

Гудков Сергей Игоревич

**ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ
ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК НИОБАТА
ЛИТИЯ И ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ, СФОРМИРОВАННЫХ НА
КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре физики конденсированного состояния федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Солнышкин Александр Валентинович

Официальные
оппоненты: **Шерстюк Наталия Эдуардовна,**
доктор физико-математических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический
университет», профессор кафедры
нанoeлектроники

Сенкевич Станислав Викторович,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
старший научный сотрудник лаборатории физики
сегнетоэлектричества и магнетизма

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный университет»

Защита состоится «24» ноября 2023 г. в 12 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.411.03 при ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» по адресу: 170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Тверского государственного университета по адресу: 170100, г. Тверь, ул. Трехсвятская, д. 16/31 и в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» <https://dissertations.tversu.ru>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Е.В. Барабанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень её разработанности. В настоящее время тонкопленочные сегнетоэлектрические гетероструктуры широко применяются в качестве функциональных элементов различного типа преобразователей и сенсорных устройств. К основным областям практического приложения можно отнести их использование в микроэлектромеханических системах (MEMS), СВЧ-приборах, различных оптических устройствах, лазерной технике, акусто- и оптоэлектронике. Немаловажным также является возможность применения тонкопленочных сегнетоэлектриков в качестве элементов сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти с произвольным доступом (FeRAM).

В последнее время в электронной промышленности наблюдается тенденция к интеграции кремниевых технологий с сегнетоэлектриками и созданию пленочных и тонкопленочных сегнетоэлектрических структур на кремниевых подложках. При этом свойства объемных материалов могут значительно отличаться от свойств пленок. Влиять на электрофизические свойства пленок могут, в частности, условия нанесения и роста пленочной структуры, состав и качество подложки, материал электродов. Отличие свойств тонкопленочных структур от свойств объемных материалов и влияние на их характеристики различных факторов до сих пор недостаточно изучены.

Развитие микроэлектроники, миниатюризация в приборостроении влекут за собой необходимость в создании и исследовании микро- и наноразмерных структур на основе сегнетоэлектриков – ниобата лития (LiNbO_3 , LN) и танталата лития (LiTaO_3 , LT). Это связано с важностью данных материалов для практического применения – в частности в электрооптике и пирозлектрических датчиках. При этом перспективным остается применение пленочных структур на основе ниобата лития и танталата лития для FeRAM [1]. Это обуславливает необходимость интеграции ниобата лития и танталата лития с кремниевыми технологиями и исследования структур металл/сегнетоэлектрик/полупроводник (МСЭП-структура). Причем, несмотря на то что LiNbO_3 и LiTaO_3 принадлежат к одному семейству, оптимальные условия изготовления пленочных структур на основе этих сегнетоэлектриков могут значительно отличаться, что приводит к возможным различиям в конечных свойствах пленок, не наблюдаемым для объемных материалов.

Если говорить об объемном материале, в настоящее время наиболее изученным из двух соединений остается ниобат лития. Это связано с трудностями производства танталата лития. Тенденция сохраняется и в области исследования пленочных структур на основе этих сегнетоэлектриков. Интерес вызывает доменная структура тонких пленок исследуемых сегнетоэлектриков [2,3]: в частности, выяснено, что различие

формы и кинетики роста изолированных доменов в пленках ниобата лития, сформированных на изоляторе, и пластинах LN с неполярной ориентацией обусловлено повышенной объемной проводимостью пленок [4]. Пироэлектрические свойства тонких пленок танталата лития изучены более широко [5–7], чем соответствующие свойства тонких пленок ниобата лития [8,9]. При этом остается актуальным получение поликристаллических тонких пленок данных сегнетоэлектриков с высокими значениями пироэлектрического коэффициента для использования в пироэлектрических датчиках. Одним из важных направлений в исследовании структур, содержащих тонкие пленки, является исследование их проводящих свойств. Изучение электропроводности является значимой составляющей анализа свойств структур на основе тонких пленок из-за того, что помещение соответствующих структур в электрическое поле, а также изменение параметров поля меняет характеристики материала: кроме непосредственного влияния поля на электрооптический эффект, от параметров поля могут зависеть диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, пироэлектрический коэффициент структур. В частности, изучение электропроводности является важным при создании FeRAM на основе тонких сегнетоэлектрических пленок из-за токов утечки, которые могут оказывать на память негативное воздействие с точки зрения надежности, тока помех чтения и энергопотребления [10]. В контексте исследования электропроводности, а также связанных с ней механизмов электрической проводимости и барьерных явлений в тонкопленочных структурах на основе ниобата лития и танталата лития ситуация отличается от существующей в области изучения пироэлектрической активности: в литературе практически отсутствуют соответствующие сведения, относящиеся к структурам на основе тонких пленок танталата лития, при том что соответствующие данные для структур на основе тонких пленок ниобата лития представлены в работах ряда авторов [11,12]. Зачастую также исследования проводятся только для структур с одним из этих сегнетоэлектриков без сравнения со структурами, содержащими родственными материал. Сведения об исследовании «мертвого» слоя на интерфейсе сегнетоэлектрик/полупроводник для структур на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития в литературе отсутствуют. В связи с этим представляет интерес сравнительное исследование свойств тонких пленок ниобата лития и танталата лития, нанесенных на кремниевые подложки.

Целью настоящей работы является установление взаимосвязи электрофизических характеристик структур металл/сегнетоэлектрик/полупроводник на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития, сформированных на кремниевых подложках, и их сравнительный анализ.

Для достижения поставленной цели сформулированы основные **задачи исследования**:

- изучение пирозлектрических свойств МСЭП-структур на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития динамическим методом, характеристика естественной униполярности, и оценка величины пирозлектрического коэффициента сегнетоэлектрических пленок;

- исследование зависимости тока утечки от напряжения смещения для МСЭП-структур на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития с целью определения основных механизмов транспорта носителей заряда в изучаемых структурах;

- определение величины потенциального барьера, существующего на интерфейсе, с целью оценки его вклада в электропроводность и влияния на него естественной униполярности для МСЭП-структур на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития;

- изучение зависимости диэлектрических характеристик МСЭП-структур на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития от напряжения смещения и частоты внешнего электрического поля для расчета параметров «мертвого» слоя на границе раздела сегнетоэлектрик/полупроводник, и оценка его вклада в электрофизические свойства тонкопленочных МСЭП-структур на основе ниобата лития и танталата лития.

Объектом исследования в настоящей работе служили структуры металл/сегнетоэлектрик/полупроводник с тонкопленочным сегнетоэлектрическим слоем ниобата лития и танталата лития, изготовленные в лаборатории физики оксидных сегнетоэлектриков НИТУ МИСИС. Нанесение сегнетоэлектрического тонкого слоя на кремниевые подложки (Si) осуществлялось методом высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления. Синтезированные структуры подвергались постростовому отжигу. Толщина сегнетоэлектрического слоя составляла 200 нм. Для осуществления электрического контакта на свободную поверхность тонких пленок наносились металлические электроды: для пленок ниобата лития медные (Cu), для пленок танталата лития серебряные (Ag).

Научная новизна. В работе проведен комплексный анализ электрофизических свойств структур металл/сегнетоэлектрик/полупроводник на основе тонкопленочного ниобата лития и танталата лития с учетом униполярности, наличия «мертвого» слоя и потенциального барьера.

Впервые выполнен расчет параметров «мертвого» слоя, существующего на интерфейсе сегнетоэлектрик/полупроводник, для структур металл/сегнетоэлектрик/полупроводник с тонким слоем ниобата лития и танталата лития, а также сделано предположение о возможном влиянии «мертвого» слоя на естественную униполярность структур.

