

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке, инновациям и цифровизации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет», доктор физико-математических наук, доцент

Д.В. Костин

30.10

2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Актуальность темы диссертации

Исследование сегнетоэлектрических тонких пленок, нанесенных на подложки, в настоящее время является одним из ведущих направлений развития электронной техники, поскольку на основе таких структур можно конструировать ячейки энергонезависимой памяти, микроэлектромеханические системы, различные детекторы и сенсоры, использующие разнообразные уникальные физические свойства сегнетоэлектриков. Тенденция к интеграции сегнетоэлектриков с кремниевыми технологиями диктует необходимость создания пленочных и тонкопленочных сегнетоэлектрических структур на кремниевых подложках. Поскольку наиболее востребованными в различных областях электроники, фотоники, акусто- и оптоэлектроники являются сегнетоэлектрические кристаллы ниобата лития (LN) и танталата лития (LT), создание и исследование тонкопленочных гетероструктур металл-сегнетоэлектрик-полупроводник на основе данных материалов является актуальной проблемой и технически, и научно, так как: 1) на электрофизические свойства пленок влияют условия нанесения и роста пленочной структуры, состав и качество подложки, материал электродов и другие факторы, и поэтому важен выбор оптимальной технологии, обеспечивающей получение гетероструктуры с высокими и устойчивыми рабочими параметрами; 2) свойства объемных материалов значительно отличаются от свойств тонкопленочных структур и причины этого отличия до сих пор недостаточно изучены; 3) характеристики гетероструктур, содержащих

тонкие сегнетоэлектрические слои, могут значительно меняться при изменении параметров внешних электрических полей, и поэтому установление закономерностей их влияния на электрофизические характеристики структур металл-сегнетоэлектрик-полупроводник на основе тонких пленок LN и LT, сформированных на кремниевых подложках является актуальной задачей; 4) тонкопленочные структуры на основе танталата лития, несмотря на явные перспективы их использования, являются недостаточно изученными.

Учитывая вышесказанное, можно утверждать, что диссертационная работа С.И. Гудкова, посвященная исследованию электропроводности, диэлектрических и полярных свойств тонкопленочных гетероструктур, металл (Ag,Cu) - сегнетоэлектрик (LN, LT) - полупроводник (Si), сравнению свойств этих структур, а также установлению взаимосвязи между их электрофизическими характеристиками, является актуальным исследованием.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации, списка условных обозначений и сокращений, списка использованных источников, содержащего 170 наименований. Диссертация изложена на 130 страницах и включает в себя 38 рисунков и 8 таблиц. Основные результаты исследования представлены во второй, третьей и четвертой главах.

Во введении обоснована актуальность темы работы; сформулированы цель и задачи исследования; обоснована достоверность результатов, указаны их новизна, практическая и теоретическая значимость; перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об объектах и методах исследования. Представлена информация об апробации работы, о публикациях по теме диссертации, о личном вкладе автора, о структуре и объеме диссертации.

В первой главе представлен литературный обзор. Рассмотрены основные свойства сегнетоэлектрических материалов – ниобата лития и танталата лития. В этой главе обсуждаются: понятие тонкой пленки, методы изготовления пленочных структур, основные физические свойства гетероструктур, с тонкими сегнетоэлектрическими слоями и возникающие в них явления. Представлен обзор публикаций, посвященных исследованию электрофизических свойств структур на основе тонких пленок LN и LT.

Во второй главе представлены сведения об исследуемых структурах и методиках эксперимента. Изучаемые образцы имели структуру металл-сегнетоэлектрик-полупроводник с тонким пленочным слоем LN или LT. Пленочный слой толщиной 200 нм наносился на кремниевые подложки методом высокочастотного магнетронного распыления. На свободную поверхность сегнетоэлектрической пленки наносились металлические электроды. В результате исследования поверхности пленок с использованием атомно-силовой микроскопии выяснено, что пленки являются поликристаллическими. Здесь же описаны методики исследования электрических характеристик и пироэлектрической активности структур,

механизмов проводимости, высоты потенциального барьера и параметров «мертвого» слоя. В конце главы рассмотрена методика расчета погрешностей.

Третья глава содержит результаты экспериментальных исследований.

