**«УТВЕРЖДАЮ»**

Первый проректор

ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологически университет»

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Н.И. Прокопов

«\_\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2019 г.

**Заключение**

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА — Российский технологически университет» по диссертационной работе Александра Николаевича Антоновича на тему «Контактные явления в сегнетоэлектрических конденсаторных структурах с тонкими пленками цирконата-титаната свинца», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Диссертационная работа выполнена на кафедре Наноэлектроники Физико-технологического института государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский технологически университет», Министерства образования и науки Российской Федерации.

В настоящее время А.Н. Антонович является научным сотрудником Физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

В 2013 г. окончил магистратуру Московского государственного технического университета электроники и автоматики. Присуждена квалификация (степень) по направлению подготовки «Нанотехнологии и микросистемная техника», присвоено специальное звание магистр-инженер.

В 2018 году окончил аспирантуру ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет» по направлению «Электроника, радиотехника и системы связи», присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2016 году Московским технологическим университетом.

Научный руководитель — Лукичев Владимир Федорович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технологический институт Российской академии наук имени К.А. Валиева».

**Выписка из протокола № ?? заседания кафедры наноэлектроники физико-технологического института федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет» от «15» мая 2019 года.**

**Присутствовали:** д.ф.-м.н., проф. Сигов А.С., к.х.н. Буря Г.Ф., д.т.н., проф. Буш А.А., д.т.н., проф. Воротилов К.А., к.ф.-м.н., доц. Гладышев И.В., к.т.н., доц. Захаров А.К., к.ф.-м.н., доц. Индришенок В.И., к.т.н., доц. Каменцев К.Е., д.ф.-м.н., проф. Капустин В.И., Колесникова Т.Г., Матвеева И.В., д.ф.-м.н., проф. Мишина Е.Д., д.ф.-м.н., к.т.н., доц. Певцов Е.Ф., д.ф.-м.н., проф. Покатилов В.С., д.ф.-м.н., проф. Щука А.А., к.ф.-м.н., доц. Фетисов Л.Ю., к.ф.-м.н., доц. Шерстюк Н.Э., д.ф.-м.н., доц. Юрасов А.Н.

Заседание вел заместитель заведующего кафедрой наноэлектроники д.ф.-м.н., проф. Юрасов Алексей Николаевич.

**Повестка дня**: О рекомендации к защите диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук научного сотрудника Физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова Александра Николаевича Антоновича «Контактные явления в сегнетоэлектрических конденсаторных структурах с тонкими пленками цирконата-титаната свинца», по специальности
05.27.01 - «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

**Слушали**: Выступление А.Н. Антоновича по материалам диссертационной работы. В ходе обсуждения были заданы следующие вопросы:

**д.ф.-м.н. А.Н. Юрасов**: В чем заключается новизна представленной Вами работы?

**Ответ**: Впервые для исследование контактных явлений на границе раздела электрод/пленка и изучения их влияния на вольт-амперные характеристики сегнетоэлектрических конденсаторных структур с тонкими пленками ЦТС применяется метод наведенного тока методом наведенного тока. Идентифицированы толщины областей обеднения вблизи границ раздела электрод/пленка СЭ конденсаторов Ir/PZT/Pt, Pt/PZT/Pt и Au/PZT/Pt, а также установлено влияние электрофизических свойств интерфейсов исследуемых структур не только на значения тока утечки, но и на характер поведения вольт-амперных характеристик тонкопленочных конденсаторов с тонкими пленками ЦТС

**д.ф.-м.н., В.И. Капустин:** О каком токе конкретно идет речь? Дробовый ток, темновой, индуцированный?

**Ответ**: Речь идет о наведенном электронным пучком токе при короткозамкнутых контактах в цепи. В методе наведенного тока электронный пучок действует как локальный источник неравновесных электронно-дырочных пар. В случае, когда в диапазоне длины диффузии носителя материала имеется электрическое поле,сгенерированныеносители попадают под его влияние - реализуется дрейфовое движение и образуется электрический ток, который может быть измерен. Таким образом в каждой точке сканирования будем получать значение наведенного тока.