Впервые проведен сравнительный анализ механизмов электрической проводимости и величины потенциального барьера в структурах металл/сегнетоэлектрик/полупроводник на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития, а также установлено, что причиной различия высоты потенциального барьера в исследуемых структурах является антипараллельное направление вектора поляризации в тонкопленочном сегнетоэлектрическом слое.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования обусловлена возможностью использования тонких пленок ниобата лития и танталата лития, синтезированных на кремниевых подложках, в оптоэлектронике, для пиродетекторов, в качестве функциональных частей FeRAM. Полученные в работе данные о взаимном влиянии различных характеристик МСЭП-структур с тонким слоем LN и LT позволяют выполнять расчеты параметров структур на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития, а также могут быть использованы для анализа работы устройств, содержащих сегнетоэлектрические слои.

Методология и методы исследования. В работе использовались современные методы исследования и анализа экспериментальных результатов, в частности динамический метод исследования пироэлектрического эффекта, методы вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, диэлектрическая спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, атомно-силовая микроскопия, растровая электронная микроскопия.

Положения, выносимые на защиту:

1. Исследуемые МСЭП-структуры с тонкопленочным слоем ниобата лития и танталата лития без предварительной поляризации демонстрируют проявление пироэлектрической активности, что свидетельствует о естественной униполярности тонкопленочного сегнетоэлектрического слоя. Наличие униполярности обусловлено формированием приповерхностных слоев с особыми свойствами на интерфейсе сегнетоэлектрик/полупроводник.

2. Нелинейность вольт-амперных характеристик связана со следующими механизмами проводимости: для пропускного направления – ток, ограниченный пространственным зарядом; при обратном направлении смещения для МСЭП-структуры на основе ниобата лития имеют место прыжковая проводимость и эмиссия Шоттки, а для МСЭП-структуры на основе танталата лития – прыжковая проводимость и ток, ограниченный пространственным зарядом.

3. Основной вклад в транспорт носителей заряда вносит барьер на границе раздела металл/сегнетоэлектрик вследствие его большей высоты по сравнению с барьером на гетеропереходе сегнетоэлектрик/полупроводник.

4. Существование значительной дисперсии диэлектрических характеристик в диапазоне частот $25 - 10^6$ Гц обусловлено наличием «мертвого» слоя на интерфейсе сегнетоэлектрик/полупроводник.

Степень достоверности результатов, представленных в диссертационной работе, обеспечивается проведением экспериментов на современном научном оборудовании; использованием апробированных расчетных методов и комплекса взаимодополняющих экспериментальных и теоретических методик; воспроизводимостью результатов; апробацией на международных конференциях; публикациями в рецензируемых изданиях.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях: European Conference on Applications of Polar Dielectrics (ЕСAPD-2018) (25 – 28 Июля 2018 г., Москва); XIV Международная конференция «Физика диэлектриков» (ДИЭЛЕКТРИКИ-2017) (29 мая – 2 июня 2017 г., Санкт-Петербург); Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2016) (21 – 25 ноября 2016 г., Москва).

Личный вклад автора. Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии, за исключением синтеза образцов и рентгеноструктурного анализа. Совместно с научным руководителем – д.ф.-м.н. А.В. Солнышкиным – проводились выбор темы, постановка цели и задач исследования и обсуждение полученных результатов. Автором лично выполнены представленные в работе эксперименты по исследованию пироэффекта, электропроводности и диэлектрических характеристик, проведены расчеты и анализ полученных результатов. Автор принимал непосредственное участие в написании статей по теме диссертации. Изготовление исследуемых структур осуществлялось Р.Н. Жуковым – научным сотрудником лаборатории физики оксидных сегнетоэлектриков НИТУ МИСИС – и к.ф.-м.н. Д.А. Киселевым – заведующим лабораторией физики оксидных сегнетоэлектриков НИТУ МИСИС. Рентгеноструктурный анализ исследуемых структур проводился М.И. Вороновой – научным сотрудником лаборатории физики оксидных сегнетоэлектриков НИТУ МИСИС. Изучение топографии поверхности с использованием атомно-силовой микроскопии осуществлялось совместно с к.ф.-м.н. Е.М. Семеновой – доцентом кафедры физики конденсированного состояния ТвГУ. Исследование микроструктуры образцов с помощью растровой электронной микроскопии и исследование элементного химического состава проведены к.ф.-м.н. А.И. Ивановой – доцентом кафедры прикладной физики ТвГУ – при участии автора.

Основное содержание диссертации опубликовано в 7 работах, из которых 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России и индексируемых в международных базах данных WoS и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка использованных источников и списка публикаций

по теме диссертации. Работа содержит 130 страниц, 38 рисунков, 8 таблиц, список использованных источников из 170 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень её разработанности, сформулированы основная цель и задачи исследования, определен объект исследований, продемонстрированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о степени достоверности результатов, апробации работы, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертации.

Первая глава является обзорной. В ней изложены основные сведения об исследуемых сегнетоэлектриках – ниобате лития и танталате лития. Рассмотрены понятие тонкой пленки и методы изготовления тонких пленок. Описаны физические основы пирозлектрического эффекта в сегнетоэлектриках и пирозлектрические свойства тонких пленок ниобата лития и танталата лития. Представлены сведения о механизмах электрической проводимости, барьерных явлениях, диэлектрической дисперсии и «мертвом» слое в тонкопленочных структурах.

Вторая глава является методической. В ней представлены данные об исследуемых структурах, используемых методиках эксперимента и обработки экспериментальных данных.

Объектом исследования являлись структуры металл/сегнетоэлектрик/полупроводник, содержащие тонкопленочный сегнетоэлектрический слой ниобата лития или танталата лития. Поликристаллические тонкие пленки ниобата лития и танталата лития наносились на кремниевые подложки *p*-типа (*p*-Si) методом высокочастотного магнетронного распыления. Толщина сегнетоэлектрического слоя (*d*) составляет 200 нм. После роста сегнетоэлектрического слоя образцы подвергались отжигу при температуре 700 °С. На свободную поверхность пленок наносились металлические электроды: медные диаметром $2,45 \pm 0,21$ мм для ниобата лития, серебряные диаметром $4,5 \pm 0,3$ мм для танталата лития. Таким образом, образцы представляли собой МСЭП-структуры Cu/LiNbO₃/Si и Ag/LiTaO₃/Si. Для осуществления электрического контакта между измерительной аппаратурой и кремниевой подложкой свободный участок кремниевой пластины металлизировался.

Изготовителями пленочных структур проведен рентгеноструктурный анализ образцов с помощью дифрактометров Bede D1 System (Bede Scientific Instruments, Ltd., Великобритания) и ДРОН 3. Кристаллическая структура в пленках наблюдалась после их отжига. В пленке ниобата лития обнаружены фазы LiNbO₃ и LiNb₃O₈. При этом отжиг увеличивает долю кристаллитов

LiNbO_3 , кристаллографическое направление $[001]$ которых перпендикулярно поверхности пленки. Спонтанная поляризация пленки LiTaO_3 направлена вдоль кристаллографического направления $[001]$, при этом существуют как внеплоскостная, так и плоскостная составляющие спонтанной поляризации.

Исследование топографии пленок с использованием сканирующего зондового микроскопа SolverNext (ООО «НТ-МДТ СИ», Российская Федерация) в режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ) показало, что изучаемые пленки имеют структуру, состоящую из кристаллических зерен (Рисунок 1). Для LiNbO_3 характерен размер зерен от 100 до 300 нм и средняя шероховатость ~ 17 нм. Для LiTaO_3 выделяются островки кристаллитов размером 3–4 мкм, а средняя шероховатость составляет ~ 22 нм.

