

На правах рукописи

Алтынников Андрей Геннадиевич

МЕДЛЕННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЕМКОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ СВЧ-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ В ПАРАЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФАЗЕ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (ЛЭТИ).

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

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор Соколов А.И.
кандидат технических наук Федотов А.Н.

Ведущая организация: – ОАО «НИИ «Гириконд»».

Защита диссертации состоится “28” декабря 2010 г. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.04. Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “26” ноября 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций

Мошников В.А.

Введение

Актуальность темы.

Развитие СВЧ микроэлектроники делает актуальным использование пленочных сегнетоэлектриков (СЭ) в параэлектрическом состоянии для создания устройств управления амплитудой и фазой СВЧ сигнала. По ряду параметров такие устройства являются конкурентными традиционным устройствам на основе полупроводниковых и ферритовых материалов. Использование сегнетоэлектриков в СВЧ устройствах (фазовращатели, фильтры, линии задержки, фазированные антенные решетки) ведет к снижению мощности управления, увеличению рабочей СВЧ мощности, улучшению радиационной стойкости, упрощению технологии и радикальному снижению цены устройств. Однако широкому использованию и реализации всех возможностей сегнетоэлектрических структур в СВЧ технике препятствует ряд проблем.

Для эффективной работы устройств управления амплитудой и фазой СВЧ сигнала необходим быстрый отклик диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки на воздействие электрического поля. Однако наряду с процессами быстрого (< 1 нс) нелинейного отклика ёмкости структур металл/СЭ/металл (М/СЭ/М), существуют медленные релаксационные процессы, постоянные времени которых составляют десятки и даже сотни секунд. Процессы медленной релаксации ёмкости связаны с изменением $\sim(5\div 10)\%$ от общего её изменения под действием управляющего напряжения. Однако, для создания СВЧ-устройств с высоким разрешением по перестройке частоты (фильтры) или фазы (фазовращатели, линии задержки) наличие таких явлений недопустимо. До настоящего времени не существует ясного анализа причин и динамики наблюдаемых процессов, отсутствуют данные о способах подавления медленных релаксационных явлений. Проведение исследований по данному направлению позволит получить новые научные данные в области динамики неравновесных процессов в

тонкопленочных сегнетоэлектрических структурах, и, с точки зрения технических приложений, повысить быстродействие сегнетоэлектрических СВЧ устройств.

Еще одним фактором, сдерживающим использование тонкопленочных сегнетоэлектрических материалов, является сильная зависимость их диэлектрической проницаемости от температуры. В настоящее время существует ряд схемотехнических методов улучшения термостабилизации параметров сегнетоэлектрических элементов, однако все они связаны с уменьшением их управляемости или усложнением конструкции. Одним из перспективных методов подавления температурной зависимости диэлектрической проницаемости СЭ является использование многослойных структур с изменением состава СЭ по слоям. Исследованиям в этой области посвящено значительное число публикаций, однако отсутствует аналитический подход, позволяющий определить компонентный состав слоев необходимый для термостабилизации в заданном температурном диапазоне, отсутствуют также данные о свойствах подобных многослойных структур в СВЧ диапазоне. Таким образом, проведение исследований в данной области является актуальным как с точки зрения изучения физических свойств многослойных СЭ структур, так и технических приложений их технологии и конструирования.

Цель диссертационной работы - подавление медленной релаксации и температурной зависимости ёмкости в пленочных структурах на основе $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ для увеличения быстродействия и термостабильности СВЧ сегнетоэлектрических элементов.

Основные задачи исследования:

- определение влияния технологии получения пленочных сегнетоэлектрических элементов ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$) на процессы медленной релаксации их емкости;
- анализ электрофизических свойств тонких пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ в широком диапазоне температур для идентификации структурных дефектов сегнетоэлектрических пленок;