**к.ф.-м.н., доц. Н.Э. Шерстюк:** Какие ограничения у предлагаемого Вами метода? Пригоден ли он для исследования тонких пленок? И возможно ли его применение при исследовании других материалов?

**Ответ**: Пространственное разрешение метода наведенного тока ограничивается параметрами электронного пучка (энергия и ток), свойствами материала (диффузионной длиной носителей заряда, размерами области обеднения, функцией генерации носителей заряда). Сообщаемое пространственное разрешение составляет ≈ 10 нм . Методика применима для материалов с малой *L,* а также при толщине пленки *d ˃ L,*

**д.ф.-м.н., Е.Д. Мишина**: Как именно вы определяли толщины областей обеднения у границ раздела электрод/пленка?

**Ответ**: Идентификация областей обеднения и определение соответствующих толщин основано на анализе полученных профилей наведенного тока. Плоские вершины профилей, в которых сигнал принимает максимальное значение и остается неизменным, определяют границы обеднения. Это обусловлено пренебрежимо малой рекомбинацией носителей внутри области объемного заряда и, как следствие, сбором всех сгенерированных электронно-дырочных.

**к.ф.-м.н. Л.Ю. Фетисов**: У вас некоторые моменты, указанные на слайдах, не отражены в выступлении. Вы либо их поясните, либо оптимизируйте ваш доклад.

**Ответ**: Понял. Спасибо. Учту

**Заместитель председателя, д.ф.-м.н. А.Н. Юрасов**: Мы выслушали сообщение
А.Н. Антоновича о работе над диссертацией и ее основных результатах. Следует отметить значительный личный вклад автора, большой объем выполненной экспериментальной работы, а также ее высокий уровень. Результаты работы опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, прошли аппробацю на российких и международны конференциях. На основании вышеизложенного предлагаю одобрить результаты работы
А.Н. Антоновича над диссертацией и рекомендовать диссертацию к защите.

Заслушав и обсудив доклад Антоновича Александра Николаевича, а также ознакомившись с текстом диссертации и автореферата кафедра наноэлектроники приняла следующее решение:

**Актуальность темы и направленность исследования**

Диссертационная работа Антоновича Александра Николаевича направлена на экспериментальное исследование контактных явлений на границе раздела электрод/пленка методом наведенного тока и изучение их влияния на вольт-амперные характеристики сегнетоэлектрических конденсаторных структур с тонкими пленками ЦТС.

Актуальность темы обусловлена существенным влиянием контактных явлений на основные параметры надежности сегнетоэлектрических конденсаторов, в том числе на токи утечки. Взаимосвязь между электрофизическими свойствами интерфейсов и поведением токов утечки в реальных СЭ конденсаторах в литературе изучена недостаточно. Идентифицировать тип контакта металлического электрода с пленкой ЦТС одинаково важно, как для развития представления о механизмах переноса заряда, правильной интерпретации экспериментальных данных и надежного определения электрофизических свойств СЭ конденсаторов по результатам электрических измерений, так и для правильной разработки эквивалентных схем электронных приборов на основе пленок ЦТС.

В работе решаются задачи по исследованию влияния материала верхнего электрода на электрофизические характеристики сегнетоэлектрических конденсаторных структур с тонкими пленками ЦТС. Экспериментально определяются и исследуются токи релаксации и стационарные вольт-амперных характеристики тонкопленочных сегнетоэлектрических конденсаторов Ir/PZT/Pt, Au/PZT/Pt, Pt/PZT/Pt. Определяются вероятные механизмы проводимости сегнетоэлектрических конденсаторов на основе тонких пленок цирконата-титаната свинца при различных напряженностях действующего электрического поля; Изучается поведение электрических полей у границ раздела пленка/электрод при различных напряжениях смещения положительной и отрицательной полярности. Определяются электрофизические свойства контактов, образуемых Ir, Pt, Au электродами и пленкой ЦТС. Исследуется влияние поверхностей границ раздела пленка/электрод на вольт-амперные характеристики сегнетоэлектрических конденсаторных структур с тонкими пленками ЦТС.

**Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации**

Все результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором либо при его непосредственном участии. На все заимствованные положения даны ссылки.