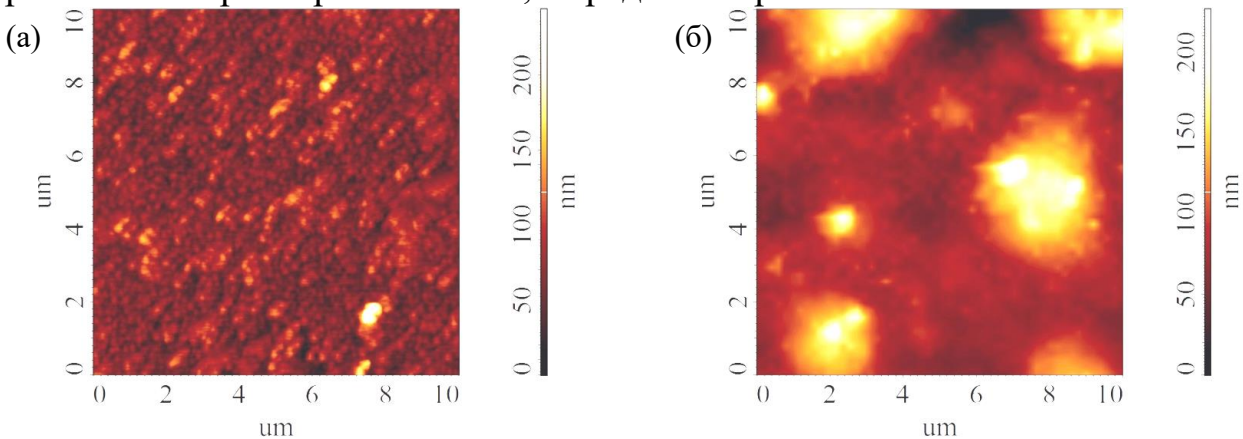


Рисунок 1 – Изображения АСМ поверхности тонких пленок LiNbO_3 (а) и LiTaO_3 (б)

Изучение пирозлектрической активности структур осуществлялось с использованием динамического метода исследования пирозэффекта. Интегральный пирозлектрический отклик с поверхности электрода определялся при периодическом нагреве электрода лазерным излучением, модулированным импульсами прямоугольной формы. Длина волны лазерного излучения – 980 нм, мощность – 220 мВт, частота модуляции варьировалась в интервале 1 Гц – 1 кГц.

Для исследования зависимости плотности тока (вольт-ампертные характеристики (ВАХ)) и электрической емкости от приложенного к образцу напряжения смещения, а также зависимости диэлектрических характеристик структур от частоты внешнего электрического сигнала использовался измеритель иммитанса E7-20. Напряжение (U) и проекция вектора напряженности электрического поля на направление, перпендикулярное поверхности пленки, считаются положительными при подключении к верхнему электроду положительного потенциала и отрицательными при обратной полярности.

В главе также описаны методика определения механизмов проводимости, методики определения эффективной высоты потенциального барьера (φ_e), коэффициента идеальности (n_{id} , для идеального диода этот коэффициент равен единице; в случае реальных диодов его значение

может быть больше единицы) и последовательного сопротивления диода (R_S). Представлены методика расчета параметров «мертвого» слоя, существующего на интерфейсе сегнетоэлектрик/полупроводник, с использованием схем замещения, а также методика оценки среднеквадратичной погрешности.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты исследования. Установлено, что образцы характеризуются естественной униполярностью, о чем свидетельствует наличие электрического отклика на воздействие модулированного лазерного излучения (Рисунок 2). Естественная униполярность (или самопроизвольная поляризация) в пленочных структурах – это эффект, заключающийся в самопроизвольном возникновении макроскопической поляризации в сегнетоэлектрических пленках при формировании пленочной структуры [13].

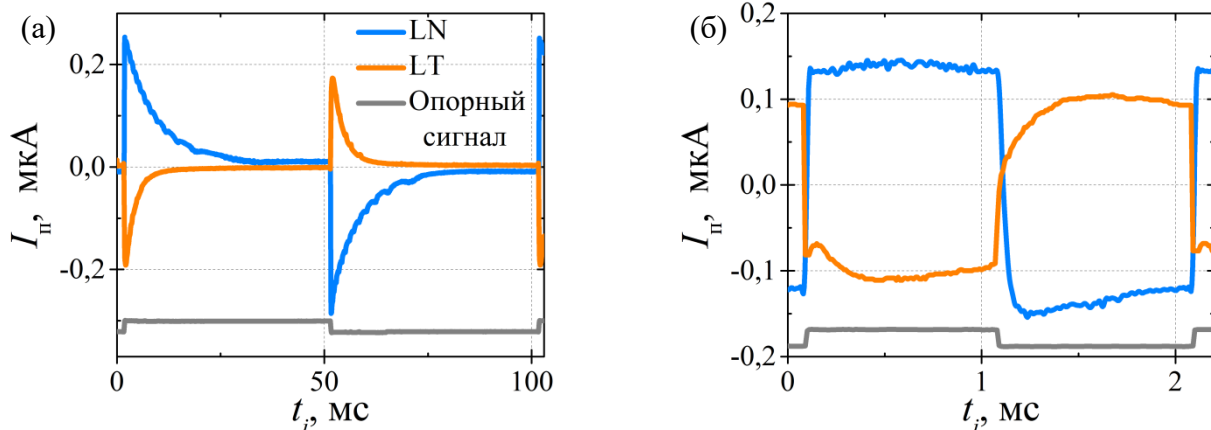


Рисунок 2 – Электрический отклик МСЭП-структур на излучение, модулированное с частотой: а) 10 Гц, б) 500 Гц; I_p – пироэлектрический ток, t_i – время

Из рисунка 2 видно, что при малых частотах модуляции теплового потока для исследуемых структур наблюдается нестационарная компонента (начальный выброс) тока с последующей её релаксацией до некоторого малого стационарного значения. Это соответствует режиму одиночного импульса, при котором тепловая волна, генерируемая поглощенным излучением, проходит через всю структуру, уходит в подложку, а температура пленки перестает меняться.

С увеличением частоты модуляции происходит переход к режиму постоянного нагрева, когда средняя температура образца в течение как светового, так и темного участков изменяется по линейному закону: отклик имеет только стационарную компоненту тока. Видно, что с увеличением частоты модуляции для обеих структур наблюдается уменьшение амплитудного значения электрического тока примерно в два раза, а также форма сигнала при высоких частотах модуляции стремится к форме опорного сигнала. Это свидетельствует о пироэлектрической природе отклика.

По осциллограммам пироэлектрического отклика установлено направление вектора самопроизвольной поляризации в образцах:

для пленок LN пироотклик совпадает по фазе с опорным сигналом, что свидетельствует о направлении вектора поляризации от верхнего электрода к подложке; для пленок LT пироотклик находится в противофазе с модулированным сигналом – вектор поляризации направлен от подложки к верхнему электроду.

Наличие в тонких пленках естественной униполярности (самополяризации) указывает на то, что при росте пленок формируется объемный заряд, определяющий поляризацию сегнетоэлектрического слоя. Существование подобных слоев и естественная униполярность пленок оказывают влияние на процессы переноса заряда в гетероструктурах и их диэлектрический отклик.

Учитывая тот факт, что структуры на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития могут быть использованы в качестве функциональных элементов пиродатчиков и запоминающих устройств, важным является исследование отклика пленочных структур на внешнее электрическое поле, в частности исследование токов утечки. Экспериментальные зависимости плотности тока (J) от величины напряженности внешнего электрического поля (E) продемонстрированы на рисунке 3.