- построение физической и математической моделей для описания природы и динамики медленных релаксационных процессов в тонкопленочных структурах М/СЭ/М;
- определение эффективности воздействия излучения УФ диапазона на электрофизические свойства тонких сегнетоэлектрических пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$;
- определение степени подавления процесса медленной релаксации емкости тонкопленочных сегнетоэлектрических элементов технологическими методами и за счет воздействия излучения УФ диапазона;
- повышение термостабильности сегнетоэлектрических структур для СВЧ применений за счет использования многослойных сегнетоэлектрических пленок с различным составом слоев.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что в объеме пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ в структуре М/СЭ/М присутствуют две группы ловушечных уровней с глубинами залегания ~ 0.7 эВ и ~ 0.4 эВ;
2. Установлено, что медленные релаксационные явления ($10 \div 100$ с), наблюдаемые в сегнетоэлектрических элементах в параэлектрической фазе, обусловлены наличием кислородных вакансий в объеме пленки, которые следует рассматривать и как центры захвата носителей заряда, и как заряженные дефекты способные мигрировать под действием поля;
3. Обнаружено, что формирование границ Pt(Au)/ $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ в кислородной атмосфере позволяет подавить процессы медленной релаксации диэлектрической проницаемости;
4. Показано, что нанесение металлических электродов при пониженной температуре и высокотемпературный отжиг в кислородосодержащей атмосфере емкостных структур М/СЭ/М на основе сегнетоэлектрических пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ведет к существенному уменьшению величин остаточной емкости;

5. Показано, что генерация неравновесных носителей в объёме BSTO плёнки за счет воздействия УФ облучения ведёт к уменьшению времен медленной релаксации емкости более чем на три порядка;

6. Показано, что эффективная термостабилизация параметров сегнетоэлектрических емкостных структур плоскопараллельной конструкции может быть достигнута за счет использования двухслойной сегнетоэлектрической пленки при определенных значениях толщин слоёв и постоянных Кюри-Вейса материала слоёв.

Практическая значимость работы:

1. Предложено использование УФ излучения как способа снижения времени релаксации емкости СЭ элементов;

2. Разработаны рекомендации по технологии получения тонкопленочных емкостных элементов типа М/СЭ/М с подавленным медленным релаксационным откликом на воздействие управляющего напряжения;

3. Предложен способ увеличения термостабильности свойств сегнетоэлектрических конденсаторов за счет использования двухслойных сегнетоэлектрических пленок с определенным соотношением толщин слоев и температур фазового перехода.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Возникновение и релаксация остаточной емкости после воздействия управляющего напряжения в тонкопленочных конденсаторах на основе $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ обусловлены наличием двух групп заряженных дефектов в объеме сегнетоэлектрической пленки с глубинами залегания ~ 0.7 эВ (кислородные вакансии) и ~ 0.4 эВ.

2) Воздействие излучения ультрафиолетового диапазона ведет к радикальному уменьшению времен (на несколько порядков) медленной релаксации остаточной емкости в конденсаторных структурах на основе тонких пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$.

3) Экстремумы на спектральных зависимостях времени релаксации остаточной емкости и величин токов утечки в структурах М/СЭ/М жестко коррелированы и их положение определяется неоднородностью процессов фотогенерации и рекомбинации по толщине пленки.

4) СВЧ нелинейный конденсатор плоскопараллельной конструкции на основе структуры содержащей два сегнетоэлектрических слоя различного состава (различные температуры Кюри T_{c1} и T_{c2}) демонстрирует эффективное подавление температурной зависимости емкости в интервале температур ($T_{c1} \div T_{c2}$) при определенной комбинации значений толщин и постоянных Кюри-Вейса материала, удовлетворяющих соотношению:

$$d_1 = 2 \cdot \frac{C_{01}}{C_{02}} \cdot d_2$$

Реализация результатов работы:

- в проекте Министерства Образования и Науки Российской Федерации «Исследование нелинейных диэлектрических свойств и динамики неравновесных процессов в наноструктурированных сегнетоэлектриках кислородно-октаэдрического типа» (код проекта: РНП 2.1.2.2838);
- в государственном контракте № П1233 «Технология субмикронных кристаллических сегнетоэлектрических плёнок для сверхвысокочастотных устройств систем телекоммуникаций и радиолокации»;
- в государственном контракте № П689 «Микроэлектронные интегральные устройства на основе сегнетоэлектрических пленок для сверхширокополосных коммуникационных систем»;
- в государственном контракте № 02.740.11.0231 «Исследование линейных и нелинейных сверхвысокочастотных волновых и резонансных явлений (СВЧ) в микро- и наноструктурах, направленное на разработку принципиально новых управляемых пассивных и активных СВЧ элементов и устройств на их основе»;

- в государственном контракте № 02.740.11.0465 «Новые СВЧ приборы на основе явлений нелинейной электродинамики сегнетоэлектрических и ферромагнитных пленочных структур».

