

**Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 621.3.049.77: 621.793

**ОКОДЖИ  
Джейкобс Эхимэир**

**ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ  
КОНДЕНСАТОРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТАНТАЛАТА  
СТРОНЦИЯ-ВИСМУТА ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ  
ПАМЯТИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Минск 2018

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель: **Голосов Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центра 10.1 НИЧ учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Рогачев Александр Александрович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Материаловедение и технология материалов» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

**Латушкина Светлана Дмитриевна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией вакуумно-плазменных покрытий государственного научного учреждения «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Оппонирующая организация: **Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»**

Защита диссертации состоится «27» сентября 2018 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " августа 2018 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент

И.В. Дайняк

## **КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время сегнетоэлектрики находят все более широкое применение в устройствах функциональной электроники при создании конденсаторов, приемников инфракрасного излучения, линий задержки, разнообразных акустооптических устройств. В последние годы началось практическое использование сегнетоэлектриков в микроэлектронике. Из ряда областей возможного применения сегнетоэлектрических тонких пленок следует выделить наиболее важное и активно развиваемое направление – сегнетоэлектрическая энергонезависимая память с произвольным доступом (Ferroelectric Random Access non-volatile Memory или FeRAM). FeRAM имеет ряд преимуществ перед другими видами памяти: высокая скорость чтения – записи, большое количество циклов перезаписи, длительное время хранения информации и низкое напряжение питания. Однако практическое использование сегнетоэлектриков в микроэлектронике сталкивается с серьезными трудностями. Появление в технологии интегральных микросхем многокомпонентных оксидов, с высокой температурой кристаллизации и чувствительных к воздействию многих стандартных процессов ведет к необходимости разработки десятков сопутствующих операций. Поэтому, несмотря на значительный прогресс в этой области, проблему формирования сегнетоэлектрических тонкопленочных структур, удовлетворяющих требованиям технологической совместимости и воспроизводимости, нельзя считать решенной. Последними тенденциями развития технологии нанесения сегнетоэлектрических тонких пленок является внедрение в промышленность современных методов ионно-плазменного распыления, и, в частности, метода ВЧ магнетронного распыления. Данные методы позволяют наносить многокомпонентные тонкие пленки с контролируемым стехиометрическим составом, в широком диапазоне управлять структурно-фазовыми свойствами слоев, а также обеспечивают однородность покрытий на подложках больших размеров. Полученные в последнее время результаты позволяют предположить, что исследование механизмов формирования сегнетоэлектрических тонких пленок и усовершенствование процессов магнетронного распыления позволит улучшить технологию формирования сегнетоэлектрических тонких пленок и сделать ее воспроизводимой и высокопроизводительной.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Диссертационная работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в

рамках научно-исследовательских проектов: ГПНИ «Электроника и фотоника», задание 1.1.14 «Разработка научных основ и технологий ионно-плазменного формирования тонких пленок проводящих оксидов для использования в качестве электродов ячеек сегнетоэлектрических элементов памяти» (2014–2015 гг., № ГР 20142481), хозяйственных договоров на выполнение НИР «Исследование процесса ВЧ магнетронного формирования сегнетоэлектрических пленок из легированных редкоземельными металлами SBT мишеней и адаптированных процессов формирования обкладок конденсаторных структур» (2013 г., № ГР 20131242), «Исследование процессов формирования структур энергонезависимой памяти с использованием ВЧ-магнетронного напыления» (2014–2015 гг., № ГР 20142221) (заказчик – ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск, РБ), международных контрактов № 15-1015К «Разработать конструкцию и изготовить внутрикамерный ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя» (заказчик – Сианьский Политехнический Университет, г. Сиань, КНР), № 14-1162К «Разработать конструкцию внутрикамерного ионного источника на основе торцевого холловского ускорителя с накальным нейтрализатором» (заказчик – ЗАО «Научное и технологическое оборудование», г. Санкт-Петербург, Россия).

Тема диссертационной работы соответствует п. 8 (многофункциональные материалы и технологии) приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. №190.

### **Цель и задачи исследования**

**Целью** исследования является установление закономерностей и разработка методов ионно-плазменного нанесения сегнетоэлектрических тонких пленок и многослойных конденсаторных структур на их основе, способов контроля и управления их физическими свойствами, которые определяют возможность использования сегнетоэлектрических пленок в устройствах энергонезависимой памяти.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать комплекс экспериментального оборудования для нанесения функциональных слоев сегнетоэлектрических конденсаторных структур методами ионно-плазменного распыления;
- разработать методы диагностики диэлектрических и сегнетоэлектрических характеристик тонких пленок;
- исследовать процессы формирования структуры нижнего электрода сегнетоэлектрических конденсаторных структур и влияние технологических параметров нанесения и последующего отжига на его электрофизические свойства;

– исследовать процессы нанесения сегнетоэлектрических тонких пленок на основе танталата стронция-висмута (SBT) при ВЧ магнетронном распылении, разработать методы выбора и контроля режимов нанесения сегнетоэлектрических тонких пленок;

– разработать модель процесса нанесения сегнетоэлектрических тонких пленок при ВЧ магнетронном распылении и получить ее аналитическое описание;

– исследовать процессы формирования пленочных сегнетоэлектрических конденсаторных структур, разработать методы формирования рисунка конденсаторов, изучить их физические свойства и показать возможность применения сформированных сегнетоэлектрических конденсаторных структур в качестве запоминающих конденсаторов ячеек памяти FeRAM;

– разработать структуру и базовую маршрутную технологию формирования сегнетоэлектрической ячейки памяти FeRAM.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

– предложен механизм ВЧ магнетронного распыления мишеней танталата стронция висмута (SBT) и ниобата-танталата стронция-висмута (SBTN), согласно которому ионная бомбардировка многокомпонентных оксидов вызывает разрушение их химических связей, после чего дальнейшее распыление идет на атомарном уровне; при этом распыленный поток состоит из входящих в состав мишени нейтральных и ионизированных атомов металлов и кислорода. С учетом предложенного механизма разработана модель расчета пространственного распределения скорости нанесения пленок при ВЧ магнетронном распылении;

– предложена и экспериментально обоснована структура нижнего электрода Pt/TiO<sub>2</sub>/БФСС/SiO<sub>2</sub>/Si (БФСС – борофосфоросиликатное стекло) сегнетоэлектрических конденсаторов Pt/SBT/Pt, обеспечивающая значительное уменьшение процессов шипообразования на поверхности слоя платины при высокотемпературном кристаллизационном отжиге, что позволяет использовать Pt электрод при температурах до 780 °С.

– определен характер влияния параметров ВЧ магнетронного распыления и последующего кристаллизационного отжига на структуру, фазовый и элементный состав, диэлектрические характеристики тонких пленок танталата-ниобата стронция-висмута.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментально обоснованные режимы формирования пленок ниобата-танталата стронция-висмута, получаемые методом ВЧ магнетронного распыления сегнетоэлектрической мишени состава Sr<sub>0,8</sub>Bi<sub>2,5</sub>Ta<sub>1,2</sub>Nb<sub>0,9</sub>O<sub>9,8</sub> в Ar/O<sub>2</sub>

смеси газов и последующего кристаллизационного отжига в среде кислорода при температурах 700 – 800 °С, что позволяет при частичной замене тантала ниобием (43% Nb) понизить температуру формирования сегнетоэлектрической фазы как минимум до 700 °С и формировать пленки с остаточной поляризацией 9,2 мкКл/см<sup>2</sup>, коэрцитивной силой 157 кВ/см, диэлектрической проницаемостью 152 единицы при тангенсе угла диэлектрических потерь 0,06, и температурой Кюри 360 – 375 °С, что уменьшает рабочие напряжения элементов памяти и увеличивает совместимость с полупроводниковыми технологиями.

