧ потерь варикондов / И.В. Котельников [и др.]. // Сборник трудов Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ». Том 2. СПб.: –2015. – С 286-288
- 9) A.V. Tumarkin Microwave tunable ferroelectric capacitors with enhanced power handling capability based on the silicon carbide substrate / A.V. Tumarkin [et al.]. // IEEE ISAF Darmstadt 2016 proceedings. [Электронный документ] URL: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7578083/> (дата обращения 01.10.2017)
- 10) И.В. Котельников Методика измерений СВЧ параметров радиофотонных компонентов резонансным методом / И.В. Котельников [и др.]. // Сборник трудов Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ». СПб.: –2016. –С 299-301

***Статьи, опубликованные в других изданиях и материалах конференций:***

- 1) А.Б. Козырев Измерения свойств сегнетоэлектрических пленок с помощью открытого резонатора в миллиметровом диапазоне длин волн / А.Б. Козырев В.Н. Кейс, И.В. Котельников // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» –2003. –Вып. 1. – С. 28-32
- 2) А.Г. Алтынников Технология, свойства и применение сегнетоэлектрических пленок и структур на их основе / А.Г. Алтынников [и др.]; под ред. В.П. Афанасьева, А.Б. Козырева, [монография]. –СПб.: ООО «Техномедиа» / Изд-во Элмор, 2007. –248с.