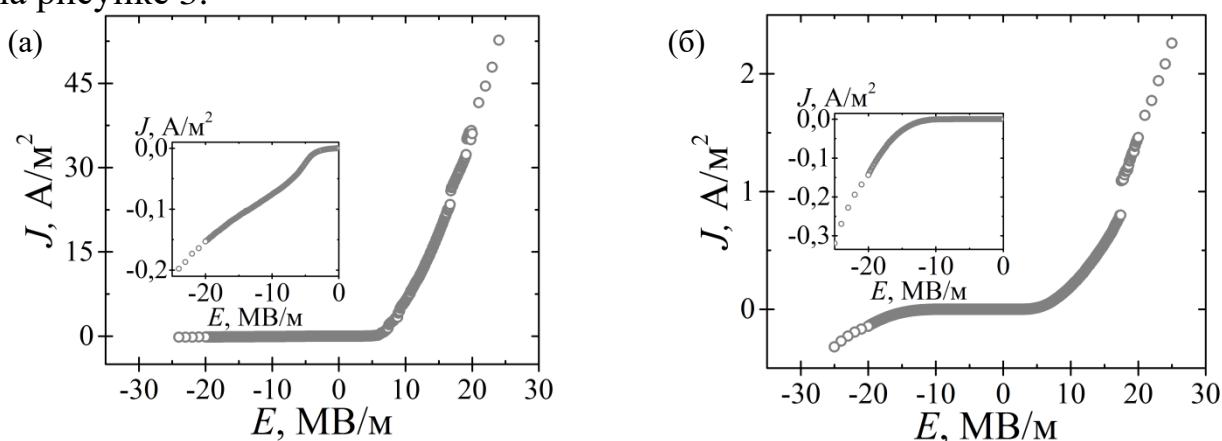


Рисунок 3 – ВАХ для МСЭП-структур на основе тонких пленок ниобата лития (а) и танталата лития (б); вставка – область $E < 0$ в увеличенном масштабе

Из рисунка 3 видно, что ВАХ имеют диодный характер. Для МСЭП-структур на основе тонкопленочного $LiNbO_3$ слабое возрастание плотности тока по закону, близкому к линейному, наблюдается до напряженности поля $3,0$ MV/m в пропускном направлении и до $1,1$ MV/m при обратном смещении; для гетероструктур на основе LT – до напряженности поля $1,9$ MV/m в пропускном направлении и до $7,3$ MV/m при обратном смещении. Видно, что структура на основе танталата лития обладает меньшей электропроводностью в сравнении со структурой на основе ниобата лития. Значения удельной электропроводности (σ), рассчитанные при малых значениях напряженности электрического поля, представлены в таблице 1 (σ_+

и σ_- – удельная электропроводность в пропускном и запирающем направлениях соответственно).

Таблица 1 – Значения удельной электропроводности, рассчитанные при малых значениях напряженности электрического поля

| Структура | σ_+ , нСм/м | σ_- , нСм/м |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Cu/LiNbO ₃ /Si | $1,02 \pm 0,18$ | $0,79 \pm 0,14$ |
| Ag/LiTaO ₃ /Si | $(4,9 \pm 1,0) \cdot 10^{-3}$ | $(2,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ |

Объемный заряд, о наличии которого свидетельствует естественная униполярность пленок, может влиять на то, как меняются диэлектрические характеристики структур металл/сегнетоэлектрик/полупроводник при изменении параметров электрического поля. В связи с этим в работе изучено влияние частоты внешнего электрического поля на диэлектрические характеристики структур. Зависимости электрической емкости (C) от частоты измерительного сигнала (f) представлены на рисунке 4.

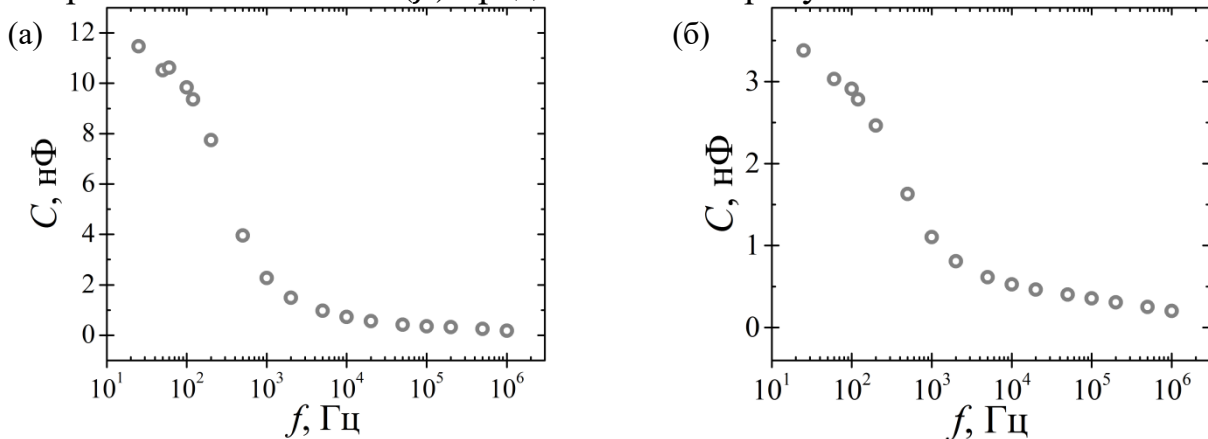


Рисунок 4 – Частотные зависимости электрической емкости в полулогарифмическом масштабе для МСЭП-структур на основе тонких пленок LiNbO₃ (а) и LiTaO₃ (б)

Из рисунка 4 видно, что для обеих структур присутствует ярко выраженная диэлектрическая дисперсия. Наиболее существенное уменьшение величины емкости МСЭП-структуры на основе тонкой пленки ниобата лития наблюдается в интервале частот от 25 Гц до 1 кГц, а структуры на основе тонкой пленки танталата лития – в интервале от 25 Гц до 2 кГц. Величина низкочастотной диэлектрической проницаемости, рассчитанная для МСЭП-структуры на основе тонкопленочного ниобата лития, составляет 55 ± 9 ; для гетероструктуры на основе тонкой пленки танталата лития – $4,8 \pm 0,6$.

В четвертой главе проведен сравнительный анализ экспериментальных данных.

На основе данных, полученных из эксперимента по исследованию пирозлектрического эффекта с использованием динамического метода, проведена оценка величины пирозлектрического коэффициента. Результаты

расчетов и литературные данные для объемных кристаллов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные и табличные значения пирозлектрического коэффициента материалов

| Структура | p , мкКл/(м ² ·К) | |
|---------------------------|--------------------------------|--|
| | Рассчитанное значение | Табличное значение для соответствующего объемного сегнетоэлектрика |
| Cu/LiNbO ₃ /Si | 15 | 93,2 – 103,9 [14,15] |
| Ag/LiTaO ₃ /Si | 64 | 180 [16] |

Значения, полученные для поликристаллических пленок, сравнимы по порядку величины с аналогичными для объемного материала, что положительно характеризует возможность применения пленок в пирозлектрических приложениях. Меньшие значения пирозлектрического коэффициента в сравнении с объемными кристаллами могут быть связаны с тем, что вектор спонтанной поляризации в зернах или в части зерен не перпендикулярен поверхности пленки, а также суммарный электрический момент в части зерен может быть равен нулю.

Естественная униполярность сегнетоэлектрической пленки оказывает влияние на перенос заряда в сегнетоэлектрической гетероструктуре. По этой причине проведен анализ электрической проводимости исследуемых МСЭП-структур на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития.

Отклонение ВАХ от линейного закона (Рисунок 3) и резкий рост плотности тока можно объяснить с точки зрения различных механизмов электрической проводимости. Для определения основных механизмов проводимости ВАХ были представлены в координатах, позволяющих выделить линейные участки, соответствующие тому или иному механизму проводимости. Превалирующим механизмом проводимости для обеих гетероструктур в пропускном направлении является ток, ограниченный пространственным зарядом (ТОПЗ). Об этом свидетельствует наличие нескольких близких к линейным участков на ВАХ в логарифмическом масштабе (Рисунок 5).