Диссертантом совместно с научным руководителем д.ф-м.н., директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технологический институт Российской академии наук имени К.А. Валиева» Лукичевым В.Ф. проводился выбор темы, планирование работы, постановка задач исследований и обсуждение результатов работы.

Интерпретация и обсуждение полученных результатов осуществлялись совместно с Ю.В. Подгорным. Автор лично принимал участие на всех этапах работы: подготовка образцов для исследования, определение ВАХ, измерение профилей наведенного тока, обработка и анализ результатов, написание и оформление публикаций по теме диссертации.

**Степень достоверности результатов исследований, проведенных соискателем ученой степени**

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается применением современного высокоточного оборудования, обоснованностью принятых допущений и подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями, согласованностью их результатов с теоретическими данными, существующими физическими моделями и отсутствием противоречий между ними.

**Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих российских и международных конференциях:**

1.  XXI Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС–XXI),
г. Казань2017.

2.  European Conference on Application of Polar Dielectrics ECAPD. Moscow 2018.

3. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018» Москва 2018 г.

4. Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC» в 2013, 2015, 2016, 2017 годах (г. Москва).

5. 2-й Международный форум по электронно-лучевым технологиям для микроэлектроники – «ТЕХНОЮНИТИ – ЭЛТМ 2017» (г. Зеленоград).

6. 2-я Научно-техническая конференция Московского технологического университета 2017» (г. Москва).

7. 28-ая Российская конференция по электронной микроскопии «РКЭМ-2018»
(г. Черноголовка).

**Научная новизна результатов, изложенных в диссертации**

1. Впервые методом наведенного тока идентифицированы области обеднения вблизи границ раздела электрод/пленка в сегнетоэлектрических конденсаторных структурах Ir/PZT/Pt, Pt/PZT/Pt и Au/PZT/Pt.

2. Впервые прямая регистрация толщин областей обеднения на нижнем и верхнем интерфейсах, при смещениях различной полярности, используется для интерпретации вольт-амперных характеристик стационарного тока утечки сегнетоэлектрических конденсаторов.

3. Показано, что профили наведенного тока, характеризующие локальные электрические поля на интерфейсах Ir/PZT/Pt, Pt/PZT/Pt и Au/PZT/Pt, позволяют определить тип контакта металлического электрода с пленкой ЦТС.

4. Установлено влияние электрофизических свойств контактов, образуемых пленкой ЦТС с Ir, Pt и Au электродами, на характер поведения вольт-амперных характеристик тонкопленочных сегнетоэлектрических конденсаторов Ir/PZT/Pt, Pt/PZT/Pt и Au/PZT/Pt.

Новизна работы, в целом, состоит в развитии представлений о контактных явлениях на границе раздела металл/сегнетоэлектрик и их влиянии на вольт-амперные характеристики сегнетоэлектрических конденсаторных структурах с тонкими пленками цирконата-титаната свинца.

Ряд новых научных результатов, полученных в работе, выносятся на защиту:

1. Асимметрия локальных электрических полей, наблюдаемая методом наведенного тока на интерфейсах сегнетоэлектрических конденсаторов Ir/PZT/Pt, Pt/PZT/Pt*,* обусловлена различнымитехнологическими условиями формирования границ раздела пленка/электрод и неравномерным распределением кислородных вакансий по толщине пленки.

2. Новый подход к интерпретации вольт-амперных характеристик сегнетоэлектрических конденсаторов Ir/PZT/Pt, Pt/PZT/Pt и Au/PZT/Pt с учетом экспериментально установленной зависимости толщин областей обеднения у границ раздела пленка/электрод от прикладываемого напряжения различной полярности.

3. Вольт-амперные характеристики структуры Au/PZT/Pt обусловлены различными электрофизическими свойствами контактов пленки с электродами и определяются нижней границей раздела PZT/Pt,проявляющей себя в качестве диода, включенного в прямом и обратном направлении при положительной и отрицательной полярности соответственно.

4. Оригинальная методика определения диффузионной длины носителей заряда в сегнетоэлектрических конденсаторных структурах с тонкими пленками цирконата-титаната свинца.