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». 10-14 сентября 2001, Севастополь, Украина.
- 19th International Symposium on Integrated Ferroelectrics. May 8–11, 2007. Bordeaux, France.
- XI Electroceramics. September 1-4, 2008. Manchester, UK.
- XVIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков. 9-14 июня, 2008. Санкт-Петербург, Россия.
- 21th International Symposium on Integrated Ferroelectrics. September 27-October 1, 2009, Colorado Springs, USA.
- 6th Microwave Materials and Their Applications Conference. 1-3 September, 2010 Warsaw, Poland.
- 40th European Microwave Conference. September 26-October 1 2010, Paris, France.
- Научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского Государственного Электротехнического Университета (ЛЭТИ). 2006-2010 гг. Санкт-Петербург, Россия.
- научно-технические семинары «Современные проблемы техники и электроники СВЧ» 2009, 2010гг. Санкт-Петербург, Россия.

Публикации.

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 20 статьях и докладах, из них по теме диссертации 20, среди которых 6

публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 9 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем работ.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 109 наименований, и одного приложения. Основная часть работы изложена на 103 страницах машинописного текста. Работа содержит 64 рисунка и 4 таблицы.

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.

Описаны основные свойства сегнетоэлектрических материалов и представлены результаты исследований свойств тонких сегнетоэлектрических пленок, имеющиеся в литературных источниках. Отмечается необходимость учета ряда особенностей диэлектрических свойств сегнетоэлектрических пленок в структурах М/СЭ/М (напряженность кристаллической решетки, наличие «мертвых» слоев, проявление размерного эффекта), которые необходимо учитывать при создании физических и математических моделей для описания свойств многослойных структур.

Рассмотрены электрически перестраиваемые СВЧ устройства (перестраиваемые резонаторы, фильтры, фазовращатели, ФАР) разработанные на основе сегнетоэлектрических пленок. Выделены основные преимущества и недостатки сегнетоэлектрических устройств по сравнению с полупроводниковыми и ферритовыми аналогами.

Приведено сравнение наиболее распространенных технологических методов получения тонких сегнетоэлектрических пленок. Обоснован выбор ионно-плазменного высокочастотного магнетронного распыления, как способа получения СВЧ сегнетоэлектрических структур, исследованию которых посвящена данная работа. Приведены имеющиеся в литературных источниках результаты исследований структурных и электрофизических свойств тонких пленок BSTO в зависимости от ряда технологических параметров.

Рассмотрена проблема температурной нестабильности параметров сегнетоэлектрических элементов. Приводится ряд наиболее перспективных методов подавления температурной зависимости [1-3], одним из которых является использование сегнетоэлектрических пленок с переменным по толщине составом (многослойные пленки). Из приведенного анализа следует, что в литературе практически отсутствуют данные об СВЧ свойствах подобных структур и простые модельные представления, позволяющие устанавливать связь между стехиометрическим составом слоев, их толщиной и требуемым диапазоном температурной стабилизации.

Рассмотрено явление медленной релаксации емкости тонкопленочных сегнетоэлектрических элементов после воздействия управляющего напряжения. На основании анализа экспериментальных результатов и теоретических представлений, имеющихся в литературных источниках, выделены возможные причины рассматриваемого явления, а именно: наличие остаточных доменных областей, образование объемного заряда, миграция заряженных дефектов[4-7]. Из приведенного анализа следует, что, несмотря на актуальность проблемы и большого количества работ, посвященных данной тематике, до настоящего времени не существует единой физической модели, а также способов подавления медленной релаксации емкости тонкопленочных сегнетоэлектрических элементов.

Глава 2 посвящена характеристике тонкопленочных сегнетоэлектрических СВЧ конденсаторов различных конструкций и исследованию особенностей их свойств.

Описаны конструкции исследуемых в работе тонкопленочных сегнетоэлектрических СВЧ конденсаторов. Приведены зависимости изменения их емкости от напряжения управления и частотные ($1 \div 30$ ГГц) зависимости СВЧ потерь.

Приведены данные основных параметров технологического процесса получения тонкопленочных сегнетоэлектрических СВЧ конденсаторов. Обоснован выбор материала подложки и электродов.

Часть главы посвящена проблеме низкой температурной стабильности параметров сегнетоэлектрических элементов. Подавление температурной зависимости осуществлялось за счет использования сегнетоэлектрических пленок с переменным по толщине составом. Приведены данные по аппроксимации экспериментальной температурной зависимости ёмкости ($C(T)$) однослойных сегнетоэлектрических конденсаторов с помощью функции:

$$\frac{1}{C(T)} = \begin{cases} 2 \frac{T_c - T}{C_0} + \frac{1}{C_s}, T < T_c \\ \frac{T - T_c}{C_0} + \frac{1}{C_s}, T > T_c \end{cases}, \quad (1)$$

где T_c – температура Кюри, C_0 – параметр, определяемый постоянной Кюри-Вейса, C_s – ёмкость «мертвого» слоя на границе М/СЭ.

