

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Дементьевой Марии Михайловны
«Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия для контроля локального изменения химического и фазового составов тонких пленок под действием низкоэнергетического ионного облучения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность темы исследования

Широкое развитие нанотехнологий в различных областях техники, в том числе – современной микроэлектронике, требует миниатюризации элементов функциональных структур, которая позволит увеличить плотность заполнения элементами поверхность и число отдельных устройств, формируемых на единой подложке, что приведет к существенному повышению экономической эффективности производства таких устройств. В связи с этим требуется развитие высокопроизводительных и эффективных технологий создания наноразмерных функциональных элементов, которые позволят уменьшить число технологических операций при формировании функциональных схем. В настоящее время достигнут существенный прогресс в использовании радиационных методов модифицирования материалов для создания различных функциональных наноструктур, в связи с чем одним из эффективных способов достижения такой цели являются радиационные методы направленной модификации состава и свойств материалов под действием ионного облучения. Они являются высокопроизводительными, т.е. позволяющими производить одновременное изменение свойств материалов на больших площадях, в том числе многослойных структурах, за времена от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от типа превращения и характеристик устройства. Из-за небольшой толщины используемых слоев (5–30 нм) при проведении подобных преобразований энергии ионов невелики и лежат в пределах от десятков электронвольт до нескольких килоэлектронвольт.

В связи с вышеотмеченным, установление процессов радиационно-индуцированных преобразований свойств материалов под действием ионного облучения и сопровождающих эти процессы фазовых превращений по глубине тонкопленочных материалов аналитическими методами просвечивающей электронной микроскопии, и развитие модели радиационно-индуцированных преобразований свойств тонкопленочных материалов путем экспериментального определения коэффициента диффузии и энергии ее активации, контролирующих удаление выбитых атомов на стоки под действием ионного облучения, является *актуальным* направлением исследований.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка цитируемой литературы из 144 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, сформулированы цель работы и решаемые задачи, указаны новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава работы является обзорной по анализу литературных данных по взаимодействию ионов с различными энергией и массой с материалами, который показал, что использование ионного облучения решает широкий класс задач по преобразованию свойств материалов в зависимости от параметров облучения, причем особняком стоит радиационная технология селективного изменения атомного состава и свойств под действием ионного облучения с энергией в диапазоне 0,1–4 кэВ.

Во второй главе приведены исследованные материалы и перечислены использованные методики исследований, включая разработанную автором методику определения значений энергии активации и коэффициента радиационно-стимулированной диффузии, которая направлена на получение прямых экспериментальных данных по параметрам кинетической модели, описывающей радиационно-индуцированное преобразование свойств – энергии активации радиационно-стимулированной диффузии и коэффициента диффузии, контролирующих уход удаляемых атомов на стоки.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований протекания процесса селективного удаления атомов (СУА) в тонкопленочных материалах Co_3O_4 , WO_3 , CuO под действием протонного облучения с энергией 1 кэВ и расчетные данные, способствовавшие развитию кинетической модели процесса СУА, а также экспериментальные результаты фазовых превращений в тонких пленках под действием облучения при различных температурах до разных доз.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования селективного замещения атомов (СЗА) при облучении тонких сверхпроводящих пленок NbN смешанными ионными пучками (H^+ , OH^+) и ионами кислорода низких энергий с целью изучения эволюции структурно-фазового состояния и элементного состава по глубине пленок, а также связанное с этим соответствующее изменение их электрофизических свойств. При анализе ПЭМ изображений высокого разрешения установлено, что в ходе проведения смешанного облучения при дозе облучения 1 и 2 сна (по азоту) фазовый переход, обусловленный протеканием процесса СЗА, сопровождается выделением фаз моноклинной сингонии разного состава.

В пятой главе решена задача создания слоя оксида алюминия на поверхности металлического алюминия с использованием метода селективного соединения атомов под действием облучения ионами кислорода, определен диапазон энергий ионов кислорода, позволяющий сформировать слой оксида достаточной толщины и не допустить существенного распыления алюминия при использованных дозах облучения.

Наиболее важные результаты, полученные в работе, и их новизна

К наиболее важным и новым научным результатам диссертационной работы относятся впервые полученные дозовые зависимости изменения химического и фазового составов по глубине тонкопленочных материалов в процессе протекания радиационно-индуцированных преобразований и определенная дозовая зависимость плотности свободных электронов на уровне Ферми по глубине мишени в процессе облучения тонкопленочного нитрида ниобия ионами кислорода малых энергий в ходе протекания процесса селективного замещения атомов.