**Практическая и научная значимость работы**

Полученные в работе данные о влиянии контактных явлений на вольт-амперные характеристики СЭ конденсаторов имеют большое практическое значение для правильной интерпретации и надежного определения их электрофизических свойств. Результаты работы могут быть использованы для разработки решений, направленных на уменьшение токов утечки, а также в целях улучшения характеристик существующих изделий и получения новых приборных структур микро- и наноэлектроники на основе пленок ЦТС.

**Ценность научных работ соискателя ученой степени**

Диссертация представляет собой законченный научный труд, который вносит весомый вклад в развитие представлений о транспорте носителей заряда в сегнетоэлектрических конденсаторных структурах с тонкими пленками ЦТС. Особую ценность представляют аспекты работы, связанные с идентификацией толщин областей обеднения у границ раздела пленка/электрод, определением электрофизических свойств контактов, образуемых Ir, Pt, Au электродами с пленкой ЦТС и их влиянием на ВАХ исследуемых СЭ структур Ir/PZT/Pt, Pt/PZT/Pt и Au/PZT/Pt.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки решений, направленных на уменьшение токов утечки СЭ конденсаторов, улучшение характеристик существующих изделий и получение новых приборных структур микро- и наноэлектроники на основе пленок ЦТС.

**Соответствие диссертации требованиям, установленным п.14 «Положения о присуждении ученых степеней»**

Диссертация Антоновича А.Н. прошла проверку на наличие неправомерных заимствований в системе «Антиплагиат ВУЗ», в результате которой выявлено, что диссертация содержит 86% оригинального текста.

Специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа Антоновича А.Н. соответствует специальности
05.27.01 —«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» (согласно пунктам 3 и 5 паспорта специальности).

– Разработка и исследование технологических основ создания и методов совершенствования изделий по п. 1.

– Исследование и моделирование функциональных и эксплуатационных характеристик изделий по п. 1, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы эффективного применения.

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени**

Основное содержание диссертации достаточно полно отражено
в 5 опубликованных научных работах, включая 3 статьи в журнале, входящем в перечень ВАК, 1 статья в журнале, входящем в базу данных Scopus, 1 статья в журнале, входящем в базу данных Web of Science, а также в 11 публикациях в сборниках трудов, тезисов и материалах всероссийских и международных научных конференций.

Публикации в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ:

