



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

УТВЕРЖДАЮ



Директор по научной работе
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Шестопалов М.Ю.

" 28 " ноября 2014 г.

О Т З Ы В

ведущей организации Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина) на диссертационную работу **Каменщикова Михаила Викторовича** «Электропроводность и барьерные эффекты в тонких сегнетоэлектрических пленках цирконата-титаната свинца», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Актуальность темы

Сегнетоэлектрические пленки цирконата-титаната свинца (ЦТС) находят широкое применение при создании устройств энергонезависимой и динамической памяти, управляемых электрическим полем конденсаторов; микроэлектромеханических систем (MEMS), различных сенсорных устройств на основе пьезо- и пироэлектрических эффектов и т.д. В последние годы много внимания уделяется выяснению влияния условий формирования перовскитовой (сегнетоэлектрической) фазы пленок ЦТС на их кристаллическую структуру, фазовый состав и электрофизические характеристики. Особый интерес в процессе высокотемпературной обработки пленок ЦТС представляет поведение свинца, высокая миграционная способность которого может приводить к существенным изменениям свойств как пленок ЦТС, так и структур на их основе.

Поэтому тема диссертационной работы, посвященной исследованию электропроводности и барьерных эффектов в конденсаторных гетероструктурах на основе пленок цирконата-титаната свинца, формирование сегнетоэлектрической фазы в которых проводилось при разных температурах термообработки, является **актуальной** как с научной, так и с практической точек зрения.

Объектами исследования в работе являлись сегнетоэлектрические пленки состава $\text{PbZr}_{0,54}\text{Ti}_{0,46}\text{O}_3$, изготовленные двухстадийным методом (*ex-situ*), при котором с помощью высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления керамической мишени на платинированную подложку при относительно низких температурах осаждается пленка ЦТС, а затем проводится ее термообработка и формируется сегнетоэлектрическая фаза перовскита. Данный состав соответствует морфотропной фазовой границе, где большинство практически важных электрофизических параметров имеют максимальные значения.

Новизна исследований и полученных результатов

Анализ диссертационной работы Каменщикова М.В. показал, что соискателем проделана большая экспериментальная работа по исследованию электрофизических свойств тонких пленок ЦТС в зависимости от условий формирования перовскитовой фазы. В работе использован широкий спектр методик для исследования сегнетоэлектрических гетероструктур: хорошо апробированные методики вольтамперных характеристик (ВАХ) для изучения транспорта носителей и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) - для изучения барьерных эффектов в гетероструктурах, метод Сойера-Тауэра для исследования процессов переключения в сегнетоэлектрических пленках. Это позволило автору получить ряд новых экспериментальных данных, анализ которых проведен на основе современных представлений о физических процессах в пленочных гетероструктурах с сегнетоэлектрическими слоями.

Из наиболее важных результатов комплексных исследований влияния технологических факторов на свойства пленок цирконата-титаната свинца, имеющих научную новизну, необходимо выделить следующие:

1. Установлено, что в исследуемых гетероструктурах на основе ЦТС транспорт носителей заряда в значительной степени зависит от условий формирования перовскитовой фазы (температуры синтеза пленок). Методом вольтамперных характеристик определены основные механизмы проводимости: омический и Пула-Френкеля.

2. Показано, что кинетика токов утечки в исследуемых пленках зависит от приложенного постоянного поля: так, в больших полях обнаруживаются скачкообразные изменения тока, связанные с инъекцией носителей и процессами переполяризации в отдельных зернах поликристаллической пленки.

3. С использованием вольтамперных и вольтфарадных характеристик выполнен расчет величины потенциального барьера на интерфейсе Pt-ЦТС, который варьируется от 0,2 до 2,0 эВ в зависимости от условий синтеза пленки. Показано различие в величинах потенциальных барьеров, рассчитанных на основе ВФХ и ВАХ, что обусловлено вкладом остаточной поляризации.

4. Установлено, что экспериментально полученные в работе электрофизические характеристики пленок ЦТС демонстрируют экстремальную зависимость от

температуры синтеза. Такое поведение обусловлено фазовыми превращениями, происходящими в исследуемых пленках во время синтеза при различных температурах, что приводит к изменению размеров сферолитовых блоков, составляющих пленку, и содержания избыточного свинца.

Основные научные положения, выносимые на защиту, являются обоснованными и, в целом, не вызывают возражений. Они подтверждаются результатами многочисленных экспериментов, их грамотным анализом с применением адекватных физических моделей.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов, определяется комплексным использованием различных многократно проверенных экспериментальных методов (ВАХ, ВФХ, диэлектрической релаксационной спектроскопии, метода Сойера-Тауэра), воспроизводимостью и согласованностью результатов, полученных различными методами. Полученные результаты соответствуют существующим теоретическим представлениям и моделям.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация изложена доходчивым языком, оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к оформлению диссертаций, содержит достаточное число иллюстраций и таблиц, текст регулярно сопровождается ссылками на публикации.

Однако по диссертационной работе **можно сделать следующие замечания**, касающиеся полноты и четкости изложения материала по отдельным вопросам:

1. Неудачно сформулирован п.1 научной новизны «Впервые показано, что на процессы транспорта носителей заряда в пленках PZT(54/46) влияют условия формирования перовскитовой фазы,», поскольку сам факт влияния температуры и условий формирования перовскитовой фазы на свойства пленок ЦТС очевиден и исследовался другими авторами уже несколько десятилетий.

2. В работе указывается, что «В исследуемых пленках PZT(54/46) методом ВАХ определены два доминирующих механизма проводимости: омический и эмиссия Пула-Френкеля». Почему не были рассмотрены такие механизмы транспорта как токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ) и токи, определяемые надбарьерной эмиссией, ведь с математической точки зрения экспериментальные кривые можно было бы аппроксимировать и этими моделями? Почему не учтена неоднородность пленок ЦТС (не оговаривался перенос по зернам ЦТС, по границам зерен, по включениям оксида свинца, по пироклорным включениям, через «мертвые слои» и т.д.)?

3. При анализе значительных изменений в характере ВАХ пленок ЦТС, температура формирования которых отличалась на 5 – 10 °С возникает вопрос о том, насколько эти экспериментальные данные воспроизводимы, достаточной ли была выборка.

4. Очевидно, что в структуре Pt-PZT-Pt существует два барьера – на нижнем и верхнем интерфейсах. Почему тогда в работе оценивалась величина только одного барьера? Не ясно, к какому из этих двух интерфейсов относится полученная оценка.

Если же один из контактов соискатель считает омическим, то этому требуется соответствующее обоснование.

5. Фраза «зависимости тока утечки от времени в малых полях демонстрируют начальный выброс тока с последующей его релаксацией до установившегося значения с характерным временем релаксации порядка двух секунд» неудачно сформулирована, так как эти «выбросы» не имеют отношения к токам утечки, а скорее являются токами смещения. В работе не указано, в каком исходном состоянии находились пленочные образцы перед измерением ВАХ и ВФХ.

6. Экстремальное поведение электрофизических свойств пленок с изменением температуры синтеза требует более детального обсуждения с учетом взаимосвязи с меняющейся микроструктурой образцов. В работе не хватает структурных исследований пленок, синтезированных при различных температурах; мало внимания уделено описанию фазовых состояний перовскит I и перовскит II, а также самополяризации пленок.

Однако, несмотря на замечания, диссертационная работа Каменщикова М.В. оставляет благоприятное впечатление и представляет законченное научное исследование.

Научная и практическая значимость результатов

Рассмотренная диссертация является серьезной научной работой, относящейся к области фундаментального исследования новых функциональных материалов, и полностью соответствует паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния. Полученные в диссертации результаты являются новыми и представляют научный и практический интерес.

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные данные позволяют расширить имеющуюся научную информацию о свойствах сегнетоэлектрических тонкопленочных гетероструктур, а также выработать рекомендации по изготовлению сегнетоэлектрических пленок и структур различного назначения на их основе с характеристиками, пригодными для их практического применения. Результаты работы могут быть использованы для анализа работы управляемых электрическим полем устройств, содержащих сегнетоэлектрические слои.

По теме диссертации с участием автора опубликовано 5 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК. Результаты работы в достаточной мере апробированы на всероссийских и международных конференциях и семинарах.

Основные результаты и выводы диссертационной работы могут быть использованы в таких организациях, как Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПбГТУ (Санкт-Петербург); Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Московский государственный технический университет «МИРЭА», Институт кристаллографии

РАН (Москва), Южный федеральный университет, Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону), Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург), а также на предприятиях электронной промышленности, занимающихся разработкой и производством устройств на основе сегнетоэлектрических пленок.

Таким образом, по актуальности поставленных задач, объему выполненных исследований, научной и практической значимости полученных результатов, диссертационная работа Каменщикова М.В. отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 г. N 842, а ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Автореферат диссертации достаточно полно и правильно отражает основное содержание работы.

Диссертация и отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании кафедры квантовой электроники и оптико-электронных приборов Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина) 20 ноября 2014 года, протокол № 8.

Заведующий кафедрой КЭОП
доктор технических наук,
профессор



В. П. Афанасьев

Профессор кафедры КЭОП,
доктор технических наук,
профессор



А.М. Василевский

197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»,
тел: 8(812)234 31 60; e-mail: vrafanasiev@mail.ru