Участок 1 на приведенных характеристиках соответствует участку ВАХ в линейном масштабе при малых полях, который лучше всего аппроксимируется прямой. При $U = U_L$ происходит переход к ловушечному ТОПЗ (участок 2). Здесь плотность тока имеет меньшие значения, чем при безловушечном ТОПЗ из-за процессов захвата и освобождения носителей заряда ловушками [17]. При достижении напряжения полного заполнения ловушек ($U_{ПЗЛ}$) концентрация инжектированных из электрода носителей превышает плотность ловушек в диэлектрике и плотность тока начинает быстро возрастать (участок 3). Дальнейшее увеличение напряжения

приводит к безловушечному ТОПЗ (участок 4). С помощью величины $U_{\text{ПЗЛ}}$ можно рассчитать плотность ловушек (N_T) из выражения [18]:

$$U_{\text{ПЗЛ}} = \frac{qN_T d^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_s}, \quad (1)$$

где q – заряд электрона, ε_0 – электрическая постоянная, ε_s – статическая диэлектрическая проницаемость. Для структуры на основе LN $N_T \approx 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при условии, что $\varepsilon_s \approx 28,7$ [19], $U_{\text{ПЗЛ}} \approx 0,82 \text{ В}$; для структуры на основе LT $N_T \approx 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при условии, что $\varepsilon_s \approx 43,4$ [19], $U_{\text{ПЗЛ}} \approx 0,50 \text{ В}$.

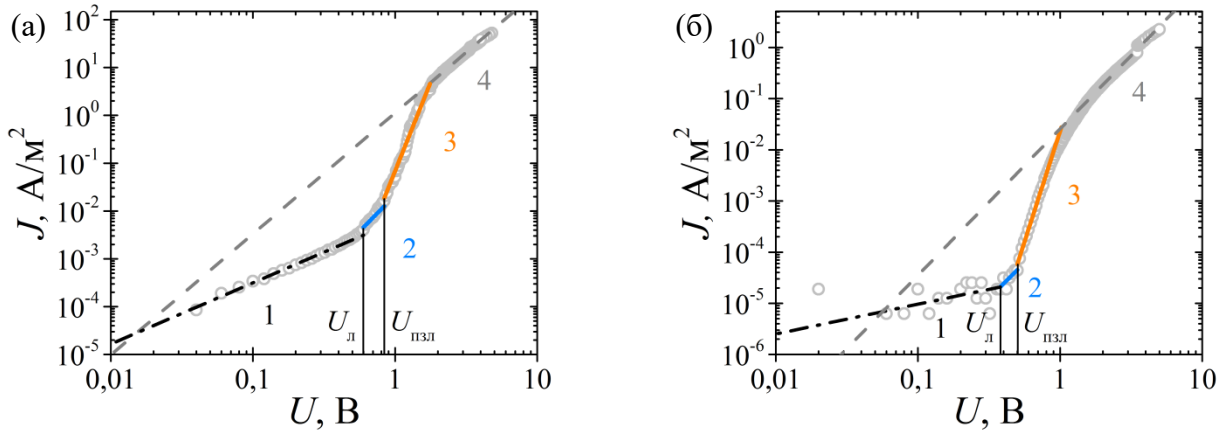


Рисунок 5 – ВАХ в логарифмическом масштабе в пропускном направлении для МСЭП-структур на основе тонких пленок ниобата лития (а) и танталата лития (б)

При обратном смещении для обеих структур обнаруживается наличие линейного участка на зависимости $\ln J(E)$ (Рисунок 6 а, б). Это свидетельствует о том, что при обратном смещении для обеих МСЭП-структур присутствует интервал напряжений, где основным механизмом переноса заряда является прыжковая проводимость. Из наклона прямой на графике $\ln J(E)$ можно определить среднее расстояние прыжка $a_{\text{п}}$, что также соответствует среднему расстоянию между ловушками. С другой стороны, эту величину можно определить из условия, что $a_{\text{п}}^3 = N_T^{-1}$. Для структуры на основе тонкопленочного ниобата лития значение, найденное первым способом, составляет $\sim 21 \text{ нм}$, а вторым – $\sim 24 \text{ нм}$; для танталата лития – $\sim 25 \text{ нм}$ и $\sim 26 \text{ нм}$ соответственно. Увеличение напряженности электрического поля при обратном смещении приводит к доминированию эмиссии Шоттки в случае МСЭП-структуры на основе тонкой пленки ниобата лития (Рисунок 6 в) и ТОПЗ в случае МСЭП-структуры на основе тонкой пленки танталата лития (Рисунок 6 г).

Кроме различных механизмов проводимости на электропроводность МСЭП-структур оказывают влияние потенциальные барьеры на интерфейсах. О наличии потенциального барьера в исследуемых структурах свидетельствует несимметричный характер ВАХ. Поэтому в работе выполнен расчет величины потенциального барьера. Расчет осуществлялся на основе

анализа ВАХ с помощью методов Родерика [20], Чуна-Чуна [21], Норде [22] и Болина [23]. Результаты отображены в таблице 3.

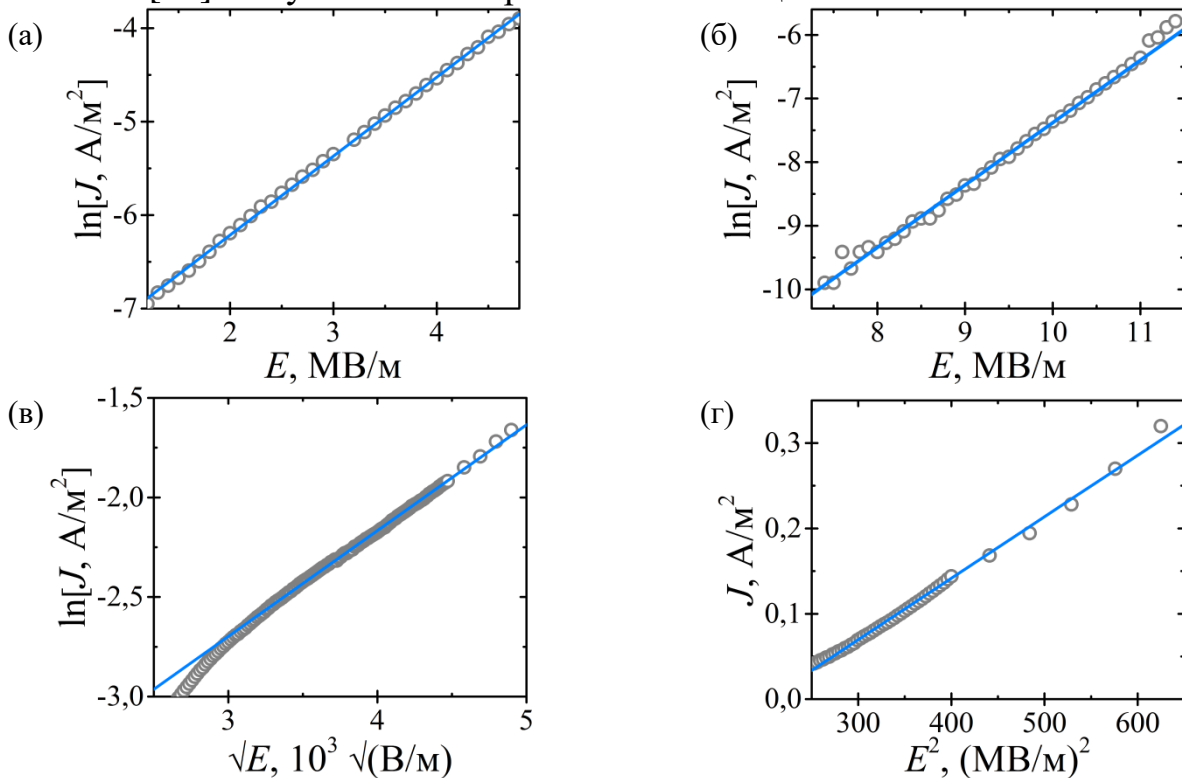


Рисунок 6 – ВАХ для исследуемых структур: зависимости $\ln J(E)$, характерные прыжковой проводимости, для МСЭП-структур на основе тонкопленочного LiNbO_3 (а) и LiTaO_3 (б); зависимость $\ln J(\sqrt{E})$, характерная эмиссии Шоттки, для структуры на основе LiNbO_3 (в); зависимость $J(E^2)$, характерная ТОПЗ, для структуры на основе LiTaO_3 (г)