2. Экспериментально установленные особенности изменения морфологии поверхности нижнего электрода сегнетоэлектрических конденсаторов Pt/SBT/Pt при высокотемпературном кристаллизационном отжиге, проявляющиеся в образовании на поверхности Pt шипов вследствие релаксации сжимающих напряжений в слое, а также зависимости размеров и плотности шипов от толщины слоя платины, структуры подслоев, времени и температуры отжига, учет которых позволил разработать рекомендации по снижению высоты и плотности распределения шипов до допустимых для практического применения значений, не превышающих 45 нм и  $4,0 \times 10^{10} \text{ м}^{-2}$  соответственно, путем формирования нижнего электрода со структурой типа Pt/TiO<sub>2</sub>/БФСС/SiO<sub>2</sub>/Si при толщине слоя платины 70 нм и температуре отжига не более 780 °С.

3. Экспериментально установленные закономерности процессов ВЧ магнетронного распыления сегнетоэлектрических SBT и SBTN мишеней, которые показывают, что в разрядной зоне магнетрона генерируется направленный поток отрицательно заряженных ионов атомов мишени и рабочего газа, угол разлета которых составляет 20 – 30°, что приводит к предпочтительной конденсации распыленных атомов в центре подложки у оси магнетрона и неравномерному распределению толщины наносимых пленок. Разработанная на основе установленных закономерностей модель расчета распределения скорости нанесения при ВЧ магнетронном распылении, учитывающая поток формирующихся отрицательно заряженных ионов, и схема процесса нанесения тонких пленок SBTN на вращаемую подложку при смещении оси магнетрона относительно оси подложки, позволяющая уменьшить неравномерность толщины наносимой пленки на подложке Ø 100 мм до ±22% и уменьшить неравномерность распределения компонентного состава пленки по площади подложки по сравнению со схемой нанесения на стационарную подложку.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в разработке и создании экспериментального технологического и диагностического оборудования, непосредственном участии в подготовке и проведении экспериментов, анализе, интерпретации и обобщении полученных результатов.

Основные положения, результаты, выводы и рекомендации диссертационной работы получены автором самостоятельно. Автором сформулированы научные проблемы, цель работы, осуществлена постановка задач, исследованы и разработаны выносимые на защиту модели, методики, алгоритмы и закономерности. Основными соавторами опубликованных работ являются научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Голосов Д.А., канд. техн. наук, доцент Завадский С.М., академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор Достанко А.П., с.н.с. Мельников С.Н. В совместно опубликованных работах автор осуществлял постановку целей и задач исследований, непосредственно проводил исследования, принимал непосредственное участие в интерпретации полученных результатов и формулировке выводов. Соавторы оказывали помощь в изготовлении отдельных элементов оборудования, выполнении компьютерных расчетов, обсуждении результатов. Соавторам принадлежат результаты, не вошедшие в диссертацию.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Апробация работы проводилась в Центре 10.1 «Электронных технологий и технической диагностики технологических сред и твердотельных структур» (г. Минск, РБ). Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на 11-й и 12-й Международных конференциях «Взаимодействие излучений с твердым телом» (2015 г., 2017 г., г. Минск, РБ), IV Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», (2016 г., г. Гомель, РБ), VII Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» (2016 г., г. Минск, РБ), IX Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике» (2017 г., Нальчик, РФ).

### **Опубликование результатов диссертации**

По материалам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах (всего 1,8 авторского листа), 6 статей в материалах международных и научно-технических конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, общих выводов и библиографического списка. Полный объем диссертации составляет 151 страницу основного текста, в том числе: 102 иллюстрации на 35 страницах, 8 таблиц на 2 страницах, 1 приложение на 1 странице. Библиографический список содержит 147 наименований библиографических источников (включая собственные публикации соискателя) на 12 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проведен анализ свойств, методов получения и применения тонких пленок сегнетоэлектрических материалов. Определено, что к сегнетоэлектрикам относятся вещества, у которых в отсутствие внешнего электрического поля имеются области спонтанной поляризации, направление которой может быть изменено электрическим полем. Причем зависимость поляризации от напряженности электрического поля имеет гистерезисный характер. Показано, что сегнетоэлектрики относятся к сложным оксидам со структурой перовскита и имеют элементарную ячейку типа  $ABO_3$ , где  $A$  – щелочной или щелочноземельный элемент,  $B$  – элемент переходного металла. В такой решетке атомы элемента  $B$  под действием электрического поля могут смещаться от центра элементарной ячейки и занимать несколько стабильных положений. В результате возникает спонтанная поляризация и состояния, при которых нулевому электрическому полю соответствует остаточная поляризация равная  $P_r$  и  $-P_r$ , являются устойчивыми. Поэтому сегнетоэлектрик в поляризованном состоянии может хранить двоичную информацию, и точки  $P_r$  и  $-P_r$  петли гистерезиса могут интерпретироваться как логические «1» и «0». Это свойство сегнетоэлектриков используется в новом типе запоминающих устройств – сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти с произвольным доступом (FeRAM). Элементом хранения информации в FeRAM является конденсатор с сегнетоэлектрической пленкой. Показано, что на данный момент имеется ряд схемотехнических решений организации ячеек памяти FeRAM: однотранзисторная ячейка 1Т, транзисторно-конденсаторная ячейка 1Т/1С и двойная ячейка 2Т/2С. Показано, что практически все производимые в настоящее время FeRAM базируются на структуре низкой плотности, в которой планарный сегнетоэлектрический конденсатор размещается рядом с управляющим транзистором и одна из обкладок конденсатора соединяется при помощи столбика с управляющим транзистором. Конденсатор формируется на толстом слое диэлектрика и представляет собой многослойную структуру, которая состоит из слоя сегнетоэлектрика, верхней и нижней обкладки и нижнего адгезионного слоя.

На основе анализа принципов работы и структур ячеек памяти сформулированы требования к сегнетоэлектрическим материалам FeRAM: сегнетоэлектрик должен обладать высокой остаточной поляризацией; коэрцитивное поле, требуемое для переключения ячейки из одного состояния в другое, должно быть минимальным; сегнетоэлектрический конденсатор должен обладать низкими токами утечки и минимальной усталостью; для исключения деградации коммутирующих транзисторов температура формирующего кристаллизационного отжига сегнетоэлектрика должна быть минимальной.