На основании анализа зависимостей емкости конденсаторов от толщины сегнетоэлектрической пленки и данных ВИМС проведена оценка параметров мертвого слоя на границе М/СЭ: $C_s \sim (30 \pm 10)$ фФ/мкм², толщина ~ 20 нм и $\epsilon \sim 100$ (соответствует TiO_2). На основании экспериментальных данных и соотношения (1) проведено моделирование температурной зависимости емкости многослойных сегнетоэлектрических конденсаторов плоскопараллельной и планарной конструкции. Теоретически показано, что в случае двухслойного конденсатора

плоскопараллельной конструкции может быть достигнута абсолютная температурная стабильность (ТКС=0) (Рис.1), если значения толщины слоев (d_1 и d_2) и параметров пленок, определяемых постоянными Кюри-Вейса материала (C_{01} и C_{02}) удовлетворяют соотношению:

$$d_1 = 2 \cdot \frac{C_{01}}{C_{02}} \cdot d_2$$

Корректность приведенного теоретического подхода экспериментально подтверждена исследованиями в диапазоне температур (250÷350)К плоскопараллельных конденсаторов на основе двухслойной плёнки $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$: $d_1=0.54$ мкм, $x = 0.5$ и $d_2=0.3$ мкм, $x = 0.9$. Температурный коэффициент емкости полученной структуры составил $ТКС \sim 2 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ (Рис.2).

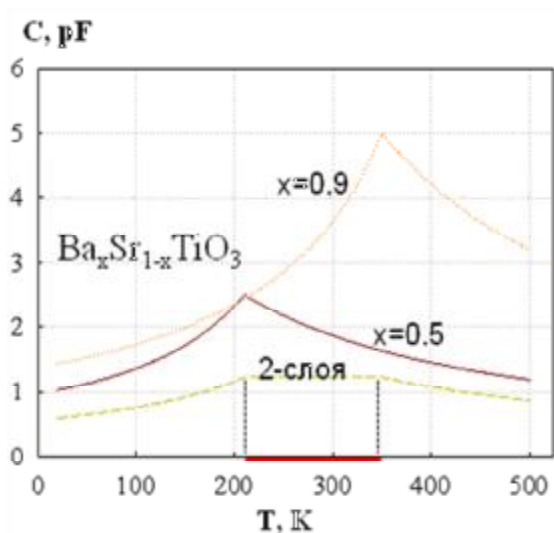


Рисунок 1 - Расчетные температурные зависимости ёмкости для конденсаторов с одним и двумя сегнетоэлектрическими слоями разного состава.

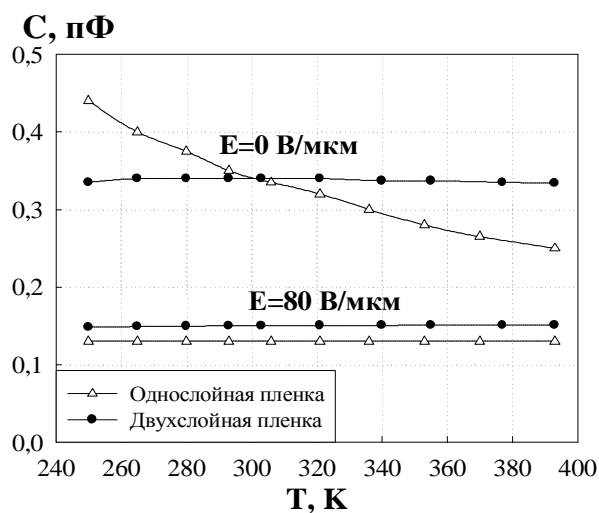


Рисунок 2 – Экспериментальные температурные зависимости ёмкости при различных напряженностях электрического поля для конденсаторов с одним и двумя сегнетоэлектрическими слоями.

Главе 3 посвящена определению природы и поиску способов подавления процесса медленной релаксации ёмкости тонкопленочных сегнетоэлектрических элементов.