Таблица 3 – Результаты расчетов потенциального барьера, коэффициента идеальности и сопротивления R_s для структур

| Метод | Cu/LiNbO ₃ /Si | | | Ag/LiTaO ₃ /Si | | |
|-----------|---------------------------|----------|-------------|---------------------------|----------|-------------|
| | φ_e , эВ | n_{id} | R_s , МОм | φ_e , эВ | n_{id} | R_s , МОм |
| Родерика | 0,84 | 1,2 | – | 1,01 | 2,8 | – |
| Чуна-Чуна | 0,80 | 3,1 | 22–25 | 1,02 | 2,7 | 2,6–2,8 |
| Норде | 0,83 | – | 23 | 1,33 | – | 13 |
| Болина | 0,81 | 1,7 | 22–23 | 1,01–1,02 | 2,6–2,7 | 1,0–2,4 |

Из таблицы 3 видно, что эффективная величина потенциального барьера для МСЭП-структуры на основе танталата лития выше, чем величина барьера для структуры на основе ниобата лития. Учитывая то, что ниобат лития и танталат лития являются родственными материалами и пленки сформированы на одинаковых подложках, при этом работы выхода для металлических электродов (Cu и Ag) имеют близкие значения, наиболее вероятно, что различие в величине потенциального барьера связано с антипараллельным направлением вектора самопроизвольной поляризации в сегнетоэлектрическом слое. Оценка вклада самопроизвольной поляризации

в величину барьера, проведенная согласно [24], показала, что для МСЭП-структуры на основе тонкой пленки LiNbO_3 направленность вектора самопроизвольной поляризации от верхнего электрода к подложке приводит к уменьшению эффективной величины барьера на $\sim 0,15$ эВ, а для МСЭП-структуры на основе тонкой пленки LiTaO_3 направленность от подложки к верхнему электроду – к увеличению эффективной высоты потенциального барьера на $\sim 0,13$ эВ.

Теоретическая оценка высоты потенциальных барьеров на интерфейсах и анализ ВАХ показали, что основной вклад в рассчитанную высоту барьера вносит интерфейс металл/сегнетоэлектрик (Рисунок 7). При контакте металла и сегнетоэлектрика на интерфейсе возникает барьер типа Шоттки, высота которого определяется работой выхода электрона из металла, а также электронным сродством сегнетоэлектрика и положением уровня Ферми в нем. Вблизи гетероперехода сегнетоэлектрик/полупроводник искривление зон в сегнетоэлектрике обусловлено электронным сродством материалов и положением уровня Ферми до контакта. Искривление зон со стороны пленки на гетеропереходе мало, и основной вклад в электропроводность дает барьер на границе раздела металл/сегнетоэлектрик.

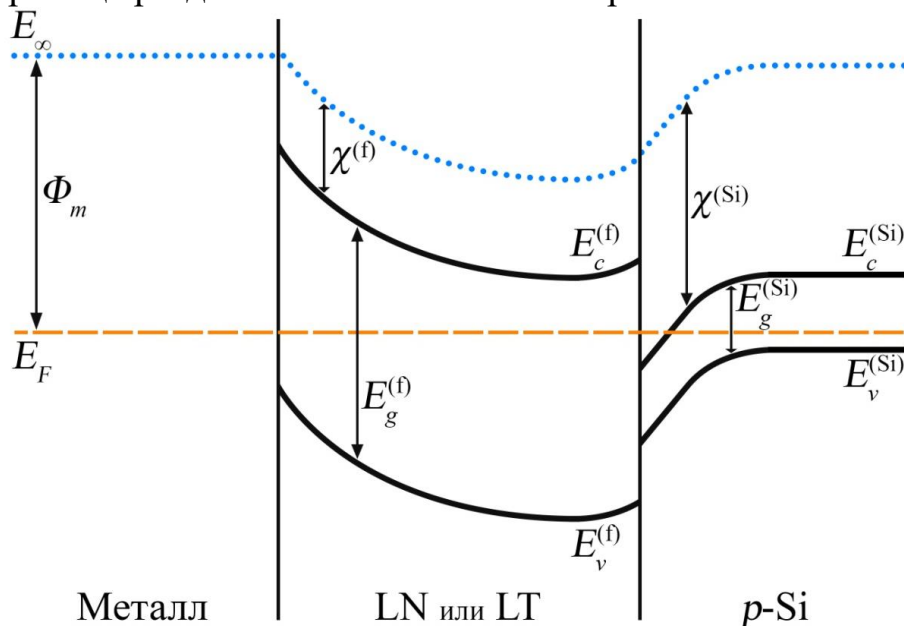


Рисунок 7 – Зонная диаграмма исследуемых МСЭП-структур: E_∞ – энергия электрона в вакууме, Φ_m – работа выхода для металла, E_F – уровень Ферми, χ – электронное сродство, E_g – ширина запрещенной зоны, E_c – энергия, соответствующая дну зоны проводимости, E_v – энергия, соответствующая потолку валентной зоны

Таким образом, основной причиной различия величин потенциального барьера является естественная униполярность пленок. Она также свидетельствует о существовании области объемного заряда в МСЭП-структуре. Одним из возможных мест локализации объемного заряда может быть «мертвый» слой на границе раздела сегнетоэлектрик/полупроводник. 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 [25].

Наличие «мертвого» слоя может являться фактором существования значительной диэлектрической дисперсии в МСЭП-структурах, а также причиной различия величины диэлектрической проницаемости пленочной структуры и объемного материала. В связи с этим в работе проведено моделирование параметров «мертвого» слоя с использованием схемы замещения, представленной на рисунке 8. На рисунке R_f и C_f – электрическое сопротивление и электрическая емкость сегнетоэлектрической пленки соответственно, R_{dl} и C_{dl} – электрическое сопротивление и электрическая емкость «мертвого» слоя соответственно, R_e – сопротивление, характеризующее паразитные параметры, в том числе сопротивление электродов, границ зерен, объемные последовательные сопротивления, несовершенство контактов измерительных зондов с электродами, паразитные характеристики, вносимые кабелями.

Рисунок 8 – Схема замещения для пленочной гетероструктуры

Моделирование осуществлялось посредством приближения теоретических зависимостей электрической емкости C_m от частоты к экспериментально полученным частотным зависимостям емкости. Результаты моделирования приведены на рисунке 9.

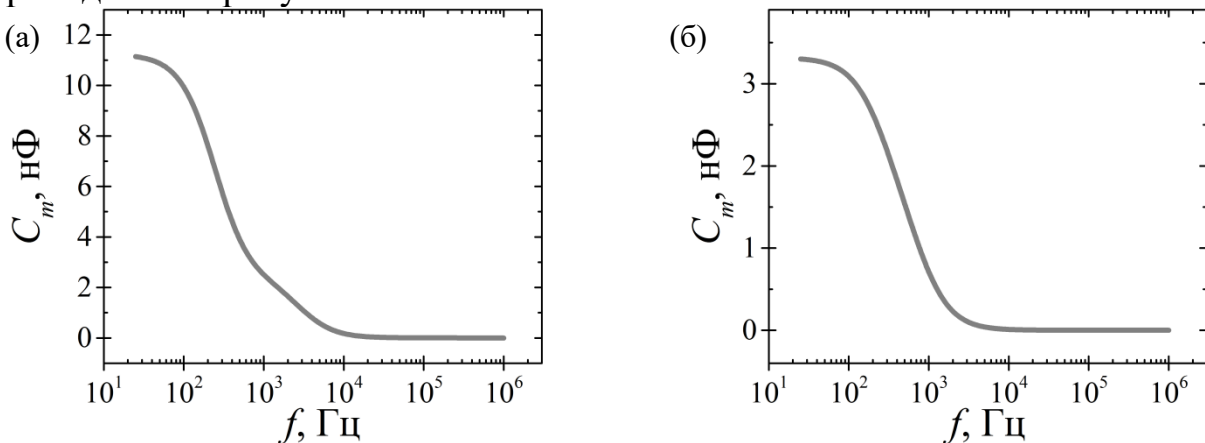


Рисунок 9 – Теоретические зависимости электрической емкости от частоты для МСЭП-структур на основе тонких пленок LiNbO_3 (а) и LiTaO_3 (б)

При моделировании диэлектрическая проницаемость и площадь электрода для структур на основе ниобата лития принимались равными 28,7 и 4,7 мм^2 соответственно, для структур на основе танталата лития – 43,4 и 15,9 мм^2 соответственно. Значения варьируемых параметров представлены в таблице 4. Здесь σ_f – удельная электропроводность собственно пленки, ε_{dl} –

диэлектрическая проницаемость «мертвого» слоя, σ_{dl} – удельная электропроводность «мертвого» слоя, t – его толщина.