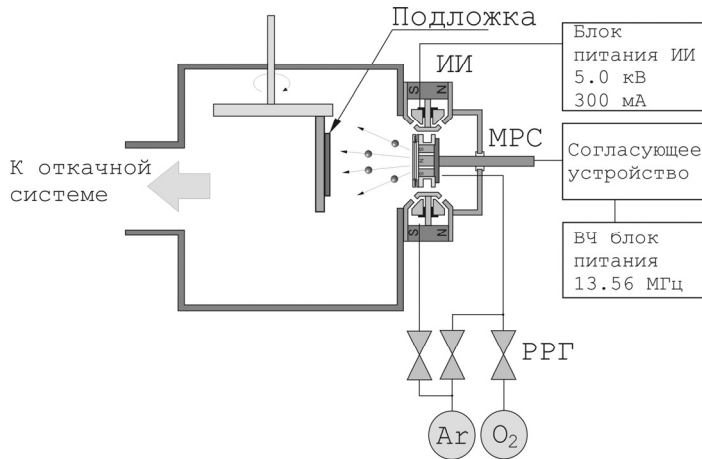


Рассмотрены сегнетоэлектрические материалы, которые могут быть использованы в конденсаторных структурах ячеек памяти FeRAM. Показано, что наибольшие перспективы имеют сегнетоэлектрические материалы на основе танталата стронция-висмута  $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$  (SBT). Отличительной особенностью SBT является хорошая выносливость против усталости (до  $10^{12}$  циклов переполаризации) и низкие токи утечки. Однако высокая температура формирования сегнетоэлектрической фазы SBT (более  $750^\circ\text{C}$ ) создает большие проблемы при изготовлении FeRAM. На основе анализа литературных источников установлено, что частичная замена тантала анионами металлов подгруппы ванадия позволяет уменьшить температуру отжига, достигнуть более высоких значений остаточной поляризации и температуры Кюри по сравнению с SBT.

Установлено, что основными проблемами получения пленок SBT являются их многокомпонентность и высокие температуры формирования сегнетоэлектрической фазы. При этом современные технологии требуют нанесения пленок на подложки диаметром более 200 мм с неравномерностью толщины менее  $\pm 5\%$ . Анализ литературных данных показал, что в последние годы для нанесения многокомпонентных тонких пленок интенсивно ведутся исследования по разработке и внедрению в промышленность методов высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления. Это связано, прежде всего, с тем, что метод магнетронного распыления позволяет активно управлять процессом формирования слоев и, тем самым, обеспечивать условия для получения пленок с заданными свойствами. Однако анализ показывает, что до настоящего времени не существует единой методики и «стандартных» режимов процесса, использование которых гарантировало бы высокий и воспроизводимый конечный результат при нанесении пленок сегнетоэлектриков. Это связано с не всегда достаточно ясным пониманием особенностей нанесения пленок многокомпонентных оксидов и наличием большого количества трудно контролируемых, взаимовлияющих факторов, определяющих процессы распыления мишени, транспорта распыленного потока и его конденсации. На основе проведенного обзора определены проблемы и сформулированы задачи исследований.

Вторая глава посвящена экспериментальному оборудованию для нанесения функциональных слоев тонкопленочных сегнетоэлектрических структур методами магнетронного распыления и диагностического оборудования для определения диэлектрических и сегнетоэлектрических характеристик нанесенных тонких пленок. Для реализации процессов нанесения слоев методами магнетронного распыления разработана экспериментальная установка на базе вакуумного поста Leybold-Heraeus A550 (рисунок 1). Установка была оборудована оригинальной вакуумной камерой  $\varnothing 250$  мм. Для высоковакуумной откачки в установке применен турбомолекулярный насос TURBOVAC NT 200, что позволило исключить попадание паров масел в наносимые пленки. Для предвари-

тельной ионной очистки подложек использовался фланцевый ионный источник (ИИ) на основе ускорителя с анодным слоем. Для распыления мишеней использовалась магнетронная распылительная система (МРС) RIF.039 оригинальной конструкции с мишенью  $\varnothing$  39 мм. Расход рабочих газов ( $\text{Ar}$ ,  $\text{O}_2$ ) контролировался с помощью автоматических регуляторов расхода газа РРГ-1 (РРГ).



**Рисунок 1. – Схема экспериментальной установки для нанесения тонких пленок методами магнетронного распыления**

трофизических и сегнетоэлектрических характеристик формируемых конденсаторных структур разработан диагностический комплекс (рисунок 2). Комплекс позволяет измерять такие характеристики сегнетоэлектриков как емкость, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, максимальная и остаточная поляризация, коэрцитивная сила, температура Кюри, токи утечки, усталость и импринтинг материала в частотном диапазоне от 25 Гц до 1.0 МГц при постоянном смещении до 40 В. Для измерения поляризационных характеристик в работе использовался метод Сойера-Тауэра.

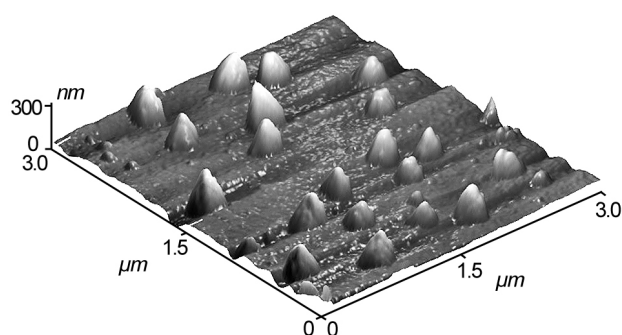


**Рисунок 2. – Общий вид диагностического комплекса для анализа диэлектрических свойств тонких пленок**

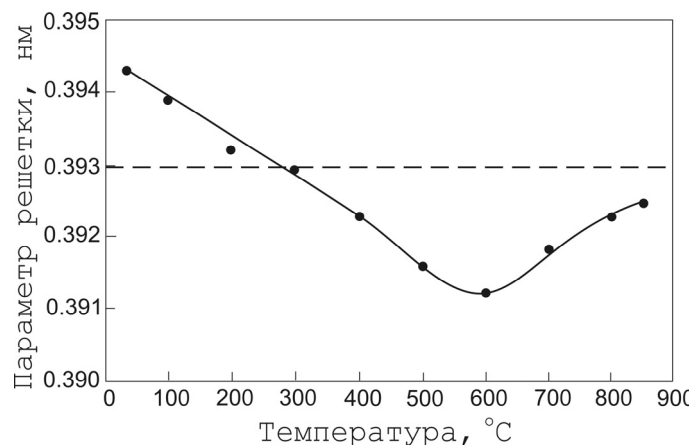
Для предварительной ионной очистки подложек с ранее сформированными активными структурами разработан ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя. Особенностью данного ионного источника является использование в качестве источника магнитного поля высокотемпературных Sm-Co постоянных магнитов, что позволило отказаться от водяного охлаждения системы. Для измерения элект-

В третьей главе приведены результаты исследований изменения структуры, электрофизических свойств и морфологии нижнего Pt электрода при высокотемпературном отжиге структур Pt/Ti/Si и Pt/TiO<sub>2</sub>/БФСС/Si (БФСС – борофосфоросиликатное стекло) в атмосфере кислорода. На основе рентгеновского дифракционного анализа установлено, что при отжиге, независимо от толщины слоя Pt и материалов используемых подслоев, платина рекристаллизуется и текстурируется в направлении [1 1 1]. При этом

наблюдается подавление текстуры в направлении  $[2\ 0\ 0]$  и  $[2\ 2\ 0]$ . При этом удельное сопротивление пленок снижается примерно с 0,2 до 0,15 мкОм×м и при толщине пленки более 200 нм не зависит от толщины пленки. С помощью атомной силовой микроскопии (АСМ) показано, что основной проблемой применения платины в качестве электродов сегнетоэлектрического конденсатора является формирование шипов на поверхности платины, которые образуются в результате рекристаллизации пленки платины (рисунок 3). Высота, плотность и размер шипов зависят от толщины слоя платины, структуры подслоев, времени и температуры отжига. Формирование шипов вызывается сжимающими напряжениями в пленке, которые возникают в процессе рекристаллизации. Это подтверждается изменением параметра решетки (рисунок 4). Начальному росту кристаллов платины способствует монокристаллическая структура кремния.