Впервые продемонстрирован немонотонный характер восстановления оксидов металлов по глубине мишени в процессе протекания селективного удаления атомов под действием протонного облучения при малых и промежуточных дозах облучения.

Впервые разработана методика экспериментального определения величины энергии активации и коэффициента радиационно-стимулированной диффузии удаляемых атомов на стоки при их селективном удалении под действием ионного облучения и определены значения энергии активации и коэффициента радиационно-стимулированной диффузии выбитых атомов кислорода в процессе селективного удаления атомов из оксида кобальта под действием протонного облучения.

Научная и практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследований, основанные на обнаруженной немонотонности распределения фазового состава и физических свойств по глубине тонкопленочных материалов в процессе селективного удаления атомов, могут стать альтернативной основой для создания многослойных наноразмерных функциональных устройств. Полученные экспериментальные данные величин энергии активации и коэффициента радиационно-стимулированной диффузии выбитых атомов позволяют прогнозировать распределение свойств функциональных наноэлементов, создаваемых радиационными методами, и необходимы при моделировании сложных интегрированных наноструктур.

Полученные экспериментально результаты дозовой зависимости изменения химического и фазового составов в тонких пленках NbN под действием смешанно-

го облучения использованы при создании бесконтактного криогенного переключателя и интегрированных криогенных сопротивлений.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывают сомнения. Они обоснованы большой базой полученных экспериментальных результатов и усовершенствованной кинетической моделью селективного удаления атомов. Использование современного просвечивающего электронного микроскопа с атомным разрешением, оснащенного спектрометром энергетических потерь электронов, позволило оценить распределение элементов, фазовый и химический состав, а также физические свойства по глубине тонкопленочных материалов.

Основные результаты диссертационной работы отражены в 26 публикациях, включая 8 статей в рецензируемых изданиях ВАК РФ, и прошли апробацию на множестве Международных и Российских научных конференциях.

Диссертация Дементьевой М.М. выполнена на высоком научном уровне. Диссертация и автореферат написаны технически грамотным языком. Соискателем квалифицированно изложены результаты и сформулированы выводы проведенного исследования.

Автореферат и опубликованные автором работы соответствуют содержанию диссертации.

Поставленная цель и решаемые задачи полностью выполнены, выводы соответствуют поставленной цели.

Вместе с тем, по работе имеются следующие замечания.

1. Работа выполнена с использованием наноразмерных объектов. В связи с этим желательно было бы проанализировать, как влияют изменения физических (например, в разы снижается температура плавления по сравнению с массивным телом, ОЦК металлы приобретают ГЦК структуру и т.д.), механических, электромагнитных свойств на полученные результаты.

2. На стр. 85 на рис. 3.12 представлено изменение пика кислорода по данным РФЭС анализа при различных дозах облучения ионами H^+ в интервале доз $(0,03-0,7) \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$, но не показан вид сигнала для кислорода при максимальной дозе облучения $1,4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$.

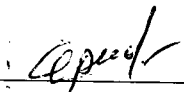
3. В диссертации использованы разные системы единиц измерения: метр, сантиметр, см^{-2} и смещение на атом и т.д., а все должно быть использовано в системе «СИ».

Указанные замечания не носят принципиального характера и не влияют на ценность полученных в работе научных результатов.

Диссертация Дементьевой М.М. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой рассмотрены и решены актуальные задачи в области использования современных приборов и методик в материаловедении, изложены новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для дальнейшего развития нанотехнологий и вносят значительный вклад в развитие страны. Тематика диссертации соответствует паспорту научной специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики». Диссертация по своему содержанию и оформлению удовлетворяет критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней согласно п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№ 842, от 24 сентября 2013 г.), а ее автор Дементьева Мария Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (01.04.07 – Физика конденсированного состояния), профессор, профессор отделения ядерной физики и технологий офиса образовательных программ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»


Чернов Иван Ильич

«23» сентября 2019 г.

Адрес: 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31

Тел.: +7 (495) 788-56-99, доб.92-72

Факс: +7 (495) 324-31-65

E-mail: i_chernov@mail.ru

Подпись официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Чернова Ивана Ильича заверяю:

