

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Сапего Евгения Николаевича «Сегнетоэлектрические пленки титаната-станната и титаната-цирконата бария для сверхвысокочастотных применений», представленную 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**

Актуальность темы рассматриваемой диссертации связана с современным уровнем развития технологий, позволяющих реализовывать сегнетоэлектрические пленочные структуры и создавать на их основе перспективные элементы памяти, сенсоры, устройства управления сигналом и др. В связи с этим актуальными оказываются как исследования электрических свойств подобных структур, так и анализ возможностей их практического применения, выявление тех областей, где это применение дает существенный выигрыш по сравнению с традиционными материалами. В настоящее время широкое использование сегнетоэлектриков в приборах сверхвысокочастотного диапазона сдерживается рядом особенностей материала, среди которых сильная зависимость свойств твердых растворов от температуры окружающей среды, компонентного состава и пр.

Диссертация Сапего Евгения Николаевича посвящена разработке технологии осаждения многокомпонентных сегнетоэлектрических пленочных твердых растворов титанатов-станнатов и титанатов-цирконатов бария и исследованию их характеристик с точки зрения применения в сверхвысокочастотных устройствах. В работе рассматриваются вопросы, связанные с технологическими процессами осаждения сегнетоэлектрических пленок и сверхвысокочастотных элементов на их основе, приводятся результаты изучения их структурных и электрофизических свойств,

уделяется внимание минимизации недостатков сегнетоэлектрических материалов, препятствующих их использованию в приборах сверхвысокочастотного диапазона. В связи с этим можно заключить, что направление представленного диссертационного исследования является актуальным.

### **Новизна и достоверность основных выводов и результатов работы**

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые оценены составы твердых растворов титанатов-станнатов и титанатов-цирконатов бария, перспективные для СВЧ применений;
2. Предложены технологические методики получения пленок требуемого компонентного состава;
3. Впервые получены ориентированные пленки титанатов-станнатов и титанатов-цирконатов бария на поликристаллических диэлектрических подложках за счет использования высокотемпературного отжига в процессе формирования покрытия;
4. Достигнуты рекордные значения управляемости ёмкостных структур на основе тонкопленочных титанатов-станнатов и титанатов-цирконатов бария.

**Достоверность** и обоснованность полученных в работе результатов, определяется использованием современных технологических приемов и диагностических методов. Достоверность не вызывает сомнений и подтверждается представленным в работе фактическим материалом, анализом полученных данных, их сопоставлением с результатами независимых исследований и реализацией устройств на основе полученных пленок. Научные положения, выносимые на защиту, являются обоснованными и подтверждены результатами экспериментов.

### **Ценность для науки и практики**

Полученные в работе результаты имеют значение как для развития технологии получения сегнетоэлектрических материалов, так и для техники сверхвысоких частот. С практической точки зрения наиболее интересными

результатами являются предложенные методики управления компонентным составом исследуемых пленок за счет варьирования технологических параметров и использования постростовой высокотемпературной обработки. Данные методики позволяют осуществить ориентированный рост пленок СЭ твердых растворов титанатов-станнатов и титанатов-цирконатов бария на неориентирующих диэлектрических подложках, т.е., использовать материалы с наилучшими характеристиками с точки зрения конечного устройства, а не с точки зрения структурного соответствия.

Также практическая ценность результатов диссертации состоит в реализации СВЧ емкостного элемента на основе новых для СВЧ применений СЭ твердых растворов, проявляющего высокую нелинейность диэлектрических свойств по сравнению используемыми сегодня материалами. Предложенные в работе емкостные элементы могут быть перспективными для коммерческих предприятий, ориентированных на разработку систем связи СВЧ диапазона.

### **Общая оценка диссертации**

Диссертационная работа написана логичным, доступным для понимания языком и оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Результаты исследований прошли надежную апробацию. Они опубликованы в авторитетных журналах, входящих в список ВАК, индексируемых в WoS и Scopus, и доложены на Всероссийских и международных конференциях.

Автореферат и публикации автора в научных изданиях точно и полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты.

Вместе с тем, в тексте диссертации и автореферата имеется ряд недостатков, вызывающих вопросы и замечания.

### **Замечания**

1. В пункте 2.2.2. стр. 31 сообщается о том, что температура нанесения пленки была 200 °С. Возможно, автор имел в виду температуру нагрева подложки вместе с сегнетоэлектрической пленкой во время термического напыления металлических электродов. В этом же пункте не указано, какие

температурные и временные режимы были использованы для испарения хрома и меди. Была ли проведена предварительная ионная очистка поверхности пленок?

2. В параграфе 2.1. приведены только общие сведения о методике резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Не ясно, является ли используемая в работе установка серийной или собственного изготовления и нет ссылок на работы, где эта установка описана и/или апробирована.

3. В параграфе 3.1, посвященном моделированию процесса транспорта атомных частиц не указан, какой численный метод использовался при расчете физической модели нанесения пленки, хотя в тексте диссертации, вне этого параграфа, один раз упоминалось о применении метода Монте-Карло. Не сообщается, какое программное обеспечение при этом использовалось.

4. Согласно рисунку 4.20 стр. 91 для пленки BSnT, полученной при 800 °С после отжига наблюдается формирование регулярной структуры. Есть ли предположения о причине или механизме формирования такой структуры?

5. В тексте диссертации и автореферата присутствуют незначительное количество опечаток и стилистических ошибок.

Указанные недостатки не носят принципиального характера и не затрагивают основного содержания диссертационной работы.

### **Заключение**

Рассматриваемая работа направлена на решение актуальной научно-технической задачи, связанной с разработкой технологии получения СВЧ структур на основе твердых растворов титанатов-станнатов и титанатов-цирконатов бария, имеющей практическую значимость для разработки систем связи СВЧ диапазона.

Диссертация «Сегнетоэлектрические пленки титаната-станната и титаната-цирконата бария для сверхвысокочастотных применений» полностью соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к

кандидатским диссертациям, а ее автор, Сапего Евгений Николаевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

Официальный оппонент, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории физики сегнетоэлектричества и магнетизма Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН

Залесский Вячеслав Геннадьевич

03 августа 2022 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Почтовый адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26  
тел.: +7(812) 297-2245, +7 (921) 420-76-14

Электронная почта: [nsh@mail.ioffe.ru](mailto:nsh@mail.ioffe.ru)

Электронный адрес института: <https://ioffe.ru>



Подпись Залесского В.Г. удостоверяю  
зав.отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе

Н.С. Бузенко