**Рисунок 3.** – АСМ изображение поверхности структуры Pt/Ti/Si после отжига в атмосфере O<sub>2</sub> при температуре 460 °C

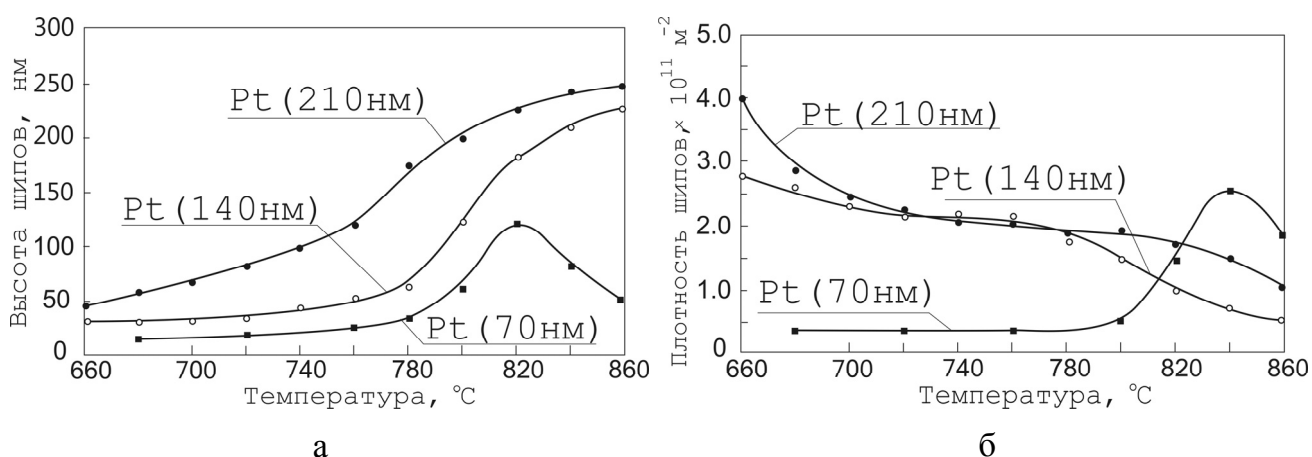


**Рисунок 4.** – Зависимость параметра решетки пленки Pt в структуре Pt/TiO<sub>2</sub>/БФСС/SiO<sub>2</sub>/Si от температуры отжига

Максимальная температура отжига структур Pt/Ti/Si в атмосфере кислорода не превышает 600 °C. При данной температуре формируется сплошная шероховатая поверхность с высотой неровностей превышающей толщину пленки. На основе проведенных исследований установлено, что применение структуры Pt/TiO<sub>2</sub>/БФСС/SiO<sub>2</sub>/Si, оптимизация толщин слоев и режимов отжига позволяют использовать данные структуры без значительных изменений микрорельефа поверхности платины при температурах, по крайней мере, до 780 °C (рисунок 5), что дает возможность применять данные структуры в качестве нижнего электрода сегнетоэлектрических конденсаторов ячеек памяти FeRAM на основе пленок SBT.

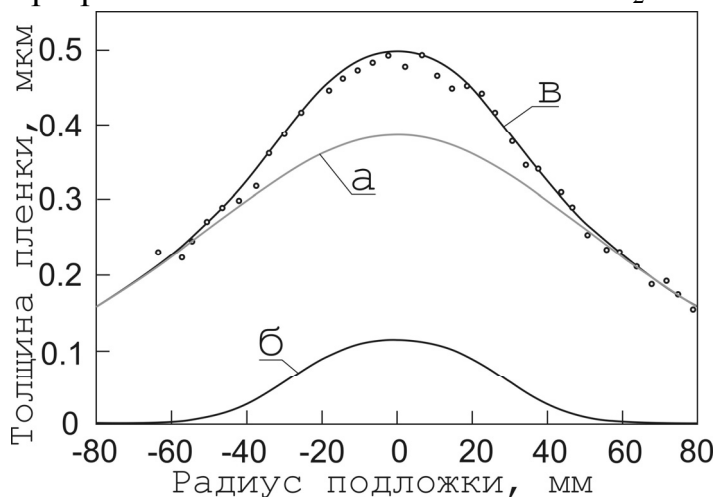
В **четвертой главе** приведены результаты исследований процессов ВЧ магнетронного распыления сегнетоэлектрических мишеней состава SrBi<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> (SBT) и Sr<sub>0,8</sub>Bi<sub>2,5</sub>Ta<sub>1,2</sub>Nb<sub>0,9</sub>O<sub>9,8</sub> (SBTN). Исследования распределения толщины

наносимых слоев при распылении SBT и SBTN мишеней магнетронами RIF.039 и MARS.080 показали, что профиль распределения толщины имел негетомогенный характер (рисунок 6, кривая в). В центре подложки скорость нанесения значительно превышала скорость нанесения, характерную для распыления на постоянном токе. Причем компонентный состав нанесенной пленки зависел от положения точки конденсации на подложке. Также установлено, что в процессе распыления в среде Ar происходит восстановление распыляемых оксидов. Недостаток кислорода в пленке компенсируется добавкой кислорода (25 – 30 %) в смесь Ar/O<sub>2</sub> рабочих газов.



**Рисунок 5. – Зависимость высоты (а) и плотности (б) шипов на поверхности структур Pt/TiO<sub>2</sub>/БФСС/SiO<sub>2</sub>/Si от температуры отжига при различной толщине слоя Pt (время отжига 30 мин)**

С целью определения состояния распыленных частиц проведены спектральные исследования оптического излучения плазмы магнетронного разряда при распылении SBTN мишени в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов. Анализ эмиссионных спектров плазмы показал, что при распылении в среде Ar в спектре присутствовали интенсивные линии излучения рабочих газов и линии излучения входящих в состав мишени нейтральных и ионизированных атомов металлов и атомарного кислорода.



**а – нейтральные частицы, б – ионизированные частицы, в – суммарный профиль**  
**Рисунок 6. – Распределение толщины нанесенной пленки при распылении SBTN мишени магнетроном MARS.080**

При увеличении содержания кислорода смеси в Ar/O<sub>2</sub> рабочих газов наблюдалось увеличение интенсивности линий атомарного кислорода. При этом отмечалось уменьшение интенсивности линий металлов, что подтверждает

лось снижением скорости распыления. На основе полученных результатов сделан вывод, что при ВЧ магнетронном распылении процесс распыления идет на атомарном уровне. При этом распыленный поток представляет собой поток нейтральных и ионизированных атомов металлов и кислорода, входящих в состав мишени, а также атомов и ионов рабочих газов. Изменение состава пленки и формирование негомогенного профиля является следствием генерации в разрядной зоне магнетрона направленного потока отрицательно заряженных ионов, угол разлета которых составляет  $20 - 30^\circ$ . Эти частицы бомбардируют поверхность растущей пленки, что приводит к изменению компонентного состава и предпочтительной конденсации распыленных атомов с максимумом у оси магнетона. На основе полученных данных предложен механизм распыления многокомпонентных SBT и SBTN материалов. Предполагается, что при распылении многокомпонентных оксидов ионами Ag первоначально происходит разрушение химических связей оксидов. Вследствие разрушения кислородного остова процесс распыления представляет собой раздельное распыление входящих в состав мишени атомов металлов и кислорода. При добавке кислорода на поверхности мишени восстановленные атомы металлов адсорбируют кислород и вступают в химическую реакцию. При этом на поверхности мишени присутствуют два конкурирующих процесса: разложение оксидов и распыление отдельных компонентов при ионной бомбардировке, и обратное формирование оксидов.