Для МСЭП-структуры на основе тонкой пленки ниобата лития предполагаемым «мертвым» слоем может быть тонкий слой диоксида кремния (SiO_2): об этом свидетельствует близость удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости к литературным значениям для данного вещества. Для МСЭП-структуры на основе тонкой пленки танталата лития возможно наличие в качестве «мертвого» слоя либо прослойки с измененными электрическими характеристиками, либо тонкого слоя одной из несегнетоэлектрических фаз системы $\text{Li}_2\text{O} - \text{Ta}_2\text{O}_5$, отличной от фазы LiTaO_3 . Такой фазой может быть несегнетоэлектрическая фаза Li_3TaO_4 : для нее диэлектрическая проницаемость имеет значения 11 – 14 [26].

Таблица 4 – Значения варьируемых параметров, полученные в результате моделирования

| Структура | σ_f , См/м | ε_{dl} | σ_{dl} , См/м | t , нм | R_e , кОм |
|---------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------|-------------|
| Cu/LiNbO ₃ /Si | $1,5 \cdot 10^{-6}$ | 3,9 | $3,0 \cdot 10^{-14}$ | 14 | 18 |
| Ag/LiTaO ₃ /Si | $1,3 \cdot 10^{-6}$ | 13 | $1,7 \cdot 10^{-7}$ | 18 | 31 |

С целью подтверждения гипотезы о типе «мертвого» слоя, существующего на интерфейсе сегнетоэлектрик/полупроводник, были проведены исследования микроструктуры боковых сколов образцов методом растровой электронной микроскопии и исследования элементного химического состава с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV (JEOL, Ltd., Япония). Для пленок LiNbO_3 установлено, что в направлении от поверхности пленки к подложке доля атомов кремния возрастает, а доля атомов ниобия уменьшается. Это согласуется с предположением о наличии «мертвого» слоя SiO_2 на интерфейсе сегнетоэлектрик/полупроводник. Наличие атомов кремния во всех спектрах можно объяснить непостоянством толщины слоя SiO_2 и сложностью выделения малой области изображения для спектрального анализа. Для тонкой пленки танталата лития в направлении от поверхности к подложке изменяется соотношение кислорода и тантала. При этом в спектре отсутствуют атомы Si. Вблизи интерфейса сегнетоэлектрик/полупроводник соотношение атомов кислорода и тантала может свидетельствовать о наличии несегнетоэлектрической фазы системы $\text{Li}_2\text{O} - \text{Ta}_2\text{O}_5$.

Наличие «мертвого» слоя может быть причиной естественной униполярности в тонких сегнетоэлектрических пленках [27–29]. Поляризационный заряд, возникающий во время отжига пленочной структуры в сегнетоэлектрических зернах из-за спонтанной поляризации, приводит к появлению обусловленного объемным зарядом поля внутри «мертвого» слоя, существующего на интерфейсе сегнетоэлектрик/полупроводник. Данное поле внутри «мертвого» слоя

способствует возникновению естественной униполярности сегнетоэлектрической пленки.

Заключение. В диссертационной работе проведено комплексное исследование электрофизических характеристик и анализ их взаимосвязи для МСЭП-структур на основе тонких пленок ниобата лития и танталата лития, сформированных на кремниевых подложках. На основе выполненной работы сделаны следующие **основные выводы**:

1. Исследование электрического отклика структур на воздействие модулированного теплового потока показало наличие у образцов естественной униполярности, связанной с возникновением поляризованного состояния пленки за счет формирования слоя объемного заряда на границе раздела сегнетоэлектрик/полупроводник.

2. Оценка пироэлектрического коэффициента исследуемых структур показала, что для тонкой пленки LiNbO_3 он составляет ~ 15 мкКл/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$), для тонкой пленки LiTaO_3 – ~ 64 мкКл/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$). Пироэлектрические коэффициенты имеют меньшие, но совпадающие по порядку величины значения в сравнении с аналогичными характеристиками для объемных кристаллов ниобата лития и танталата лития. Отличия связаны с тем, что вектор поляризации в зернах направлен не перпендикулярно поверхности пленок.

3. Исследование электропроводности показало, что зависимости тока от напряжения для обеих структур имеют диодный характер. Это свидетельствует о наличии потенциального барьера в исследуемых гетероструктурах. По начальному участку ВАХ рассчитана удельная электропроводность структур: для МСЭП-структуры на основе тонкой пленки LiNbO_3 она составляет $1,02$ нСм/м; для структуры на основе тонкой пленки LiTaO_3 – $4,9 \cdot 10^{-3}$ нСм/м.

4. Согласно ВАХ для пропускного направления основным механизмом проводимости для обеих МСЭП-структур является ток, ограниченный пространственным зарядом. При обратном смещении в обеих структурах наблюдается прыжковая проводимость с последующим переходом при увеличении напряженности электрического поля к эмиссии Шоттки в структуре на основе LiNbO_3 и ТОПЗ в структуре на основе LiTaO_3 .

5. Оценка плотности ловушек показала, что для МСЭП-структуры на основе ниобата лития $N_T \approx 7 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$; для МСЭП-структуры на основе танталата лития $N_T \approx 6 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Величина среднего расстояния между ловушками, полученная из расчетов, составляет $\sim 21 - 24$ нм для LN и $\sim 25 - 26$ нм для LT.

6. Величина потенциального барьера для МСЭП-структуры на основе тонкой пленки ниобата лития составляет $\sim 0,81 - 0,82$ эВ, а для МСЭП-структуры на основе тонкой пленки танталата лития – $\sim 1,01 - 1,02$ эВ. Основной вклад в высоту барьера дает барьер на интерфейсе металл/сегнетоэлектрик. Различия в величине барьера связаны

с антипараллельным направлением вектора поляризации в исследуемых структурах: в пленке LiNbO_3 он направлен от верхнего электрода к подложке, в пленке LiTaO_3 – от подложки к верхнему электроду.

7. Для обеих исследуемых МСЭП-структур наблюдается значительная дисперсия диэлектрических характеристик. Низкочастотная диэлектрическая проницаемость для МСЭП-структуры на основе ниобата лития составляет 55, а для МСЭП-структуры на основе танталата лития – 4,8. Диэлектрическая дисперсия и отличие величины диэлектрической проницаемости от соответствующего значения для объемного кристалла связаны с наличием в обеих структурах «мертвого» слоя на интерфейсе сегнетоэлектрик/полупроводник: для структуры на основе LiNbO_3 это слой SiO_2 , а для структуры на основе LiTaO_3 – слой диэлектрика, являющегося одной из фаз системы $\text{Li}_2\text{O} - \text{Ta}_2\text{O}_5$.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

A1. Гудков, С.И. Электропроводность и интерфейсные явления в тонкопленочных гетероструктурах на основе ниобата лития и танталата лития / С.И. Гудков, А.В. Солнышкин, Р.Н. Жуков, Д.А. Киселев, Е.М. Семенова, А.Н. Белов // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65. – № 4. – С. 577–586.

A2. Гудков, С.И. Электрический отклик тонких пленок ниобата лития и танталата лития на модулированное тепловое излучение / С.И. Гудков, А.В. Солнышкин, Р.Н. Жуков, Д.А. Киселев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – № 14. – С. 82–91.

