

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор -  
проректор по науке ВГТУ

Дроздов И. Г.

2022 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Сапего Евгения Николаевича «Сегнетоэлектрические пленки титаната-станната и титаната-цирконата бария для сверхвысокочастотных применений», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

### **Актуальность темы диссертации**

Многокомпонентные пленки сегнетоэлектрических (СЭ) твердых растворов находят широкое применение при создании устройств энергонезависимой и динамической памяти, управляемых электрическим полем емкостных элементов, различных сенсорных устройств на основе пьезо- и пирозлектрических эффектов и т.д. В научной литературе традиционно много внимания уделяется вопросам влияния условий формирования пленок на их кристаллическую структуру, фазовый состав и электрические характеристики. Несмотря на то, что работы в этом направлении ведутся уже на протяжении нескольких десятилетий, достигнутые параметры СЭ пленок нуждаются в дальнейшем совершенствовании. Особый интерес представляет исследование новых СЭ твердых растворов для различных применений, что может приводить к существенным изменениям свойств структур на их основе.

Поэтому тема диссертации, посвященной разработке технологии осаждения многокомпонентных СЭ пленок титаната-станната и титаната-цирконата бария на диэлектрические подложки и всестороннему исследованию их структурных и электрических свойств, с целью их использования в управляемых устройствах сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона является **актуальной**. Диссертация по **структуре и содержанию** отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата технических

наук. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Она содержит 133 страницы машинописного текста, включает 91 рисунок и 21 таблицу. Список литературы насчитывает 110 наименований.

### **Новизна исследований и результатов работы**

В диссертации получены следующие основные новые научные результаты:

1. Впервые исследованы начальные стадии роста пленок титаната-станната и титаната-цирконата бария на диэлектрических подложках, определены механизмы зародышеобразования в исследуемых условиях осаждения. Данные, полученные при исследовании начальных стадий роста пленок, позволяют определить диапазоны технологических параметров, в которых возможно формирование ориентированных слоев.

2. Установлены причины изменения компонентного состава сегнетоэлектрических пленочных твердых растворов титаната-цирконата и титаната-станната бария в процессе их формирования, приводящие к существенным изменениям свойств пленок и предложены технологические методики по управлению данным процессом;

3. Впервые показано, что высокотемпературный отжиг исследуемых пленок на диэлектрических подложках приводит к формированию твердого раствора с компонентным составом, близким к составу распыляемой мишени. Определены условия высокотемпературной обработки, использование которых приводит к существенному улучшению качества кристаллической решетки исследуемых покрытий.

4. Реализованные в работе емкостные структуры на основе тонкопленочных титанатов-цирконатов и титанатов-станнатов бария демонстрируют изменение емкости более чем в шесть раз при приложении управляющего напряжения, что для планарных СЭ устройств на основе исследуемых твердых растворов достигнуто впервые.

### **Практическая ценность для науки и практики**

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные экспериментальные данные составляют новую научную информацию о свойствах сегнетоэлектрических тонкопленочных гетероструктур, а разработанные в диссертации технологические подходы позволяют реализовать промышленную технологию изготовления сегнетоэлектрических пленок и емкостных элементов на их основе, с характеристиками, существенно расширяющими функциональные возможности СВЧ приборов.

**Достоверность** результатов и **научная обоснованность** выводов, представленных в диссертации, основывается на использовании современного оборудования и методов анализа и обработки данных, воспроизводимостью результатов и их хорошим соответствием с литературными данными. Основные результаты диссертации докладывались на Всероссийских и международных конференциях. Сапего Е. Н. опубликовал 27 научных работ по теме исследования, в том числе 9 статей в ведущих научных изданиях рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. По результатам работы получен патент на способ получения сегнетоэлектрических пленок и зарегистрирована программа для ЭВМ.

Основные результаты и выводы работы могут быть использованы на предприятиях электронной промышленности таких, как ОАО «Ангстрем», ОАО «Светлана», ОАО «Завод Магнетон», а также в таких организациях, как Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Московский государственный технический университет «МИРЭА», Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону), Уральский федеральный университет (Екатеринбург) и др.

#### **Общая оценка диссертации**

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему и создает предпосылки для широкого внедрения сегнетоэлектрических пленочных материалов в СВЧ устройства. На основе проведенных всесторонних исследований разработаны основы технологии формирования многослойных структур, содержащих сегнетоэлектрические слои титаната-станната и титаната-цирконата бария с перспективными для СВЧ применений свойствами. Диссертация изложена доходчивым языком, оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к оформлению диссертаций, содержит достаточное для понимания число иллюстраций и таблиц, текст сопровождается ссылками на публикации. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации.

#### **В качестве замечаний следует отметить:**

1. Методика получения покрытий предполагает расположение подложек вблизи мишени (на расстоянии 2,5 см). На таком расстоянии неизбежно воздействие плазмы вч-разряда на состав и структуру растущих пленок. В частности, текстура пленок во многих случаях может определяться таким воздействием. К сожалению, эффект плазмы вч-разряда не обсуждается в настоящей работе.

2. Для оценки геометрической формы островков соискатель использовал метод рассеяния ионов средней энергии (автореферат, стр. 8). Следовало бы пояснить, каким образом этот статистический метод позволяет детализировать морфологию отдельных островков и оценить их размеры.

Для анализа размера и формы островков целесообразно использовать высокоразрешающие методы исследования структуры, в частности, просвечивающую и сканирующую электронную микроскопию при высоком увеличении.

3. При рассмотрении пленок, полученных распылением мишени  $\text{BaZr}_{0,5}\text{Ti}_{0,5}\text{O}_3$ , говорится об образовании аморфной оксидной фазы. Однако, наличие гало от аморфной фазы на соответствующих дифрактограммах неочевидно.

4. Для получения исследуемых пленок были использованы подложки из сапфира и поликремния. На наш взгляд следовало бы обосновать выбор материала подложек.

5. В работе представлены зависимости емкости планарных конденсаторов от напряженности электрического поля в зазоре (см., в частности, рис. 5.7 – 5.14). Однако, электрическое поле, действующее в зазоре планарного конденсатора неоднородно, поэтому не может характеризоваться одним численным значением.

Вместе с тем, отмеченные недостатки не снижают общего высокого качества выполненной работы.

### **Заключение**

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную для науки и практических применений тему. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Новые научные результаты, полученные диссертантом в работе, имеют существенное значение для науки и практики в области технологии материалов электронной техники. Основные научные результаты достаточно полно отражены в публикациях, в том числе и по Перечню ВАК. Диссертация Сапего Евгения Николаевича соответствует паспорту специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники, и требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, в том числе требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Сапего Евгений Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 –

Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

Диссертация Сапего Е. Н. была заслушана и обсуждена на заседании кафедры физики твердого тела федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» 4 июля 2022 г. (протокол № 22).

На заседании присутствовало 12 человек из 14 сотрудников кафедры. Результаты голосования по проекту отзыва: «за» - 12, «против» - 0, «воздержалось» - 0.

Отзыв подготовил профессор кафедры физики твердого тела ВГТУ

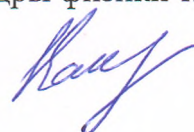
д.ф.-м.н., профессор



Коротков Леонид Николаевич

И.о. заведующего кафедры физики твердого тела ВГТУ

д.ф.-м.н., профессор



Калинин Юрий Егорович

Адрес федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВГТУ»): 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Тел.: +7 (473) 207-22-20

e-mail: [rector@cchgeu.ru](mailto:rector@cchgeu.ru)