

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Гайсина Айдар Ураловича на тему: «Формирование межфазной границы в многослойных наноструктурах Mo/Si и Mo/Be: влияние барьерных слоев и температуры отжига на ее состав, протяженность и отражающую способность зеркал», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Гайсина Айдар Ураловича посвящена исследованию межфазной границы в многослойных наноструктурах на основе пар Mo/Si и Mo/Be, используемых в качестве рентгенооптических элементов, изучению влияния барьерных слоев и условий отжига на состав и протяженность межфазных границ в этих структурах. Работа представляет собой законченное исследование на основе данных, полученных методом фотоэлектронной рентгеновской спектроскопии, в том числе с использованием высоких энергий, дополненных метрологическими измерениями отражательной способности зеркал и численным моделированием процессов нанесения многослойных наноструктур.

Структура диссертационной работы:

Диссертационная работа Гайсина Айдар Ураловича состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 189 наименований. Содержит 138 страниц машинописного текста, включая 34 рисунка.

Во введении обосновывается актуальность области исследования и объектов исследования, сформулирована общая цель и основные задачи работ, приводится обоснование новизны, приводится описание научной и практической значимости полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту, перечисляются научные конференции, на которых была проведена апробация работы и описывается структура самой работы.

Первая глава посвящена обзору литературы с общими сведениями о многослойных интерференционных структурах: физические принципы работы, методы осаждения, проблематика, методы исследования многослойных интерференционных наноструктур.

Во второй главе описывается техника эксперимента, установка магнетронного напыления и исследуемые образцы.

В третьей главе рассмотрено применение рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии к изучению многослойных наноструктур на основе пар Mo/Si и Mo/Be: проанализирован состав межслоевых областей модельных систем и дана оценка их протяженности, исследовано влияние порядка напыления и числа периодов на протяженность межслоевых областей, обсуждены механизмы их формирования.

В четвертой главе обсуждается влияние введения барьерных слоев на формирование межслоевой области в многослойных наноструктурах: обсуждены наиболее подходящие материалы в качестве барьерных слоев, проанализированы возможные продукты реакции в межслоевой области, изучен состав межслоевых областей в многослойных зеркалах с барьерными слоями.

В пятой главе исследуется термическая стабильность многослойных Mo/Be наноструктур. Продемонстрирована связь между составом межслоевой области и оптическими параметрами многослойных наноструктур.

В заключении диссертации приводятся основные результаты работы.

Следует отметить, что содержание проведенных исследований, как это следует из анализа основных – третьей, четвертой и пятой – глав диссертации, соответствует паспорту специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертационной работы определяется как выбранными объектами исследований, так и применяемыми современными методиками диагностики материалов, в том числе с использованием лабораторных установок и установок мега-класса. В диссертации выстроена логичная и последовательная цепочка экспериментальных исследований, нацеленная на изучение состава и протяженности межслоевой области в многослойных наноструктурах Mo/Si и Mo/Be без/с барьерными слоями в зависимости от их материала и условий отжига.

Наиболее интересными результатами работы, которые могут быть важными для практического применения, представляются основанные на проведенном исследовании структуры межслоевой области в многослойных зеркалах Mo/Si и Mo/Be выводы:

- Проведенная теоретическая оценка возможных межфазных реакций и продуктов их взаимодействия позволила выявить основную идею введения барьерного слоя: необходимость замыкания оборванных связей, и тем самым предотвращение химических реакций материалов соседних слоев. Образованные в результате соединения являются более устойчивыми по сравнению с барьерным слоем. Проведенный теоретический и экспериментальный анализ продуктов взаимодействия слоев указывает на возможность аргументированного предсказания наиболее эффективных материалов барьерного слоя.
- Образование соединений молибдена (карбида молибдена, силицида молибдена) при нанесении на него барьерного слоя приводит к снижению скорости тепловой диффузии молибдена в бериллий, что потенциально увеличивает диапазон рабочих температур многослойной рентгеновской на основе молибдена и бериллия.

- Активное окисление приповерхностной области многослойной Ве/Мо наноструктур происходит за счет миграции кислорода из оксида молибдена через взаимодействие с интерметаллидными соединениями в межслоевой области и низкотемпературного механизма окисления слоя бериллия (миграции катионов, происходящая под влиянием потенциала, создаваемого на растущей оксидной пленке).

Новизна работы определяется тем, что основная часть экспериментальных результатов получена впервые, а именно: многослойные наноструктура Мо/Si с барьерным слоем кремния, многослойные зеркала Мо/Ве без/с барьерными слоями впервые измерены методом РФЭС.

Достоверность и научная обоснованность полученных результатов и сделанных выводов определяются применением современных подходов и обеспечиваются корректностью постановки задач работы. Для научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, характерна внутренняя непротиворечивость. Выводы диссертации научно обоснованы. Все это определяет научную новизну и значимость результатов, научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и практическую ценность.

Несмотря на высокий уровень работы к ней имеются некоторые замечания:

1. В таблицах 2.1 и 3.4, в рисунках (например, Таблица 2.1 и Таблица 3.4.) не указаны погрешности измеренных величин.
2. Наличие пиков с малой интенсивностью в спектрах рисунков 3.1 и 3.7, как и состоятельность сделанных на их основе выводов вызывает вопрос.
3. В тексте не обсуждено, чем вызваны формы распределений длин пробега атомов в материале подложки, рассматриваемых в параграфе 3.4.
4. Несколько непонятно изменение положения оксидной составляющей в спектрах Ве 1s линий в пятой главе. Исходя из названия пиков на рисунках, можно предположить, что оксид бериллия на поверхности не стехиометричен в рассматриваемых системах до отжига, но в тексте диссертации этот момент не обсужден.
5. Несмотря на хорошее в целом оформление работы, в ней присутствует ряд опечаток и ошибок, в том числе орфографических и пунктуационных.

Тем не менее, сделанные замечания не снижают общей высокой ценности диссертации работы, носят частный характер и не могут повлиять на высокую оценку результатов диссертации. Результаты диссертации Гайсина Айдар Ураловича

опубликованы в 5 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus.

Считаю, что диссертационная работа Гайсина Айдара Ураловича представляет собой завершенное научное исследование, нацеленное на изучение процессов формирования межслоевых областей (состава и протяженности) в многослойных рентгеновских зеркалах Mo/Si и Mo/Be без/с барьерными слоями в зависимости от их материала методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для управления отражательной способностью зеркал. В диссертации получен целый ряд новых научных результатов и решена научная задача, имеющая значение для физики конденсированного состояния.

Диссертация Гайсина Айдара Ураловича на тему: «Формирование межфазной границы в многослойных наноструктурах Mo/Si и Mo/Be: влияние барьерных слоев и температуры отжига на ее состав, протяженность и отражающую способность зеркал» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Гайсин Айдар Уралович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета Солдатов А.В.

Доктор физико-математических наук (01.04.07 - физика конденсированного состояния), Профессор, Научный руководитель направления «Науки о материалах и синхротронно-нейтронные исследования» Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, ул. Сладкова 178/24, тел. 8(863)2199724, soldatov@sfedu.ru

15 марта 2022 г.

Подпись Солдатова А В удостоверяю. Директор МИИ ИМ ЮФУ Бутакова М А