На основе полученных экспериментальных данных разработана модель расчета толщины наносимых слоев при ВЧ магнетронном распылении SBT и SBTN мишеней, которая позволяет рассчитать профиль распределения толщины пленки с учетом формирующегося потока отрицательно заряженных ионов. Для определения скорости нанесения тонкопленочных слоев на подложке при магнетронном распылении применен метод интегрирования распыленного потока с каждой точки зоны распыления. В модели предполагается, что на подложке конденсируются два потока: поток нейтральных частиц, который имеет близкое к косинусному распределение, и поток заряженных частиц, который имеет направленное надкосинусное распределение. В данном случае скорость нанесения в любой точке подложки определяется формулой

$$V(r_2) = V_1(r_2) + V_2(r_2) \quad (1)$$

где  $V_1(r_2)$  и  $V_2(r_2)$  – скорости нанесения на радиусе  $r_2$  подложки для потоков нейтральных и заряженных частиц соответственно.

Скорость нанесения нейтральных распыленных частиц в точке подложки, расположенной на расстоянии  $r_2$  от оси магнетрона рассчитывается по формуле

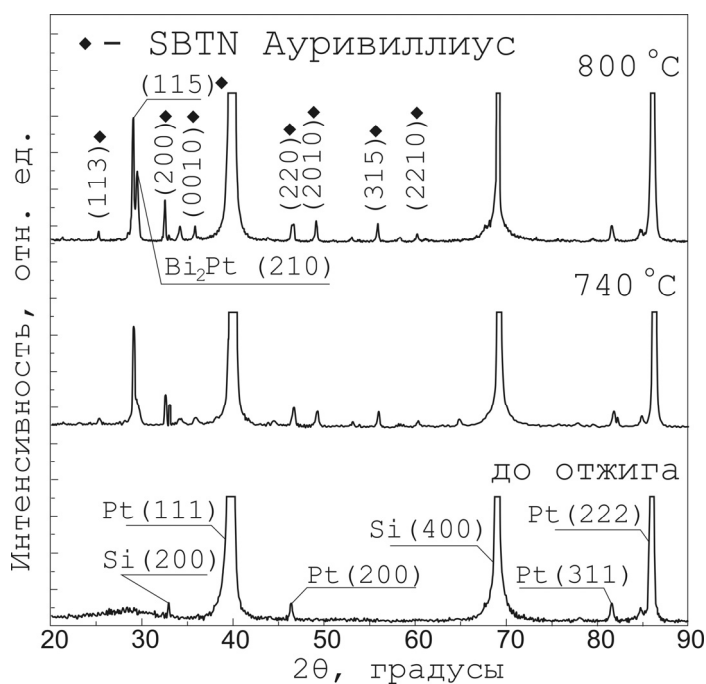
$$V_1(r_2) = \frac{r_1}{\pi} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} dr_1 \int_0^{2\pi} \frac{v_{t1}(r_1) \cos \varphi(r_1, \theta) \cos^{k1} \phi(r_1, \theta)}{l^2(r_1, \theta)} d\theta, \quad (2)$$

а отрицательно заряженных частиц определяется формулой

$$V_2(r_2) = \frac{r_1}{\pi} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} dr_1 \int_0^{2\pi} \frac{v_{t2}(r_1) \cos \varphi(r_1, \theta) \cos^{k_2} \phi(r_1, \theta)}{l^2(r_1, \theta)} d\theta, \quad (3)$$

где  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  – минимальный и максимальный радиусы зоны эрозии мишени,  $r_1$  и  $\theta$  – радиус и угол текущей точки распыления,  $v_{t1}$ ,  $v_{t2}$  и  $k_1$ ,  $k_2$  – соответственно скорости и коэффициенты косинуса угла распыления нейтральных и заряженных частиц,  $\varphi$  и  $\phi$  – углы распыления и конденсации частиц к нормали.

Для верификации предложенной модели проведено моделирование профилей распределения толщины наносимых пленок при распылении SBTN мишеней магнетронами RIF.039 и MARS.080. Анализ результатов моделирования показал, что угол разлета и количество ионизированного материала зависит от напряжения постоянного смещения мишени и может достигать 22 %. Погрешность моделирования не превышала 10 % (рисунок 6 кривая в). Для увеличения равномерности толщины наносимой пленки и распределения элементного состава по площади подложки предложена конфигурация процесса нанесения пленок SBTN на вращаемую подложку при смещении оси магнетрона относительно оси подложки, что позволило уменьшить неравномерность толщины наносимой пленки на подложке  $\varnothing$  100 мм до  $\pm 22\%$  и увеличить равномерность распределения компонентного состава пленки по площади подложки по сравнению с нанесением на стационарную подложку.

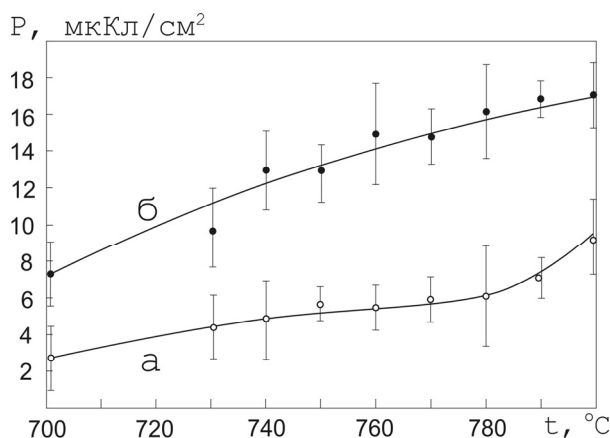


**Рисунок 7. – Диффрактограммы пленок SBTN отожженных при различной температуре**

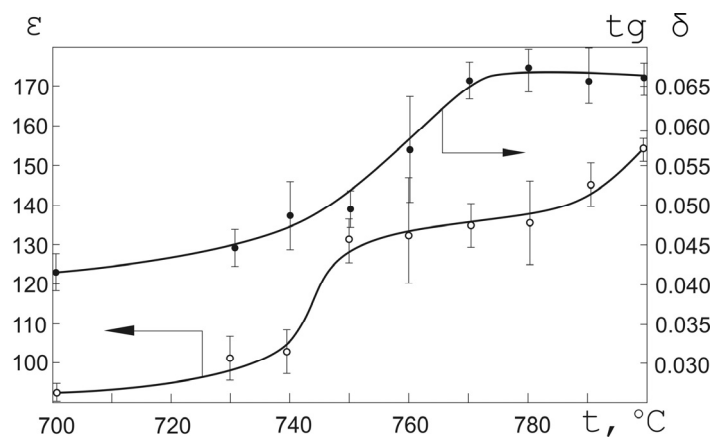
преобразовывалась в промежуточную фазу флюорита. Формирование сегнето-

В пятой главе приводятся результаты исследования диэлектрических и сегнетоэлектрических характеристик тонких пленок ниобата-танталата стронция-висмута, нанесенных методом ВЧ магнетронного распыления сегнетоэлектрической мишени состава  $\text{Sr}_{0.8}\text{Bi}_{2.5}\text{Ta}_{1.2}\text{Nb}_{0.9}\text{O}_{9.8}$  на  $\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{БФСС}/\text{SiO}_2/\text{Si}$  подложки. Результаты рентгеновского дифракционного анализа показали, что непосредственно после нанесения пленки имели аморфную структуру. При отжиге первоначально формировалась фаза пироклора. При увеличении температуры фаза пироклора частично