Здесь показано, что исследуемые структуры, не подвергавшиеся предварительной поляризации, являются естественно-униполярными, поскольку демонстрируют электрическую активность под воздействием теплового потока с прямоугольной формой модуляции. Сделан вывод о том, что отклик на тепловой поток структуры на основе ЛТ имеет помимо пироэлектрической и фотовольтаическую составляющую.

Исследование вольт-амперных характеристик показало, что для обеих структур они имеют диодный характер. Причем, несмотря на то, что LN и LT являются родственными материалами, а в качестве подложек использовались одинаковые кремниевые пластины, удельная электропроводность LT-структуры на три порядка меньше, чем у LN-структуры.

В этой главе также представлены результаты изучения зависимости электрической емкости исследуемых структур от напряжения смещения и их диэлектрических характеристик от частоты внешнего электрического поля. Показано, что обе структуры имеют значения диэлектрической проницаемости, отличающиеся от значений, известных для объемных материалов: 55 для LN-гетероструктуры против ≈ 29 для объемного кристалла LN; 4,8 для LT-структуры против ≈ 44 для объемного LT. В диссертации это объяснено наличием «мертвого» слоя на интерфейсе сегнетоэлектрик-полупроводник.

В четвертой главе проведен анализ и обсуждение результатов исследования. Показано, что пироэлектрический коэффициент пленки LT, как и в случае объемных материалов, превышает аналогичную характеристику для пленки LN. Но величины пироэлектрических коэффициентов имеют в разы меньшие значения в сравнении с объемными материалами. Это связано с тем, что из-за поликристаллической структуры пленки вектор спонтанной поляризации может быть направлен под углом к поверхности пленки.

Интересным является результат, показывающий, что механизмы переноса заряда в обеих структурах при прямом смещении являются одинаковыми, но отличаются при обратном смещении. Проведена оценка величины потенциального барьера на основе экспериментальных данных в ее сравнении с величиной, определенной теоретически. Делается вывод о том, что различие в величине потенциального барьера в LN-структуре ($\approx 0,81-0,82$ эВ) и LT-структуре ($\approx 1,01-1,02$ эВ) связано с антипараллельным направлением вектора поляризации в пленках, которое определялось по анализу пироэлектрической активности.

Здесь также изучена сильная диэлектрическая дисперсия в исследуемых гетероструктурах, причиной которой является «мертвый» слой, существующий на интерфейсе сегнетоэлектрик-полупроводник. Проведенные расчеты показали, что для структуры на основе LN - это диоксид кремния, а для структуры на основе LT - это слой одной из фаз системы $Li_2O-Ta_2O_5$.

В заключении приводятся выводы по результатам работы.

Новизна исследований и полученных результатов

К наиболее важным научным результатам, полученным автором диссертационной работы, можно отнести следующие.

1. Впервые проведены комплексные исследования и сравнительный анализ электрических характеристик и полярных свойств подобных друг другу гетероструктур, содержащих тонкие пленки родственных сегнетоэлектрических материалов: ниобата лития и танталата лития. Анализ механизмов проводимости показал, что при прямом смещении наблюдается вклад в электропроводность одного и того же механизма для обеих структур, а при обратном смещении механизма различаются.

2. Показано, что вследствие антипараллельного направления вектора макроскопической поляризации в тонких сегнетоэлектрических слоях высота потенциального барьера в структуре, содержащей LN, уменьшает свою величину в сравнении с величиной, полученной теоретически, а в структуре, содержащей LT, наоборот, увеличивает.

3. Проведенные теоретические расчеты величин потенциального барьера показали, что основной вклад в высоту потенциального барьера, полученную экспериментально, вносит барьер на границе раздела металл-сегнетоэлектрик. Этот результат согласуется с результатами эксперимента по исследованию электропроводности структур.

4. Впервые для структур металл-сегнетоэлектрик-полупроводник, содержащих тонкую пленку LN или LT, определены характеристики «мертвого» слоя, присутствующего на границе сегнетоэлектрик-полупроводник. Выяснено, что материал «мертвого» слоя в структуре, содержащей LN, отличается от материала «мертвого» слоя в структуре, содержащей LT.

Научная значимость работы определяется получением новых сведений о связи слоев, образующихся на границе сегнетоэлектрик-полупроводник, с полярными и электрофизическими свойствами изучаемых гетероструктур, содержащих тонкие пленки ниобата лития или танталата лития, и предложенным обоснованием характера этой связи.

