

## ОТЗЫВ

на диссертационную работу Кусковой А. Н. «Особенности кристаллической и доменной структур и моделирование границы раздела эпитаксиальной системы BST/MgO», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Кусковой А. Н. посвящена исследованиям структуры и границ раздела пленок  $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$  (BST(80/20)) толщиной 2-1500 нм (100), выращенных модифицированным методом магнетронного напыления на подложках MgO, с применением методов просвечивающей электронной и атомно-силовой микроскопии и последующей интерпретацией полученных данных на основе моделирования и статистического анализа электронно-микроскопических изображений. Она состоит из введения, трех глав, выводов и списка литературы из 184 наименований. Ее содержание изложено на 153 страницах, включая 61 рисунок и 4 таблицы.

Во введении диссертации обоснована актуальность выполненного исследования структуры гетерокомпозиции, состоящей из пленки титаната бария-стронция и подложки оксид магния (BST/MgO), приведены цели и задачи, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, описана теоретическая и практическая значимость работы, представлены сведения об апробации работы и основных публикациях.

Тонкие пленки титаната бария-стронция, обладая сегнетоэлектрическими свойствами, сохраняют высокое значение диэлектрической проницаемости в широком диапазоне температур, что дает возможность их применения в качестве диэлектриков для компонентов функциональной микроэлектроники. Улучшение физических характеристик гетероструктур на их основе базируется на детальном изучении кристаллической структуры выращиваемых на подложке пленок и границы раздела на атомарном уровне. Наиболее всесторонне и детально такое изучение может быть выполнено с применением методов просвечивающей электронной и атомно-силовой микроскопии. Возможности электронно-микроскопических методов в последнее время существенно расширились благодаря созданию приборов с коррекцией аббераций объективной линзы, обеспечивающих субангстремное разрешение, а также применению фокусированного ионного пучка для прецизионного приготовления тонких фольг. В силу сложности процесса формирования электронно-микроскопических изображений их корректная интерпретация возможна на основе моделирования, компьютерной обработки и анализа полученных экспериментальных данных.

Первая глава представляет собой обзор литературных данных по тематике диссертации. В ней приведены сведения о сегнетоэлектрических пленках, методах их

получения и механизмах роста, описаны структурные особенности тонких пленок и методы их исследования.

Вторая глава посвящена описанию примененных при выполнении диссертационной работы методов получения и исследования тонких фольг от образцов гетерокомпозиции BST/MgO. В число использованных в диссертации методов входили атомно-силовая и просвечивающая электронная микроскопии. Последняя, являясь основным экспериментальным методом исследований, применялась для получения муаровых картин и высокоразрешающих электронно-микроскопических изображений, интерпретация которых осуществлялась методом анализа геометрической фазы. Исследования атомарной структуры границы раздела между пленкой и подложкой проводились с помощью просвечивающей сканирующей электронной микроскопии.

В третьей главе приводятся результаты исследований структуры пленок и границы раздела между пленкой и подложкой, выполненные методами просвечивающей электронной и атомно-силовой микроскопии, а также с использованием метода молекулярной статики для атомистического моделирования структуры границы раздела в системе BST/MgO.

Для исследования структуры пленок с применением тонких фольг как в планарного, так и поперечного сечений использован метод просвечивающей электронной микроскопии, включая получение высокоразрешающих электронно-микроскопических изображений. Для визуализации дислокационной структуры использовались картины муарового узора. Обусловленные дислокациями поля смещений выявлялись с применением метода анализа геометрической фазы. Для исследования структуры границы раздела на атомарном уровне использовалась просвечивающая сканирующая электронная микроскопия с применением статистического анализа изображений, что позволило детально изучить распределение атомных колонок в системе BST/MgO. Для анализа возможности различных вариантов роста пленок титаната бария-стронция на атомарно гладкой и ступенчатой поверхностях подложки был применен метод молекулярной статики, для реализации которого в рамках известных программных пакетов использовались адаптированные к рассматриваемой структуре потенциалы взаимодействия. Методом атомно-силовой микроскопии изучалась доменная структура пленок BST и изменение сегнетоэлектрических особенностей этой структуры с ростом толщины пленки.

Характеризуя диссертационную работу в целом, следует отметить, что она представляет собой законченное, выполненное на высоком уровне исследование. В ней получены новые результаты о структуре тонких пленок системы BST(80/20)/MgO, основными среди которых являются:

1. Показано, что пленки растут по слоевому механизму, являются монокристаллическими и имеют блочную структуру.

2. Установлено, что релаксация напряжений происходит посредством образования дислокаций несоответствия с векторами Бюргерса  $\mathbf{b} = (\mathbf{a}_{BST}/2) \langle 100 \rangle$ , расстояние между которыми с ростом толщины пленки уменьшается, они приближаются к границе раздела, образуя регулярную дислокационную сетку.

3. На основе детальных исследований атомарной структуры границы раздела, выполненных методами электронной микроскопии и молекулярной статистики, сделан вывод о том, что при наличии ступеней на поверхности подложки плоскостью начала роста может быть слой  $\text{Ba}(\text{Sr})\text{O}$ , а на атомарно гладкой подложке рост начинается только со слоя  $\text{TiO}_2$ .

4. Установлены особенности доменной структуры пленок  $\text{BST}(80/20)$  и ее изменения с ростом толщины пленок.

Экспериментальные и расчетные результаты диссертационной работы получены при непосредственном участии ее автора. Экспериментальные исследования выполнялись с применением хорошо апробированных и обладающих высокой степенью достоверности методов просвечивающей электронной и атомно-силовой микроскопии. Для обработки экспериментальных данных и моделирования использовались известные методы и программные пакеты. Основные результаты и научные выводы основываются на взаимодополняющих экспериментальных и расчетных данных.

Основные научные положения и результаты диссертации опубликованы в 20 работах, включая 15 тезисов докладов на различных конференциях и симпозиумах и 5 статей, 4 из которых входят в список реферируемых журналов ВАК.

В диссертационной работе имеется ряд недочетов, перечисленных ниже.

1. Исследования возникающих в тонких пленках полей смещений, выполненные методом анализа геометрической фазы в ряде случаев приводят к трудно интерпретируемым результатам, что, по-видимому, связано с высокими требованиями к качеству изображений, необходимому для эффективного применения этого метода. Поэтому полученные с его помощью данные следовало дополнить изучением дефектной структуры методом дифракционного электронно-микроскопического контраста.

2. При исследовании границы раздела между пленкой и подложкой методом просвечивающей сканирующей электронной микроскопии не принималось во внимание влияние контраст ступеней на поверхности подложки, расположенных в направлении распространения электронного пучка вдоль атомной колонки. Учет наличия таких ступеней может внести коррективы в предложенное в диссертации описание структуры границы раздела.

Отмеченные недостатки не влияют на значимость полученных в диссертационной работе результатов и ее общую положительную оценку.

Текст автореферата полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Кусковой А.Н. полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, и ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой общей физики  
Национального исследовательского университета «МИЭТ»

Н.И. Боргардт

Подпись Н.И. Боргардта заверяю,  
Ученый секретарь МИЭТ,  
кандидат технических наук, профессор



Н.М. Ларионов

Сведения о месте работы оппонента:

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, дом 5.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Заведующий кафедрой общей физики

Телефон: (499) 720-85-58

Электронная почта: borgardt@miee.ru