электрической фазы Ауривиллиуса в пленках SBTN наблюдалось при температурах отжига 700 °С (рисунок 7). При температуре 800 °С получены пленки SBTN с остаточной поляризацией  $2P_r = 9,2$  мкКл/см<sup>2</sup>, коэрцитивной силой  $2E_c = 157$  кВ/см, током утечки  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup> (рисунок 8). Средняя диэлектрическая проницаемость пленок SBTN на частоте 106 Гц составила  $\varepsilon = 152$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 0,06$  (рисунок 9). Температура Кюри пленок SBTN составила 360 – 375 °С. Исследования усталости показали, что нанесенные пленки выдерживали до  $10^{10}$  циклов переполяризации, при этом уменьшение остаточной поляризации не превышало 7 %. Таким образом, легирование пленок SBT ниобием позволило понизить температуру отжига до 720 – 730 °С, повысить диэлектрическую проницаемость, практически в 3 раза увеличить остаточную поляризацию и, примерно на 50 °С увеличить температуру Кюри. Полученные сегнетоэлектрические характеристики пленок SBTN позволяют использовать данные пленки в конденсаторных модулях ячеек памяти FeRAM.



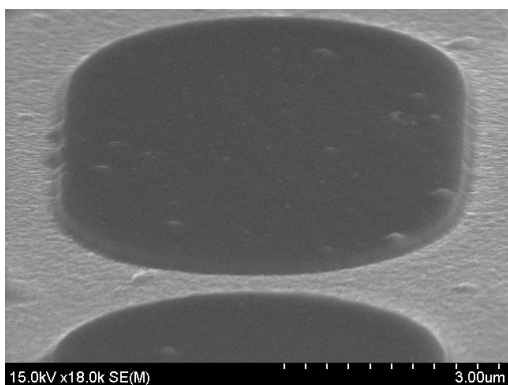
**Рисунок 8. – Зависимости остаточной (а) и максимальной поляризации (б) пленок SBTN от температуры отжига**



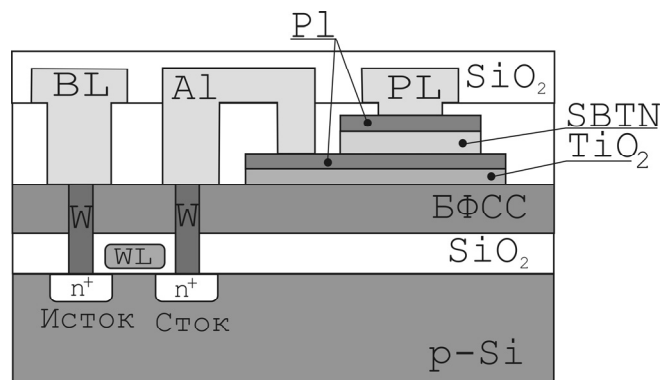
**Рисунок 9. – Зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленок SBTN от температуры отжига**

Проведены исследования по получению сегнетоэлектрических конденсаторных модулей ячеек памяти методами фотолитографии. Для формирования рисунка нижнего Pt электрода был предложен метод «сухого» ионно-лучевого травления. При данной технологии конфигурация нижнего электрода формируется в результате ионного распыления Pt пленки ионами Ag или смеси Ag/O<sub>2</sub> через твердую маску на основе висмута. Для формирования рисунка слоя сегнетоэлектрика и верхнего электрода сегнетоэлектрического конденсатора предложен метод взрывной фотолитографии. В данном случае нанесение пленок сегнетоэлектрика и верхнего электрода осуществляется после нанесения и проявления фоторезиста. Далее производится удаление фоторезиста с пленкой сегнетоэлектрика и верхнего электрода. Данный метод позволяет одноэтапно фор-

мировать конфигурацию конденсатора без использования методов плазмохимического травления (рисунок 10).



**Рисунок 10.** – Сканирующий электронный снимок тестовых сегнетоэлектрических конденсаторов, сформированных методом взрывной фотолитографии



**Рисунок 11.** – Структура разработанной сегнетоэлектрической ячейки памяти FeRAM низкой плотности

Проведенный комплекс исследований позволил разработать структуру 1Т/1С сегнетоэлектрической ячейки памяти FeRAM с планарным сегнетоэлектрическим конденсатором на основе пленки SBTN. В предложенной структуре управляющий *n*-канальный МДП транзистор располагается на поверхности полупроводниковой пластины (рисунок 11). Затвор транзистора является линией управления (*WL*). Сегнетоэлектрический конденсатор располагается на слое диэлектрической изоляции. Нижняя обкладка конденсатора соединяется со стоком управляющего транзистора. Линия данных (*BL*) формируется на основе алюминиевой металлизации и соединяется с истоком управляющего транзистора. Линия передачи данных (*PL*) формируется за счет формирования контакта между *Al* металлизацией и верхней обкладкой конденсатора. Для данной структуры предложена примерная маршрутная технология ее формирования, при которой для формирования рисунка сегнетоэлектрического конденсатора используются методы ионно-лучевого травления и взрывной фотолитографии. Полученные в работе теоретические и экспериментальные закономерности и технология формирования рисунка конденсатора применены при разработке на ОАО «ИНТЕГРАЛ» технологического процесса формирования сегнетоэлектрических конденсаторов, который использован при создании тестовых структур сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Установлено, что при ВЧ магнетронном распылении сегнетоэлектрических SBT и SBTN мишеней имеет место неравномерное распределение толщи-



ны наносимых пленок, и толщина пленки уменьшается более чем в 4 раза с удалением от центра подложки к периферии. Также неравномерное распределение имеет компонентный состав пленок, а именно: с удалением от центральной части подложки к периферии в 1,2 – 1,4 раза увеличивается концентрация O, Ta и Nb и уменьшается концентрация Bi и Sr. На основе полученных экспериментальных данных предложен механизм распыления сегнетоэлектрических SBT и SBTN мишеней, согласно которому при ионной бомбардировке многокомпонентных оксидов первоначально происходит разрушение химических связей оксидов, дальнейший процесс распыления идет на атомарном уровне. При этом в разрядной зоне магнетрона генерируются отрицательно заряженные ионы, которые ускоряясь электрическим полем, создают направленный поток заряженных частиц, угол разлета которых составляет 20 – 30°, а на подложке происходит конденсация нейтральных частиц, имеющих равномерное косинусное распределение, и ионизированных атомов металлов и кислорода, имеющих надкосинусное распределение [4-А].

2. На основе полученных данных разработана модель расчета профилей распределения толщины наносимых пленок при ВЧ магнетронном распылении, которая учитывает поток формирующихся отрицательно заряженных ионов. Проведена верификация предложенной модели при распылении SBTN мишеней магнетронами RIF.039 и MARS.080 показавшая, что погрешность моделирования не превышает 10 %. Предложена схема процесса нанесения тонких пленок SBTN на вращаемую подложку при смещении оси магнетрона относительно оси подложки, что позволило уменьшить неравномерность толщины наносимой пленки на подложке Ø 100 мм до  $\pm 22\%$  и уменьшить неравномерность распределения компонентного состава пленки по площади подложки по сравнению с нанесением на стационарную подложку [2-А, 4-А – 7-А].

3. Установлено, что при частичной замене тантала ниобием (43 % Nb) в пленках SBT позволяет улучшить диэлектрические и сегнетоэлектрические свойства пленок и снизить температуру формирования сегнетоэлектрической фазы до 700 °С. При температуре 800 °С получены пленки SBTN с остаточной поляризацией  $2P_r = 9,2$  мкКл/см<sup>2</sup>, коэрцитивной силой  $2E_c = 157$  кВ/см током утечки  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>. Средняя диэлектрическая проницаемость пленок SBTN на частоте  $10^6$  Гц составила  $\varepsilon = 152$  при тангенсе угла диэлектрических потерь порядка  $\text{tg}\delta = 0,06$ . Температура Кюри пленок SBTN составила 360 – 375 °С. Таким образом, легирование пленок SBT ниобием позволило понизить температуру отжига до 720 – 730 °С, повысить диэлектрическую проницаемость, практически в 3 раза увеличить остаточную поляризацию и, примерно на 50 °С, увеличить температуру Кюри [1-А, 3-А, 9-А].

4. Установлены закономерности изменения микрорельефа поверхности нижнего электрода сегнетоэлектрических конденсаторов Pt/SBT/Pt при высоко-

температурном кристаллизационном отжиге. Показано, что при отжиге пленок платины, независимо от структуры используемых подслоев, платина рекристаллизуется и текстурируется в направлении  $[1\ 1\ 1]$ . Определен характер зависимости высоты и плотности расположения шипов от толщины слоя Pt, структуры подслоев, времени и температуры отжига. На основе анализа изменения параметра кристаллической решетки Pt при отжиге сделан вывод, что формирование шипов происходит в результате релаксации растягивающих напряжений в пленке, возникающих в процессе ее рекристаллизации. Релаксация сжимающих напряжений в Pt пленке способствует уменьшению ее свободной энергии и изменению постоянной решетки к равновесному значению [8-А].

5. Установлено, что максимальная температура отжига структур Pt/Ti/Si в атмосфере кислорода не превышает 600 °С. Увеличение температуры отжига до 600 °С приводит к формированию сплошной шероховатой поверхности с высотой неровностей, превышающей толщину пленки. Применение структуры Pt/TiO<sub>2</sub>/БФСС/SiO<sub>2</sub>/Si, оптимизация толщин слоев и режимов отжига дает возможность производить процессы кристаллизационного отжига пленок SBTN без значительных изменений микрорельефа поверхности платины при температурах до 780 °С, что позволяет использовать такие структуры в качестве нижнего электрода сегнетоэлектрических конденсаторов ячеек памяти FeRAM [8-А, 10-А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты, предложенные структура 1Т/1С сегнетоэлектрической ячейки памяти FeRAM с планарным сегнетоэлектрическим конденсатором на основе пленки SBTN и примерная маршрутная технология ее формирования могут быть использованы при разработке технологий изготовления сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти. Разработанная модель расчета профилей распределения толщины наносимых пленок при ВЧ магнетронном распылении SBT и SBTN мишеней при некоторой адаптации может быть использована для моделирования технологических процессов нанесения тонких пленок при ВЧ магнетронном распылении многокомпонентных оксидных мишеней.

Полученные в работе теоретические и экспериментальные закономерности и технология формирования рисунка конденсатора применены при разработке на ОАО «ИНТЕГРАЛ» технологического процесса формирования сегнетоэлектрических конденсаторов, который использован при создании тестовых структур сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти, а также гибридизации матриц охлаждаемых фотоприемных устройств на основе структуры с квантовыми ямами.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1-А. Влияние температуры отжига на сегнетоэлектрические свойства пленок легированного ниобием танталата стронция-висмута / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, В. В. Колос, А. С. Турцевич, Д. Э. Окоджи // Микроэлектроника. – 2015. – Т. 44, № 6. – С. 1–8.

2-А. The increase in thickness uniformity of films obtained by magnetron sputtering with rotating substrate / D. A. Golosov, S. N. Melnikov, S. M. Zavadski, V. V. Kolos, J. Okojie // Plasma Physics and Technology. – 2016. – Vol. 3, № 3. – P. 100–104.

3-А. Сегнетоэлектрические свойства пленок танталата стронция-висмута, нанесенных методом ВЧ магнетронного распыления / Д. Э. Окоджи, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, С. М. Завадский, В. В. Колос, Е. А. Поплевка, Ю. А. Жукович // Проблемы физики, математики и техники. – 2018. – Т. 34, № 1. – С. 33–37.

4-А. Окоджи, Д. Э. Особенности нанесения тонких пленок сегнетоэлектриков при ВЧ магнетроном распылении / Д. Э. Окоджи, Д. А. Голосов // Доклады БГУИР. – 2018. – № 4 (114). – С. 87–93.

### Материалы конференций

5-А. Увеличение коэффициента использования материала мишени при магнетронном распылении / А. П. Достанко, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, С. М. Завадский, М. В. Ермоленко, Д. Э. Окоджи // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 11-й Междунар. конф., Минск, 23–25 сент. 2015 г. / Изд. Центр БГУ; ред.: В. М. Анищик [и др.]. – Минск, 2015. – С. 398–400.

6-А. Ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя для предварительной «мягкой» очистки подложек / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Xiubo Tian, Д. Э. Окоджи, В. В. Колос // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : материалы IV Международной научной конференции, Гомель, 9–11 ноября 2016 г.: в 2 ч. Ч. 2 / ГГУ им. Ф. Скорины; ред.: С. А. Хахомов [и др.]. – Гомель, 2016. – С. 32–37.

7-А. Применение сквозного моделирования при проектировании систем магнетронного распыления / С. Н. Мельников, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, Д. Э. Окоджи, Г. М. Рубан, Д. Д. Котинго // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : материалы IV Международной научной конференции, Гомель, 9–11 ноября 2016 г.: в 2 ч. Ч. 2 / ГГУ им. Ф. Скорины; ред.: С. А. Хахомов [и др.]. – Гомель, 2016. – С. 249–254.

8-А. Изменение морфологии платинового электрода на кремнии под воздействием высоких температур / Д. А. Голосов, Д. Э. Окоджи, А. С. Руденков, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, В. В. Колос // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф., Минск, 12–13 окт. 2016 г. / Изд. центр БГУ; ред.: В. Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 47–50.

9-А. Поляризация пленок танталата стронция-висмута при легировании ниобием / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, В. В. Колос, Д. Э. Окоджи, Б. А. Тонконогов // Микро- и нанотехнологии в электронике : материалы IX Международной науч.-техн. конф., Нальчик, 29 мая – 3 июня 2017 г. / Каб.-Балк. ун-т. ; ред.: А.М. Кармоков [и др.]. – Нальчик, 2017. – С. 229–233.

10-А. Формирование пленок оксида циркония методом реактивного магнетронного распыления / Н. Вилья, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Д. Э. Окоджи // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й Международной конференции, Минск 19–22 сент. 2017 г. / Изд. центр БГУ; ред.: В. В. Углов [и др.]. – Минск, 2017. – С. 438–440.

## РЭЗІЮМЭ

Окоджы Джейкабс Эхімзір

**Іённа-плазменная фарміраванне кандэнсатарных структур  
на аснове танталата стронцыя-вісмута для элементаў  
сегнетаэлектрычнай энерганезалежнай памяці**

**Ключавыя словы:** тонкія плёнкі, сегнетаэлектрыкі, танталат стронцыя-вісмута, ВЧ магнетроннае распыленне, FeRAM

**Мэта працы:** распрацоўка метадаў іённа-плазменнага нанясення сегнетаэлектрычных кандэнсатарных структур, метадаў кантролю і кіравання іх фізічнымі ўласцівасцямі, якія вызначаюць магчымасць выкарыстання сегнетаэлектрычных плёнак у прыладах энерганезалежнай памяці.

**Метады даследванняў і апаратура:** атамна-сілавая і сканавальная электронная мікраскапія, рэнтгенаўская дыфрактаметрыя, рэнтгенафлуарэсцэнтны аналіз, стандартныя метадыкі даследавання ўласцівасцяў матэрыялаў.

**Асноўныя вынікі:** устаноўлены заканамернасці ўплыву параметраў ВЧ магнетроннага нанясення і крысталізацыйнага адпалу на структурна-фазавыя, і дыэлектрычныя ўласцівасці плёнак на аснове танталата стронцыю-вісмута (SBT). Паказана, што пры легіраванні SBT ніёбіем (SBTN) фарміруюцца плёнкі з рэшткавай палярызаванасцю  $9,2 \text{ мкКл/см}^2$ , каэрцытыўнай сілай  $157 \text{ кВ/см}$  і токам уцечкі  $10^{-6} \text{ А/см}^2$ . Дыэлектрычная пранікальнасць плёнак SBTN склала 152 адзінкі пры тангенсе кута дыэлектрычных страт  $\text{tg}\delta = 0,06$ .

Абгрунтаваны механізм змены мікравольта Pt плёнак пры высокатэмпературным адпале ў асяроддзі кіслароду, у адпаведнасці з якім фарміраванне шыпоў на паверхні плёнкі абумоўлена расцягвальнымі напружаннімі ў плёнцы пры рэкрысталізацыі. Усталяваны і абгрунтаваны механізм змены кампанентнага складу і фарміравання неамагеннага профілю таўшчыні нанесенай плёнкі пры ВЧ магнетронным распыленні SBT і SBTN мішэняў, што з'яўляецца вынікам генерацыі ў разраднай зоне магнетрона накіраванага патоку адмоўна зараджаных іёнаў. На аснове атрыманых дадзеных распрацавана мадэль разліку профілю размеркавання таўшчыні нанесімых плёнак пры ВЧ магнетронным распыленні SBT і SBTN мішэняў, якая ўлічвае паток адмоўна зараджаных іёнаў.

Распрацавана структура 1Т/1С сегнетаэлектрычнай вочкі памяці на аснове плёнкі SBTN і прыкладная маршрутная тэхналогія яе фарміравання, пры якой для стварэння малюнка сегнетаэлектрычнага кандэнсатара выкарыстоўваюцца метады іённа-прамянёвага трычэння і выбуховая фоталітаграфія.

**Галіна ўжывання:** мікра- і нанаэлектроніка, мікраэлектрамеханічныя сыстэмы.

**РЕЗЮМЕ****Окоджи Джейкобс Эхимэир****Ионно-плазменное формирование конденсаторных структур на основе танталата стронция-висмута для элементов сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти**

**Ключевые слова:** тонкие пленки, сегнетоэлектрики, танталат стронция-висмута, ВЧ магнетронное распыление, FeRAM

**Цель работы:** разработка методов ионно-плазменного нанесения сегнетоэлектрических конденсаторных структур, методов контроля и управления их физическими свойствами, которые определяют возможность использования сегнетоэлектрических пленок в устройствах энергонезависимой памяти.

**Методы исследований и аппаратура:** атомно-силовая и сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, рентгенофлуоресцентный анализ, стандартные методики исследования свойств материалов.

**Основные результаты:** установлены закономерности влияния параметров ВЧ магнетронного нанесения и отжига на свойства пленок на основе танталата стронция-висмута (SBT). Показано, что при легировании SBT ниобием (SBTN) получены пленки с остаточной поляризацией  $9,2 \text{ мкКл/см}^2$ , коэрцитивной силой  $157 \text{ кВ/см}$  и током утечки  $10^{-6} \text{ А/см}^2$ . Диэлектрическая проницаемость пленок достигала 152 единиц при тангенсе угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 0,06$ .

Обоснован механизм изменения микрорельефа Pt пленок при отжиге среде кислорода, в соответствии с которым формирование шипов на поверхности пленки вызывается растягивающими напряжениями в пленке в процессе рекристаллизации.

Обоснован механизм изменения компонентного состава и формирования неомогенного профиля толщины пленки при ВЧ магнетронном распылении SBT и SBTN мишеней, что является следствием генерации в разрядной зоне магнетрона отрицательно заряженных ионов. На основе полученных данных разработана модель расчета профиля распределения толщины наносимых слоев при ВЧ магнетронном распылении SBT и SBTN мишеней, которая учитывает поток отрицательно заряженных ионов.

Разработана структура 1Т/1С сегнетоэлектрической ячейки памяти на основе пленки SBTN и примерная маршрутная технология ее изготовления, при которой для формирования рисунка сегнетоэлектрического конденсатора используются методы ионно-лучевого травления и взрывной фотолитографии.

**Область применения:** микро- и нанoeлектроника, микроэлектромеханические системы.

## SUMMARY

**Okojie Jacobs Ehimare**

### **Ion-plasma formation of capacitor structures based on strontium-bismuth tantalate for elements of ferroelectric non-volatile memory**

**Key words:** thin films, ferroelectric, strontium-bismuth tantalate, RF magnetron sputtering, FeRAM.

**The aim of the work:** development of methods for ion-plasma deposition of ferroelectric capacitor structures, methods for monitoring and controlling their physical properties, which determine the possibility of using ferroelectric films in nonvolatile memory devices.

**Research method and equipment:** atomic force and scanning electron microscopy, X-ray diffractometry, X-ray fluorescence analysis, impedanceometry, standard techniques for studying the properties of materials.

**Main results:** The regularities of the influence of RF magnetron deposition parameters and subsequent crystallization annealing on the properties of strontium-bismuth tantalate (SBT) films are established. It was shown that when SBTN was doped by niobium (SBTN), films with a residual polarization of  $9,2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , a coercive force of  $157 \text{ kV}/\text{cm}$ , and a leakage current of  $10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$  were obtained. The average permittivity of SBTN films was  $\varepsilon = 152$  with the dielectric loss tangent of the order of  $\text{tg}\delta = 0,06$ .

The mechanism of the change in the microrelief of Pt films during high-temperature annealing in oxygen is substantiated, in accordance with which the formation of spikes on the surface of the film is caused by tensile stresses in the film during recrystallization.

The mechanism of changing the element composition and formation of an inhomogeneous profile of the deposited film thickness at RF magnetron sputtering of SBT and SBTN targets is established and justified, which is a consequence of the generation of a directed flow of negatively charged ions in the discharge zone of the magnetron and bombardment of the surface of the growing film. On the basis of the obtained data, a model for calculating the thickness distribution profile of deposited films in the RF magnetron sputtering of SBT and SBTN targets was developed, which takes into account the flow of negatively charged ions.

The structure of 1T/1C FeRAM memory cell based on SBTN film is developed and an approximate route technology of its formation, where methods of ion-beam etching and explosive photolithography are used to form the ferroelectric capacitor pattern.

**Area of application:** micro- and nanoelectronic, micro electrical mechanical systems.

Научное издание

**ОКОДЖИ**  
**Джейкобс Эхимэир**

**ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ  
КОНДЕНСАТОРНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТАНТАЛАТА  
СТРОНЦИЯ-ВИСМУТА ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ  
ПАМЯТИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

---

Подписано в печать 10.08.2018.	Формат 60×84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 90.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
ЛИ №02330/264 от 14.04.2014  
220013, Минск, П. Бровки, 6