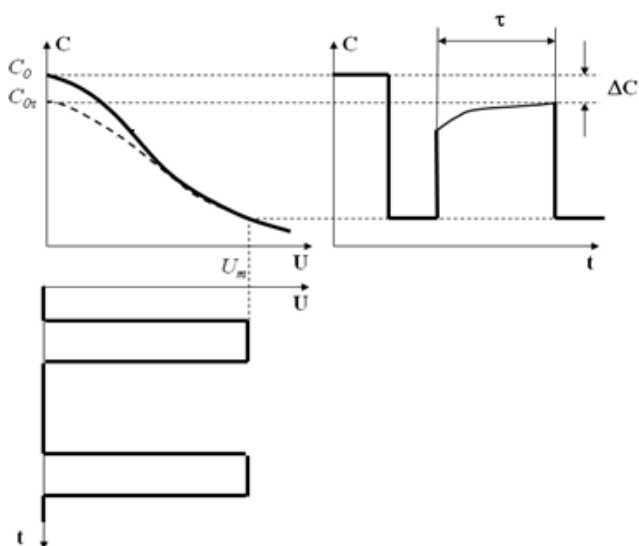


Рисунок 3 - Схематическая иллюстрация изменения ёмкости СЭ конденсатора под воздействием периодических импульсов управляющего напряжения.

Как схематически показано на рис.3 СЭ конденсатор демонстрирует медленные процессы релаксации емкости после окончания воздействия управляющего импульса напряжения. Это ведет к снижению управляемости СЭ конденсаторов и неоднозначности номинала их емкости при различной скважности и амплитуде импульсов управления. Для определения природы наблюдаемого явления были проведены комплексные исследования по

влиянию технологии изготовления сегнетоэлектрических элементов, влиянию интерфейсов сегнетоэлектрических пленок и конструкции конденсаторов на степень проявления процессов медленной релаксации.

Приведены результаты исследований быстродействия сегнетоэлектрических конденсаторов различных конструкций в широком диапазоне температур. Установлено, что время полной релаксации емкости ($\Delta C=0$) существенно уменьшается при увеличении температуры. В ходе исследования было также обнаружено, что формирование контактов М/СЭ в кислородосодержащей среде позволяет подавить процессы медленной релаксации емкости сегнетоэлектрических конденсаторов до пороговых величин напряженности электрического поля $E \sim 40 \text{ В/мкм}$. Установлено, что экспериментальные зависимости $\Delta C(t)$ с высокой точностью описываются суммой двух экспонент с двумя постоянными времени:

$$\Delta C(t) = Ae^{-t/t_1} + Be^{-t/t_2}$$

На основании проведенных экспериментальных исследований и анализа литературных данных было показано, что основной причиной медленной релаксации емкости является объемный заряд в СЭ пленке, образующийся при воздействии управляющего напряжения. Его формирование обусловлено наличием ловушечных уровней в объеме СЭ, глубины залегания которых составляют $E_{t1}=0.4\text{эВ}$ и $E_{t2}=0.7\text{эВ}$, что подтверждено результатами измерений по двум методикам (метод изотермической релаксации емкости и анализ механизмов токопереноса). Глубины залегания 0.7эВ характерны для кислородных вакансий, которые следует рассматривать не только как ловушечные уровни, но и как заряженные дефекты способные мигрировать по объему СЭ пленки при воздействии Е-поля. Оценена напряженность Е-поля, при которой начинается процесс миграции кислородных ва-

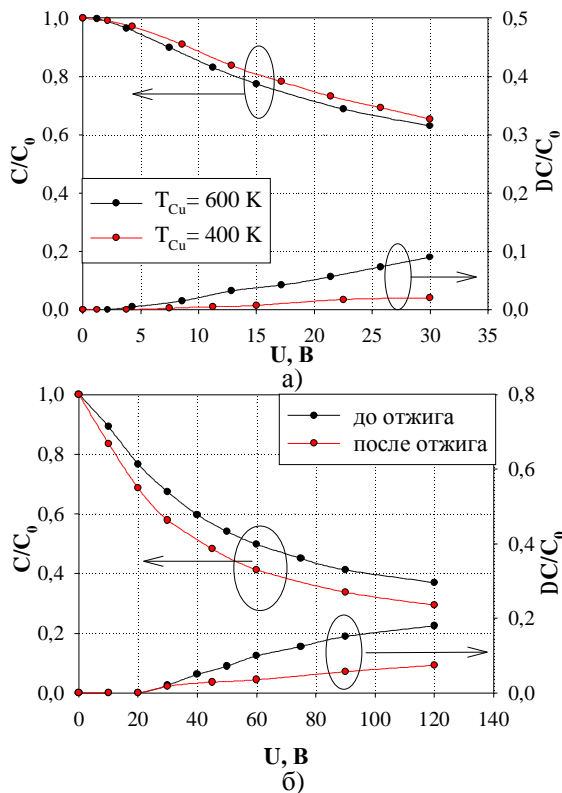


Рисунок 4 – Подавление явления остаточной релаксации за счет а) понижение температуры нанесения металлических электродов б) высокотемпературного отжига в кислороде.