Практическая значимость работы определяется тем, что исследованное влияние полярных свойств и «мертвых» слоев на электрофизические свойства подобных друг другу гетероструктур, содержащих родственные сегнетоэлектрические материалы (ниобат лития и танталат лития), позволит проводить предварительный анализ свойств устройств, в которых в качестве функциональных частей используются тонкие сегнетоэлектрические пленки, нанесенные на кремниевые подложки.

Полученные в ходе выполнения работы результаты могут быть востребованы на предприятиях, занимающихся созданием изделий электронной техники, в научных и учебных центрах. Результаты диссертации С.И. Гудкова могут быть использованы в Московском государственном университете, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербургском государственном

электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, Воронежском государственном университете и др.

Достоверность результатов диссертационной работы определяется комплексным использованием современных экспериментальных методов исследования, таких как: атомно-силовая микроскопия, растровая электронная микроскопия, диэлектрическая спектроскопия, методы измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, а также применением современных средств обработки экспериментальных данных. Все основные выводы не противоречат представлениям физики конденсированного состояния вещества.

Основное содержание работы опубликовано в 7 статьях в рецензируемых печатных изданиях, включая 6 статей в журналах перечня ВАК.

Общая оценка диссертационной работы

В качестве замечаний по диссертационной работе можно отметить следующее:

1. В исследованных тонкопленочных гетероструктурах было бы логично использовать одинаковое металлическое покрытие.

2. В работе используются термины «естественная униполярность», «униполярность», «самопроизвольная поляризация», а также «вектор самопроизвольной поляризации» и «вектор самополяризации». Для обозначения явления и характеризующей его величины следовало использовать единые термины.

3. На рисунке 4.6 зависимость плотности тока от напряженности электрического поля $J(E^2)$ было бы уместнее представлять в виде зависимости плотности тока от электрического напряжения $J(U^2)$, так как плотность тока, ограниченного пространственным зарядом, в общем случае зависит от напряжения по квадратичному закону и обратно пропорциональна кубу толщины.

4. В параграфе 4.2 повторно приводится выражение (4.3) для зависимости плотности тока от напряженности электрического поля, характерное для прыжковой проводимости, хотя оно уже было представлено в пункте 1.4.2 первой главы (выражение (1.7)).

5. В диссертации принимается точка зрения, согласно которой «под «мертвым» слоем понимается образующаяся на интерфейсе область, либо не обладающая сегнетоэлектрическими свойствами, либо характеризующаяся непереключаемой или отсутствующей поляризацией, а также имеющая малое значение диэлектрической проницаемости в сравнении с объемом пленки». Установленную структуру этих слоев – слой SiO_2 для LN-структуры и слой диэлектрика системы $\text{Li}_2\text{O-Ta}_2\text{O}_5$ для LT-структуры хотелось бы видеть увязанной с приведенным определением.

В диссертации присутствуют опечатки, но они, как и приведенные выше замечания, не снижают общей положительной оценки работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация С.И. Гудкова выполнена на актуальную тему, изложена понятным языком, оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к

оформлению диссертаций, содержит достаточное для понимания количество иллюстраций и таблиц, в тексте присутствуют ссылки на публикации. Опубликованные по теме диссертации статьи достаточно полно отражают содержание работы.

Диссертация С.И. Гудкова «Диэлектрический отклик и электропроводность гетероструктур на основе тонких плёнок ниобата лития и танталата лития, сформированных на кремниевых подложках» соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния (отрасль науки – физико-математические) и требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 18.03.2023), а ее автор Сергей Игоревич Гудков заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Отзыв, подготовленный доктором физико-математических наук, профессором кафедры экспериментальной физики Александром Степановичем Сидоркиным, обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры экспериментальной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» 26 октября 2023 года, протокол № 3.

Заведующий кафедрой экспериментальной физики
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Воронежский государственный университет»,
доктор физико-математических наук, профессор
+7(919)1824460, drozhdin@phys.vsu.ru

Сергей Николаевич Дрождин

Согласен на обработку моих персональных данных, необходимую при проведении процедуры защиты диссертации, и размещение их в сети «Интернет»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Воронежский государственный университет»
Адрес: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1
Телефон: +7 (473) 220-75-21
E-mail: office@main.vsu.ru