



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,  
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251  
Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80  
E-mail: office@spbstu.ru

\_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

На №от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского  
политехнического университета  
Петра Великого  
В. В. Сергеев  
«\_\_02\_\_»\_\_февраля\_\_\_\_2017

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**о диссертационной работе Е. В. Гущиной на тему «Исследование механизмов локальной проводимости наноструктурированных материалов методами атомно-силовой микроскопии», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

В последние десятилетия все больше интереса уделяется конструированию, изготовлению и изучению свойств наноструктур – объектов, размеры которых лежат в диапазоне от единиц до десятков нанометров. На сегодняшний день наноструктуры и наноструктурированные материалы находят свое применение в опто- и нано- электронных устройствах, в медицине, в химической промышленности, в материаловедении и других областях. Именно поэтому актуальной задачей на сегодняшний день становится получение с нанометровым разрешением

информации о структурных особенностях и физических свойствах используемых материалов.

Так, проводимость является чрезвычайно важной характеристикой большинства актуальных приборов микроэлектроники. Однако исследование свойств наноструктурированных материалов выдвигает на первый план проблему создания адекватных методик их диагностики. Методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) стали в настоящее время неотъемлемой частью практически любого исследования, в котором размеры изучаемых объектов составляют единицы и сотни нанометров. Особенность данной работы заключается в том, что методы АСМ применяются для изучения с нанометровым разрешением локальной проводимости таких наноструктурированных материалов, как компоненты водородных топливных элементов, тонкие сегнетоэлектрические пленки цирконата-титаната свинца (PZT) и пленки high-k диэлектриков ( $\text{SmScO}_3$ ).

Таким образом, интерес к исследованию особенностей локальной проводимости в вышеуказанных средах обусловлен тем, что понимание распределения областей с разным уровнем проводимости, природы протекающих токов и каналов нежелательных токовых утечек дает возможность построения новых устройств водородной энергетики, обладающих улучшенными рабочими характеристиками; позволяет учесть исходное направление поляризации при конструировании сегнетоэлектрической памяти на основе тонкой PZT пленки и создать новый миниатюрный МОП транзистор, обладающие улучшенными рабочими характеристиками в сравнении с ныне использующимися. Все вышесказанное указывает на **актуальность** темы диссертационной работы.

**Целью** представленной диссертационной работы Е. В. Гущиной являлось исследование локальной проводимости и особенностей распределения областей протекания тока, а также пространственного распределения зарядов с нанометровым разрешением методами АСМ. Объектами исследования являются компоненты водородных топливных элементов, тонкие сегнетоэлектрические пленки  $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ , а также пленки

high-k диэлектриков  $\text{SmScO}_3$ .

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

- осуществить адаптацию существующих методик АСМ для исследования каждого из предложенных объектов;
- для изучения протонпроводящих мембран и каталитических слоев различного состава в водородных топливных элементах создать установку для подачи газов  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ . Интегрировать ее в существующий стационарный АСМ микроскоп. Установить влияние дополнительного «стоп-слоя» и концентрации полимера нафион в композитных каталитических слоях на интенсивность протекания каталитической реакции и эффективность топливных элементов.
- исследовать структуру и связанные с ней особенности проводимости в поликристаллических и эпитаксиальных сегнетоэлектрических пленках  $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ ;
- установить влияние направления поляризации в поликристаллических и эпитаксиальных сегнетоэлектрических пленках на процесс протекания через них тока.
- изучить процесс инжекции и движения зарядов в тонких high-k диэлектрических пленках  $\text{SmScO}_3$ . Вычислить коэффициенты диффузии, энергии активации и подвижности инжектированных зарядов.

Как ясно из текста диссертации, все вышеперечисленные задачи решены.

**Научная новизна.** К новым и наиболее важным научным результатам, полученным в диссертационной работе, можно отнести следующее.

1. Разработан метод полуконтактной микроскопии сопротивления растекания, позволяющий исследовать проводящие свойства мягких сред.
2. Показано, что на эффективность топливного элемента влияют: структурное совершенство и однородность проводящих свойств мембраны; наличие «стоп-слоя» между проводящей мембраной и каталитическим слоем; проводимость каталитического слоя при продувке водородом, зависящая от процентного содержания полимера.

3. Установлено, что направление поляризации в поликристаллической и эпитаксиальной PZT пленках влияет на протекание тока принципиально различным образом.

4. Установлено, что ток в PZT пленках имеет емкостную природу, которая обусловлена перезарядкой ловушечных центров, расположенных в слое PbO в поликристаллической пленке и в объеме эпитаксиальной пленки.

5. Впервые изучено поведение заряда, инжектированного в пленку high-k диэлектрика SmScO<sub>3</sub>. Обнаружено, что время удержания заряда определяется ловушечными центрами в слое, электрической активностью которых можно управлять с помощью отжига.

6. Для high-k диэлектрика SmScO<sub>3</sub> впервые определены значения коэффициентов диффузии, энергии активации и подвижности инжектированных зарядов.

**Достоверность результатов** диссертационной работы подтверждается использованием современных экспериментальных методик, воспроизводимостью результатов, корреляцией с проведенными «интегральными» измерениями на этих же пленках, а также апробацией результатов.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

1. Развита нестандартная методика измерения карт локальной проводимости – полуконтактная микроскопия сопротивления растекания. Такая методика позволяет проводить токовые измерения на «мягких» проводящих объектах с выраженным рельефом, не повреждая его. Методика была опробована для диагностики компонентов водородного топливного элемента – протонпроводящей мембраны и каталитического слоя. Полученные экспериментальные данные позволяют оптимизировать работу топливного элемента в целом.

2. Использование метода микроскопии сопротивления растекания позволяет визуализировать с нанометровым разрешением области токовых утечек в PZT пленках. Обнаруженная поляризационная зависимость тока в PZT пленках позволит оптимизировать и учесть исходное направление

поляризации при считывании информации в устройствах СЭ-памяти.

3. Впервые рассчитаны значения коэффициентов диффузий, энергии активации и подвижности зарядов для тонких high-k диэлектрических пленок SmScO<sub>3</sub>. Полученные результаты необходимо учитывать при построении приборных структур на базе high-k диэлектрических пленок SmScO<sub>3</sub>.

По работе имеются следующие **замечания**:

1. Работа имеет в значительной степени методический характер, тем не менее описанию новых методик и сравнению с существующими уделено крайне мало внимания.

2. Из материалов работы остается не вполне понятно, пространственное распределение какой именно физической величины отражает токовый сигнал при измерениях методом «микроскопии сопротивления растекания» для мембраны топливного элемента и PZT пленок. Корректно ли использование термина «микроскопия сопротивления растекания» для этих экспериментов?

3. Недостаточно проанализирован возможный вклад доменных стенок в проводимость эпитаксиальных пленок PZT.

4. Чем обусловлен выбор диапазона температур при получении зависимости коэффициента диффузии в пленках SmScO<sub>3</sub> от обратной температуры?

Сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки диссертационной работы.

**Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы.** Результаты работы могут использоваться в научных исследованиях, проводимых в вузах и институтах РАН, а также в научно-исследовательских организациях, занимающихся исследованиями и разработками в области СВЧ твердотельной микроэлектроники.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней и п. 1, 5, 7 Паспорта специальностей ВАК для физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния. Основные результаты диссертации опубликованы в научной печати, неоднократно докладывались на

конференциях и семинарах различного уровня и известны в кругу специалистов. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-исследовательской работой, посвященной решению актуальных проблем современной водородной энергетики и микроэлектроники, имеющей важное научно-техническое значение. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор – Гущина Екатерина Владимировна – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доклад Е. В. Гущиной по материалам кандидатской диссертации заслушан, обсуждён и утвержден на семинаре кафедры физической электроники от 25 января 2017 г., протокол № 5. Присутствовало 21 из 26 научно-педагогических работников кафедры.

Заведующий кафедрой д.ф.-м.н. Филимонов Алексей Владимирович, моб. тел.: +7 (911) 215-12-18; раб. тел. 8 (812) 552-75-16, e-mail: [filimonov@rphf.spbstu.ru](mailto:filimonov@rphf.spbstu.ru); сайт: <http://phys-el.spbstu.ru/>

Сведения об организации:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,

тел. 8 (812) 552-60-80, <http://www.spbstu.ru/>

Зав. кафедрой физической электроники,  
д.ф.-м.н., доцент

А.В. Филимонов

Секретарь кафедры

Н.В. Дворецкая