кансий, она достаточно велика по сравнению с вышеприведенными пороговыми уровнями поля и составляет 80В/мкм .

Приведен ряд технологических способов подавления медленных релаксационных процессов в сегнетоэлектрических элементах, предложенный на основании результатов проведенных исследований:

- Нанесение металлических электродов на сегнетоэлектрическую пленку при пониженных температурах (Рис. 4а). Минимальная температура нанесения меди,

при которой наблюдалась хорошая адгезия к пленкам BSTO, составляла 400K ;

- Высокотемпературный отжиг в кислородосодержащей среде сегнетоэлектрических структур после их изготовления (Рис. 4б).

Рис. 4б).

Представлена математическая модель релаксации емкости сегнетоэлектрического конденсатора, основанная на аналитическом решении задачи о релаксации заряда, инжектированного в диэлектрическую пленку, с учетом проводимости материала и влияния ловушек [8].

Четвертая глава посвящена исследованию влияния воздействия ультрафиолетового излучения (УФ) на быстроедействие тонкопленочных сегнетоэлектрических элементов. Объектами исследований являлись планарные СЭ конденсаторы. Длина волны излучения подбиралась таким образом, чтобы энергия кванта излучения была больше, чем ширина запрещенной зоны исследуемых пленок. В качестве источников УФ излучения использовались светодиоды.

Приведены результаты исследований воздействия УФ излучения одинакового уровня мощности в диапазоне длин волн $\lambda=(310\div 400)$ нм на времена медленной релаксации ёмкости и величины токов сквозной проводимости СЭ элементов. Установлено, что УФ излучение способствует радикальному (более чем на три порядка) ускорению медленной релаксации емкости СЭ элементов (Рис.5).

Обнаружено, что спектральные зависимости времен полной релаксации емкости и величины фототока имеют экстремумы, положение которых жестко коррелированы (Рис.5). В ходе исследований установлено, что длина волны, соответствующая наблюдаемым экстремумам, зависит от толщины пленки. Объяснения данной зависимости даны в рамках разработанной физико-математической модели, основанной на предположении о неоднородности процессов фотогенерации и рекомбинации носителей по толщине СЭ пленки. Получено соотношение для фототока в структуре при различных значениях длины волны УФ излучения:

$$I_{ph} \sim I_0 \int_{d_d}^{d-d_d} \frac{a_1 \exp(-a_1 x)}{hn} dx ,$$

где α_λ – коэффициент поглощения для излучения с длиной волны λ ; d_d - толщина приэлектродных слоев.

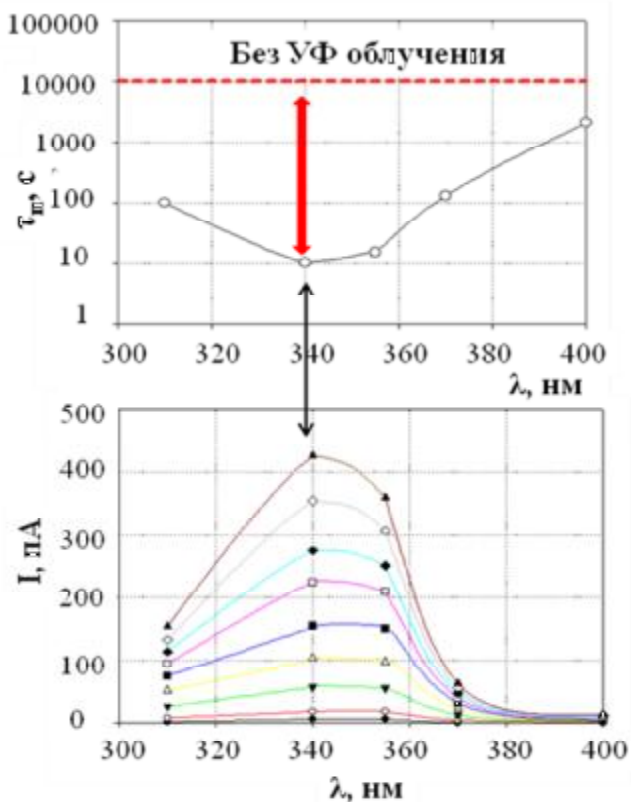


Рисунок 5 - Сопоставление спектральных зависимостей времени релаксации и величины фототока тонкопленочного сегнетоэлектрического конденсатора.