A3. Gudkov, S.I. Electrical conductivity of lithium tantalate thin film / S.I. Gudkov, A.V. Solnyshkin, D.A. Kiselev, A.N. Belov // Cerâmica. – 2020. – V. 66. – № 379. – P. 291–296.

A4. Gudkov, S.I. Dielectric dispersion in thin LiNbO_3 films / S.I. Gudkov, M.V. Kamenshchikov, A.V. Solnyshkin, I.L. Kislova, A.N. Belov, D.A. Kiselev, R.N. Zhukov, M.D. Malinkovich // Ferroelectrics. – 2019. – V. 544. – № 1. – P. 62–67.

A5. Baklanova, K.D. Pyroelectric properties and local piezoelectric response of lithium niobate thin films / K.D. Baklanova, A.V. Solnyshkin, I.L. Kislova, S.I. Gudkov, A.N. Belov, V.I. Shevyakov, R.N. Zhukov, D.A. Kiselev, M.D. Malinkovich // Physica Status Solidi A. – 2018. – V. 215. – № 5. – 1700690.

A6. Гудков, С.И. Электропроводность и барьерные свойства тонких пленок ниобата лития / С.И. Гудков, К.Д. Бакланова, М.В. Каменщиков, А.В. Солнышкин, А.Н. Белов // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60. – № 4. – С. 739–742.

В других рецензируемых изданиях:

A7. Бакланова, К.Д. Электрофизические характеристики тонкопленочных структур на основе ниобата лития / К.Д. Бакланова, С.И. Гудков, М.В. Каменщиков, А.В. Солнышкин, Д.А. Киселев // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2016. – Т. 16. – № 4. – С. 87–90.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Synthesis and properties of $\text{NiSi}_2\text{-LiNbO}_3$ heterostructures fabricated by radio-frequency magnetron sputtering / M. Sumets [et al.] // *Surfaces and Interfaces*. – 2020. – V. 21. – 100797.
2. Microstructure and domain engineering of lithium niobate crystal films for integrated photonic applications / D. Sun [et al.] // *Light : Science & Applications*. – 2020. – V. 9. – № 1. – 197.
3. Slautin, B.N. Submicron periodical poling in Z-cut lithium niobate thin films / B.N. Slautin, H. Zhu, V.Y. Shur // *Ferroelectrics*. – 2021. – V. 576. – № 1. – P. 119–128.
4. Слаутин, Б.Н. Исследование размерных эффектов и эволюции доменной структуры при локальном переключении поляризации в кристаллах ниобата лития : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 1.3.8 / Слаутин Борис Николаевич. – Екатеринбург, 2022. – 109 с.
5. Rapid thermal processing of lithium tantalite thin films prepared by a diol-based sol-gel process / M.C. Kao [et al.] // *Applied Physics A*. – 2004. – V. 79. – P. 103–108.
6. A novel sol-gel method of preparation of the LiTaO_3 thin film and its property research / M. Yang [et al.] // *Integrated Ferroelectrics*. – 2014. – V. 154. – № 1. – P. 43–49.
7. Self-polarized pyroelectric LiTaO_3 thin films / A. Garraud [et al.] // 2014 Symposium on design, test, integration and packaging of MEMS/MOEMS (DTIP). – IEEE, 2014. – P. 356–359.
8. Preparation of LiNbO_3 thin films by bias sputtering / T. Nishida [et al.] // *Ferroelectrics*. – 1998. – V. 219. – № 1. – P. 9–13.
9. Infrared detector based on crystal ion sliced LiNbO_3 single-crystal film with BCB bonding and thermal insulating layer / W. Luo [et al.] // *Microelectronic Engineering*. – 2019. – V. 213. – P. 1–5.
10. Multiscale modeling of $\text{Al}_{0.7}\text{Sc}_{0.3}\text{N}$ -based FeRAM : the steep switching, leakage and selector-free array / C. Liu [et al.] // 2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). – IEEE, 2021. – P. 8.1.1–8.1.4.
11. Sumets, M. Charge transport in LiNbO_3 -based heterostructures / M. Sumets // *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*. – 2017. – V. 26. – № 1. – 1750011.
12. Compliance-current-modulated resistive switching with multi-level resistance states in single-crystalline LiNbO_3 thin film / X. Pan [et al.] // *Solid State Ionics*. – 2019. – V. 334. – P. 1–4.
13. Каптелов, Е.Ю. Униполярность тонких поликристаллических пленок цирконата-титаната свинца : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / Каптелов Евгений Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2005. – 20 с.
14. All-optical technique to measure the pyroelectric coefficient in electro-optic crystals / J. Parravicini [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – V. 109. – № 3. – 033106.

15. Popescu, S.T. Interferometric measurement of the pyroelectric coefficient in lithium niobate / S.T. Popescu, A. Petris, V.I. Vlad // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – V. 113. – № 4. – 043101.
16. Norkus, V. Pyroelectric infrared detectors based on lithium tantalate : state of art and prospects / V. Norkus // *Detectors and Associated Signal Processing*. – 2004. – V. 5251. – P. 121–128.
17. Поплавко, Ю.М. Физика диэлектриков : учебное пособие для вузов / Ю.М. Поплавко. – Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1980. – 400 с.
18. Chiu, F.C. A review on conduction mechanisms in dielectric films / F.C. Chiu // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2014. – V. 2014. – 578168.
19. Shur, V.Y. Nano- and microdomain engineering of lithium niobate and lithium tantalate for piezoelectric applications / V.Y. Shur // *Advanced Piezoelectric Materials*. – Woodhead Publishing, 2017. – P. 235–270.
20. Родерик, Э.Х. Контакт металл-полупроводник / Э.Х. Родерик; пер. с англ. О.Ф. Шевченко, В.И. Покалякина; под ред. Г.В. Степанова. – М. : Радио и связь, 1982. – 208 с.
21. Cheung, S.K. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics / S.K. Cheung, N.W. Cheung // *Applied physics letters*. – 1986. – V. 49. – № 2. – P. 85–87.
22. Norde, H. A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance / H. Norde // *Journal of applied physics*. – 1979. – V. 50. – № 7. – P. 5052–5053.
23. Bohlin, K.E. Generalized Norde plot including determination of the ideality factor / K.E. Bohlin // *Journal of Applied Physics*. – 1986. – V. 60. – № 3. – P. 1223–1224.
24. Influence sputtering conditions on electrical characteristics of Si-LiNbO₃ heterostructures formed by radio-frequency magnetron sputtering / M. Sumets [et al.] // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2014. – V. 603. – № 1. – P. 202–215.
25. Термостабильные сегнетоэлектрические конденсаторы на основе градиентных пленок титаната бария-стронция / А.В. Тумаркин [и др.] // *Журнал технической физики*. – 2017. – Т. 87. – № 10. – С. 1585–1591.
26. Low-temperature sintering and microwave dielectric properties of Li₃MO₄ (M=Ta, Sb) ceramics / L.-X. Pang [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2012. – V. 525. – P. 22–24.
27. The interface screening model as origin of imprint in PbZr_xTi_{1-x}O₃ thin films. I. Dopant, illumination, and bias dependence / M. Grossmann [et al.] // *Journal of applied physics*. – 2002. – V. 92. – № 5. – P. 2680–2687.
28. Tagantsev, A.K. Domains in ferroic crystals and thin films / A.K. Tagantsev, L.E. Cross, J. Fousek. – New York : Springer, 2010. – 835 p.
29. Сегнетоэлектрические пленки дейтерированного глицинфосфита: структура и диэлектрические свойства / Е.В. Балашова [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2013. – Т. 55. – № 5. – С. 916–922.

Подписано в печать 22.09.2023. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ № 222.
Издательство Тверского государственного университета.
Адрес: 170100, г. Тверь, Студенческий пер. 12, корпус Б.
Тел.: (4822) 35-60-63.