

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации

Гудкова Сергея Игоревича

«Диэлектрический отклик и электропроводность гетероструктур на основе тонких плёнок ниобата лития и танталата лития, сформированных на кремниевых подложках»,  
представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Интерес к изучению сегнетоэлектриков, в первую очередь, связан с возможностью их практического применения. Одними из широко используемых сегнетоэлектрических материалов являются ниобат лития и танталат лития. Практическая значимость исследования связана со все возрастающими возможностями их применения в микроэлектронике в качестве элементов памяти, микроэлектромеханических системах, инфракрасных приемниках, акусто- и оптоэлектронике и т.д. Это обуславливает необходимость интеграции ниобата лития и танталата лития с кремниевыми технологиями. При этом для большинства технических приложений наиболее перспективными являются тонкопленочные структуры, в частности, структуры металл/сегнетоэлектрик/полупроводник. Однако свойства тонких слоев могут существенно отличаться от их объемных аналогов. К таким отличиям относятся размерные эффекты, в том числе, связанные с ролью интерфейсов.

Таким образом, как научная, так и практическая актуальность настоящего исследования не вызывает сомнений.

### **Анализ содержания диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора, списка условных обозначений и сокращений, списка цитируемой литературы, насчитывающего 170 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 130 страниц. Диссертационная работа включает 38 рисунков и 8 таблиц.

**Во введении** представлены обоснования темы и новизны диссертационной работы, цель, задачи работы, научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматриваются структура, свойства и фазовые диаграммы ниобата лития и танталата лития, а также основы пьезоэлектрического эффекта и особенности структуры и свойств тонкопленочных структур, содержащих сегнетоэлектрические слои.

**Вторая глава** содержит описание объектов исследования, экспериментальных и теоретических методов исследования. Особое внимание уделено описанию методики исследования пироэлектрической активности структур, методам определения величины потенциального барьера, методикам определения механизмов проводимости и методики расчета параметров «мертвого» слоя. Описана методика расчета погрешностей.

**Третья глава** содержит основные экспериментальные результаты исследования свойств структур металл/сегнетоэлектрик/полупроводник на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития. Обнаружено, что все образцы обладают естественной униполярностью, а зависимости тока от напряжения имеют диодный характер. Наблюдается сильная диэлектрическая дисперсия: обнаружено, что низкочастотная диэлектрическая проницаемость структуры на основе тонкой пленки ниобата лития примерно в 10 раз больше, чем у структуры на основе тонкой пленки танталата лития.

**В четвертой главе** представлены результаты расчета пироэлектрических коэффициентов структур и результаты анализа механизмов электрической проводимости. Особое внимание уделено определению величины потенциального барьера, сравнению значений, полученных на основе экспериментальных данных, со значениями, найденными путем теоретического расчета. Определена величина потенциального барьера на интерфейсе в структурах металл/сегнетоэлектрик/полупроводник и влияние на него естественной униполярности. Проведены расчеты параметров «мертвого» слоя, описаны его свойства и вклад в диэлектрическую дисперсию.

### **Основные результаты работы и их научная новизна**

Впервые выполнен комплексный сравнительный анализ структур металл/сегнетоэлектрик/полупроводник на основе тонких пленок родственных сегнетоэлектриков, ниобата лития и танталата лития.

Исследование электрического отклика структур металл/сегнетоэлектрик/полупроводник на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития на модулированное лазерное излучение показало, что в сегнетоэлектрических пленках, не подвергавшихся воздействию электрических полей, присутствует ненулевая макроскопическая поляризация, что свидетельствует об их естественной униполярности.

При этом вектор поляризации в данных структурах имеет антипараллельное направление, что оказывает влияние на высоту потенциального барьера на интерфейсе металл/сегнетоэлектрик, уменьшая ее в структуре на основе ниобата лития и увеличивая в структуре на основе танталата лития. В работе также определены механизмы электрической проводимости для обеих структур.

Автором установлено, что основной причиной сильной диэлектрической дисперсии, наблюдаемой в изучаемых гетероструктурах, является влияние «мертвого» слоя на частотные зависимости электрической емкости. Впервые для структур на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития определены параметры этого слоя. Локализация «мертвого» слоя в структурах на основе ниобата лития и танталата лития отличается, в структуре на основе ниобата лития «мертвый» слой локализован между пленкой и подложкой, а в структуре на основе танталата лития «мертвый» слой является частью самой пленки танталата лития.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов**

Выносимые на защиту научные положения основаны на корректном анализе экспериментальных результатов, проведенных в работе, и являются обоснованными. Достоверность положений подтверждается воспроизводимостью и согласованностью экспериментальных результатов, полученных с применением современных взаимодополняющих друг друга методик исследований, теоретических результатов и литературных данных.

Приведенные в диссертации результаты и выводы являются последовательными, логичными и соответствуют содержанию проведенных исследований.

### **Замечания по диссертационной работе**

Из текста работы не ясны критерии выбора материалов электродов, меди для ниобата лития и серебра для танталата лития.

В тексте работы отсутствует разъяснение по необходимости использования двойного постростового отжига танталата лития, первого – при температуре 550 °С и второго – при температуре 700 °С.

На рисунках 3.5 и 3.6 не отмечены направления обхода вольт-фарадных характеристик. Непонятно, есть гистерезис вольт-фарадной зависимости или нет с учетом наличия самополяризованного состояния сегнетоэлектрического слоя.

Из результатов работы не ясны механизмы, приводящие к разному направлению вектора самополяризации в структурах с ниобатом лития и танталатом лития.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

На основании вышеизложенного, несмотря на отмеченные недостатки и замечания, представленная диссертация Гудкова С.И. выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне и является законченной квалификационной работой, выполненной на актуальную тему и имеющей научное и прикладное значение.

Основные результаты работы опубликованы в 7 научных статьях, из которых 6 представлены в изданиях, рекомендованных ВАК. Публикации достаточно полно отражают содержание диссертационной работы. Автореферат отражает содержание диссертации. Диссертационная работа Гудкова С.И. по объему решенных задач, актуальности, достоверности результатов, научной новизне и практической значимости полностью отвечает критериям «Положения о присуждении ученых степеней» (пп. 9-14), утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, и соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (отрасль наук – физико-математические), а ее автор, Гудков Сергей Игоревич, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математический наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Согласен на обработку персональных данных.

Официальный оппонент:

старший научный сотрудник лаборатории физики сегнетоэлектричества и магнетизма Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, кандидат физико-математических наук (01.04.07 – Физика конденсированного состояния)

Сенкевич С.В.

07 ноября 2023 г.

Подпись Сенкевича С.В. заверяю

Адрес:

194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Телефон: +7(812) 297-2245

E-mail: post@mail.ioffe.ru