Показано хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов, что обеспечивает возможность выбора источника УФ излучения, соответствующего по длине волны максимальному подавлению медленных релаксационных явлений для СЭ пленок определенной толщины и дефектности. Обнаружено, что зависимость постоянной времени релаксации емкости сегнетоэлектрических конденсаторов при воздействии УФ от мощности излучения носит гиперболический характер. Произведена оценка предельного времени медленной релак-

сации ёмкости, которого можно достигнуть за счет воздействия УФ излучения.

Приложение. На основе модельных представлений работы [8] представлено аналитическое решение задачи о релаксации заряда, инжектированного в диэлектрическую пленку с учетом проводимости материала и влиянии ловушек.

Основные результаты работы:

1) Установлено, что причиной возникновения явления медленной релаксации емкости тонкопленочных сегнетоэлектрических конденсаторов после воздействия управляющего напряжения являются ловушечные уровни в объеме сегнетоэлектрической пленки.

2) Разработан ряд технологических рекомендаций для подавления процессов медленной релаксации емкости в тонкопленочных сегнетоэлектрических конденсаторах.

3) Доказано, что воздействие УФ излучения существенно (на три порядка) ускоряет протекание процессов медленной релаксации в тонкопленочных сегнетоэлектрических конденсаторов.

4) Показано, что применение двухслойных сегнетоэлектрических плёнок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, слои которых отличаются составом x , позволяет уменьшить температурный коэффициент ёмкости до величин, сравнимых с полупроводниковыми аналогами, без потери управляемости структуры по сравнению с однослойными элементами.

Цитируемая литература:

- [1] O.G. Vendik. Layered planar capacitor based on $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ with variable parameter x / O.G. Vendik, S.P. Zubko, S.F. Karmanenko et al. // Journal of applied physics. -2002. -V.91, n.1.- P.331-335.
- [2] А.М. Прудан. Индуцированные состояния сегнетоэлектрика с одинаковой диэлектрической проницаемостью / А.М.Прудан, А.Б.Козырев, А.В.Земцов // Журнал Технической Физики. – 2004. – Т.74, вып.3. – С.87-90
- [3] О.Ю. Буслов. Интегральные сегнетоэлектрические фазовращатели миллиметрового диапазона длин волн на основе периодических структур / О.Ю.Буслов, В.Н.Кейс, А.Б. Козырев и др. // Журнал Технической Физики. – 2005. – Т.75, вып.9. – С.89-94.
- [4] О.Г. Вендик О.Г. Гистерезис диэлектрической проницаемости титаната стронция при 4.2К / О.Г.Вендик, А.И.Дедык, Р.В. Дмитриева и др.//Физика Твёрдого Тела. -1984.- Т.26.-В.3.-С.684-689.
- [5] M. Dawber. Physics of thin-film ferroelectric oxides / M. Dawber, K.M. Rabe, J.F. Scott // Reviews of Modern Physics.- 2005.- V.77.-P.1083-1130.
- [6] А.И. Дедык. Избыточный заряд в титанате стронция / А.И. Дедык, Л.Т. Тер-Мартirosян // Физика Твёрдого Тела. – 1998. -Т.4 -В.2 -С. 245.
- [7] Boikov. Slow capacitance relaxation in $(Ba,Sr)TiO_3$ thin films due to the oxygen vacancy redistribution/ Yu. A. Boikov., B.M. Goltsman., V.K. Yarmarkin, V.V. Lemanov// Applied Physics Letters-2001.- V.78.- Is.24.-P.3866-3868.
- [8] Барыбин А.А. Релаксация заряда в проводящих диэлектрических пленках с мелкими и глубокими ловушками/ А.А. Барыбин, В.И. Шаповалов// Физика Твёрдого Тела.-2008.- Т.50-В.5-С.781-793.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

- 1) А.Г. Алтынников. СВЧ-потери в конденсаторе на основе тонкопленочной структуры металл-сегнетоэлектрик-металл/ А.Г. Алтынников, М.М. Гайдуков, А.Г. Гагарин [и др.] // Письма в Журнал Технической Физики.-2007.- Т.34, В.13.-С.50-55.
- 2) А.Г. Алтынников. Влияние температуры осаждения на структурные и электрофизические свойства тонких пленок титаната бария-стронция/ А.Г.Алтынников, А.В. Тумаркин, А.К. Михайлов // Письма в Журнал Технической Физики. -2008.-Т.34, В.18.-С.14-19.

