

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Усачёва Дмитрия Юрьевича на диссертацию 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», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Работа А. У. Гайсина, посвященная исследованиям в области технологии создания многослойных рентгеновских зеркал, безусловно, является важной с прикладной точки зрения в связи с широким использованием таких зеркал в науке и технике. При создании многослойных зеркал, помимо выбора материалов, наибольшее значение имеет строение границы раздела между слоями. Эта граница должна быть максимально резкой. Однако, существующие технологии создания резких границ плохо применимы для промышленного производства. С точки зрения простоты, точности и масштабируемости, наиболее привлекательным является метод магнетронного распыления. Но, к сожалению, формируемые этим методом границы обладают значительной протяженностью. В результате, вполне логичным оказывается выбор задач диссертационной работы, как по изучению структуры и свойств межфазных границ в многослойных структурах, сформированных магнетронным распылением, так и по дальнейшему развитию теоретико-экспериментальных подходов к анализу характеристик межслоевых областей.

Развитие методик диагностики и технологий создания рентгеновских зеркал – задача, безусловно, **актуальная** ввиду модернизации и создания новых источников рентгеновского и синхротронного излучения, как за рубежом, так и в России. Автором диссертации предложен и реализован эффективный подход к анализу характеристик межслоевых областей методом РФЭС. В основе этого подхода лежит систематичный выбор объектов исследования, использование самого современного оборудования, включающего как лабораторные спектрометры, так и станции на источниках синхротронного излучения, максимально точный расчет глубины анализа РФЭС, а также моделирование возможных процессов, происходящих при формировании межслоевых областей, а также при их последующей термической обработке. Среди наиболее важных результатов работы можно отметить определение состава и протяженности межслоевых областей на интерфейсах Mo/Si и Mo/Be, зависимости этих характеристик от порядка

формирования слоев, а также выявление роли барьерных слоев, вводимых на межфазных границах для улучшения характеристик зеркал. Автор убедительно показал, что в случае многослойного зеркала Mo/Be что введение барьерных слоев на границе Be-на-Mo препятствует диффузии молибдена в бериллий, что приводит к расширению диапазона рабочих температур зеркала.

Использование автором прецизионных синхротронных методов измерения в сочетании с моделированием процессов формирования межфазных границ служит свидетельством высокой **достоверности** сообщаемых результатов. Основные результаты работы опубликованы и прошли рецензирование в международных научных журналах. Это подтверждает достаточную **обоснованность** сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций. **Практическая значимость** полученных автором диссертации научных результатов, заключается, прежде всего, в учете и использовании методических наработок автора в исследованиях многослойных систем, а также в использовании выявленной связи между условиями формирования и свойствами межфазных границ для оптимизации технологии изготовления многослойных зеркал методом магнетронного распыления. Описанная в диссертации методология исследований многослойных структур может с успехом применяться для определения связи структуры и свойств широкого класса материалов, в которых ключевую роль играют межфазные границы.

Диссертация построена логично, изложена грамотным языком и хорошо иллюстрирована. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. К сожалению, автору не удалось полностью избежать опечаток, орфографических и грамматических ошибок, а также не всегда ясных формулировок.

Помимо этого, можно упомянуть следующие недочеты:

1. На стр. 62 указано, что для оценки толщин слоев, "была использована ранее разработанная в нашей лаборатории модель". При этом нет ни описания модели, ни ссылки на публикацию. Чем эта модель отличается от представленных в литературе моделей? Неясно как вычислялась погрешность толщин.
2. На рис. 3.10 видно, что распыленные атомы Mo имеют различные энергии вплоть до нулевой. При этом глубина проникновения Mo в Be по результатам моделирования не бывает менее 7 ангстрем. На первый взгляд, это противоречит здравому смыслу, поэтому требует пояснения.
3. В выводах на стр. 73 утверждается, что "оценка глубин проникновения атомов путем численного моделирования наглядно объясняет асимметрию протяженности

межслоевой области". Однако не указано, что понимается под асимметрией протяженности, а также как именно ее объясняет моделирование.

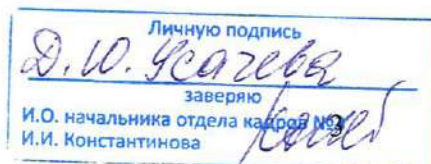
4. Одним из результатов работы является «методика» использования РФЭС для неразрушающего послойного анализа многослойных зеркал. В работе приведены примеры такого анализа, однако отсутствует четкая формулировка методики. То же относится и к модели расчета протяженности межслоевых областей. Неясно, в чем состоит отличие методики (и модели) от общеизвестных методов (и моделей) используемых для РФЭС-анализа слоистых систем.

Отмеченные выше недочёты не снижают научной ценности работы и не влияют на общее положительное впечатление от диссертационной работы, которая выполнена на высоком экспериментальном уровне. По **актуальности** темы, **объему** и **достоверности** экспериментальных результатов, **глубине** и **значимости** выводов работа полностью советует уровню диссертации на соискание степени кандидата наук. Полученные автором результаты опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях и многократно им представлены и обсуждены на международных конференциях. Уровень публикаций достаточно высокий. В ключевой публикации по теме диссертации А.У. Гайсин является первым автором, что свидетельствует о значительном **личном вкладе автора** в приведенные в диссертации исследования.

Считаю, что диссертация Гайсина Айдара Ураловича на тему: «Формирование межфазной границы в многослойных наноструктурах Mo/Si и Mo/Wc: 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 специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор Санкт-Петербургского  
государственного университета

Дата 25.03.2022



25.03.2022