1. Антонович А.Н., Петрушин А.А., Подгорный Ю.В. Исследование механизмов электрической проводимости слоистых наноструктур на основе PbZr0,52Ti0,48O3 методом наведенного тока // «Наноматериалы и наноструктуры-XXI век». № 4. Т. 8. 2017 г. С. 19–22.
2. Антонович А.Н., Лапин Д.Г., Петрушин А.А., Подгорный Ю.В. Исследование контактных явлений на границе раздела PZT-Pt методом наведенного тока // Известия РАН. Серия физическая. 2018 г. Т. 82, №3, С. 387–389.
3. Антонович А.Н., Петрушин А.А., Подгорный Ю.В. Исследование контактных явлений в сегнетоэлектрических конденсаторных наноструктурах Ir/PZT/Pt // «Наноматериалы и наноструктуры-XXI век». Т. 9. № 4. 2018 г. С. 28–35.
4. Podgorny Yu.V., Antonovich A. N., Vorotilov K. and Sigov A.S. // Discharge currents in dense and porous PZT films// Ferroelectrics. 2019. doi: 10.1080/00150193.2019.1598192.
5. Антонович А.Н., Пахомов C.В., Петрушин А.А., Подгорный Ю.В. Влияние границ раздела пленка/электрод на токи утечки в сегнетоэлектрических конденсаторных наноструктурах Au/PZT/Pt // «Наноматериалы и наноструктуры-XXI век». Т. 10. № 2. 2019 г. С. 13–19.
6. Антонович А.Н., Лапин Д.Г., Петрушин А.А., Подгорный Ю.В. Исследование контактных явлений на границе раздела PZT-Pt методом наведенного тока // Сборник трудов XXI Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков г. Казань, 25–30 июня 2017 г., С.194.
7. Antonovich, A. Petrushin, Y. Podgorniy. Electron beam induced current method for investigation of conductivity mechanisms in the ferroelectric thin films // Book of abstracts European Conference on Applications of Polar Dielectrics (ECAPD–2018) Moscow, June 25–28, 2018. pp. 96.
8. Антонович А.Н., Петрушин А.А. Исследование механизмов проводимости наноструктур на основе PbZr0,52Ti0,48O3 методом наведенного тока // Сборник тезисов XXV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2018». Секция «Физика». – М.: – 2018. –
С. 357–358.
9. Антонович А.Н. Вопросы формирования контраста изображений в методе наведенного тока // Материалы Международной научно-технической конференции Москва, 21-25 ноября 2016 г., INTERMATIC-2016, часть 3, С. 10–12.
10. Антонович А.Н., Петрушин А.А. Исследование эффективности сбора электронно-дырочных пар на границе раздела PZT-Pt // 2-й Международный форум «Техноюнити – Электронно-лучевые технологии для микроэлектроники» г. Зеленоград, 9–12 октября 2017г., С. 90.
11. Антонович А.Н., Петрушин А.А. Исследование контактных явлений на границе PZT-Pt на основе регистрации изменения амплитуды сигнала наведенного тока, при различном внешнем напряжении смещения // Материалы Международной научно-технической конференции,  INTERMATIC-2017, часть 2, С. 280–282.
12. Антонович А.Н., Петрушин А.А., Доронин Е.В., Бурцев А.Н. Исследование локальных свойств приборных структур микроэлектроники методом наведенного тока // Материалы Международной научно-технической конференции, INTERMATIC-2016, часть 3, С. 184–186.
13. Антонович А.Н., Петрушин А.А., Лапин Д.Г., Шиколенко Ю.Л., Овчинников И.С. Особенности исследований локальных свойств полупроводников методом наведенного тока // Материалы Международной НТК, INTERMATIC-2015, часть 3,
С. 12–14.
14. Антонович А.Н., Петрушин А.А. Исследование механизмов проводимости наноструктур на основе PbZr0,52Ti0,48O3 методом наведенного тока // Сборник тезисов XXVII Российской конференции «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях органических, неорганических наноструктур и нанобиоматериалов». Черноголовка, 28–30 августа 2018г. Том 2. 2018. C. 34–35.
15. Антонович А.Н., Петрушин А.А., Лоторев А.И. Вопросы интерпретации контраста изображений, полученных методом наведенного тока // Материалы 2-й Научно-технической конференции Московского технологического университета,
15–20 мая 2017 г.
16. Антонович А.Н., Петрушин А.А., Кислов А.Н. Измерение диффузионной длины в тонкой пленке керамики на основе PZT методом наведённого тока // Материалы Международной научно-технической конференции, INTERMATIC-2017, часть 2,
С. 283–285.

**Председатель, академик РАН, д.ф.-м.н. А.С. Сигов:** поступило предложение одобрить результаты диссертационной работы Антоновича А.Н., рекомендовать работу к защите и принять соответствующее заключение:

Результаты голосования:

За – 18 чел.

Против – нет.

Воздержавшихся – нет.

**Кафедра наноэлектроники постановила:**

Диссертационная работа Антоновича Александра Николаевича отвечает требованиям п. 9 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям, так как является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований контактных явлений на границе раздела электрод/пленка методом наведенного тока, а также изучение их влияния на вольт-амперные характеристики сегнетоэлектрических конденсаторных структур с тонкими пленками ЦТС. Определены электрофизические свойства контактов, образуемых Ir, Pt и Au электродами с пленкой ЦТС. Идентифицированы механизмы транспорта носителей заряда в исследуемых тонкопленочных СЭ конденсаторных структурах. Предложенные в работе подходы могут быть использованы для надежной интерпретации экспериментальных данных по результатам измерения электрофизических свойств СЭ конденсаторов, для разработки рекомендаций по уменьшению токов утечки, а также для получения новых приборов микро- и наноэлектроники на основе пленок ЦТС.

Рекомендовать диссертационную работу Антоновича Александра Николаевича на тему «Контактные явления в сегнетоэлектрических конденсаторных структурах с тонкими пленками цирконата-титаната свинца» к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах», пункты паспорта специальности № 3, 5, в диссертационном Совете Д 212.131.02.

Зам. зав. кафедрой наноэлектроники А.Н. Юрасов

Ученый секретарь кафедры наноэлектроники Л.Ю. Фетисов