- 3) А.Г. Алтынников. Распределение неравновесных носителей заряда в нелинейном тонкопленочном конденсаторе/ А.Г. Алтынников, В.А. Вольпяс, А.Г. Гагарин, А.Б. Козырев // Письма в Журнал Технической Физики.-2007. -Т.33, В.19.-С.80-86.
- 4) А.Г. Алтынников. Влияние контактов металл-сегнетоэлектрик на формирование объемного заряда в сегнетоэлектрических тонкопленочных конденсаторах/ А.Г. Алтынников, А.Б. Козырев, М.М. Гайдуков [и др.] // Письма в Журнал Технической Физики.- 2009.- Т.35,В.13.-С.1-7.
- 5) A. Altynnikov. Evaluation of the space charge trap energy levels in the ferroelectric films (Определение глубины залегания ловушечных уровней в сегнетоэлектрических пленках)/ A. Altynnikov, A. Kozyrev, M. Gaidukov et al. // Journal of Applied Physics -2009.-V.106.-P.014108.
- 6) A. Altynnikov. Effect of ultraviolet radiation on slow-relaxation processes in ferroelectric capacitance structures (Эффект воздействия УФ излучения на процессы медленной релаксации в сегнетоэлектрических емкостных структурах)/ A. Altynnikov, A. Kozyrev, M. Gaidukov et al. // Journal of Applied Physics -2010.-V.107.-P.084102.

Другие наиболее важные статьи и материалы конференций:

- 7) А.Г. Алтынников. Исследование релаксационных процессов в тонких сегнетоэлектрических пленках/ А.Г. Алтынников, М.М. Гайдуков, А.Г. Гагарин, А.В. Тумаркин// Известия Высших Учебных Заведений России. Радиоэлектроника. -2008. –В.3. – С.67-70.
- 8) А.Г. Алтынников. СВЧ МДМ конденсаторы на основе сегнетоэлектрических тонких пленок/ Алтынников А.Г., Козырев А.Б., Гайдуков М.М., [и др.] // 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Труды конференции. 2006. – 598-599.
- 9) A. Altynnikov. Effect of the ultraviolet irradiation on the electrophysical properties of varactors based on BSTO films in paraelectric state (Воздействие ультрафиолетового излучения на электрофизические свойства тонкопленочных варакторов на основе пленок BSTO в параэлектрической фазе)/ N. Alfordl, A. Altynnikov, A. Gagarin et al. //Electroceramics XI. 2008. Manchester, UK September 2008. D3-033-P.
- 10) А.Г. Алтынников. Структурные и электрофизические свойства наноразмерных пленок титаната бария-стронция/ А.Г. Алтынников, А.В. Тумаркин, С.В. Разумов [и др.] // XVIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков. Тезисы конференции 9-14 июня 2008. г. Санкт-Петербург. - С.223-224..
- 11) А.Г. Алтынников. Влияние контактов металл-сегнетоэлектрик на формирование объемного заряда в сегнетоэлектрических тонкопленочных конденсаторах/ А.Г. Алтынников, А.В. Тумаркин, А.Г. Гагарин, М.М. Гайдуков, А.Б. Козырев.// XVIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков. Тезисы конференции 9-14 июня 2008. г. Санкт-Петербург. - С.221-222.
- 12) A. Altynnikov. Procedure and results of measurements of time tuning time of ferroelectric varactors (Методика и результаты измерения быстродействия сегнетоэлектрических варакторов)/ A.Kozyrev, A.Kanareykin, A. Altynnikov// ISIF2009 P6-217.
- 13) A. Altynnikov. Tunable microwave capacitor structures based on the multilayer barium-strontium titanate film with reduced thermal instability (Перестраиваемые СВЧ конденсаторные структуры, выполненные на основе многослойных пленок титаната бария-стронция, с подавленной температурной нестабильностью)/ A. Altynnikov, A. Tumarkin, A. Gagarin et al.// European Microwave Week, Paris, 28-30 September 2010. – P. 898-901.