

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Сахоненкова Сергея Сергеевича на тему «Изучение влияния материала барьерного слоя и температуры отжига на процесс формирования межслоевых областей в многослойных короткопериодных рентгеновских зеркалах на основе бериллия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Работа С. С. Сахоненкова, посвященная исследованиям в области технологии создания короткопериодных 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 границ с малой протяженностью 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. Особенно сильно этот недостаток сказывается на характеристиках короткопериодных многослойных зеркал, где протяженность границ может оказаться сопоставимой с периодом структуры, что приведет к значительному снижению отражательной способности. В результате, вполне логичным оказывается выбор цели и задач диссертационной работы, как по изучению состава и протяженности переходных областей в многослойных структурах, сформированных магнетронным распылением, так и по теоретико-экспериментальному анализу процессов формирования межфазных границ, а также изучению влияния барьерных слоев.

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 реализован эффективный подход к анализу характеристик переходных областей набором взаимодополняющих методов. В основе этого подхода лежит систематичный выбор объектов исследования, включая как модельные структуры, так и реальные зеркала, использование самого современного оборудования, включающего как лабораторные спектрометры, так и станции на источниках синхротронного излучения, а также моделирование возможных процессов, происходящих при формировании

переходных областей, а также при их последующей термической обработке. Среди наиболее важных результатов работы можно отметить определение состава и протяженности переходных областей на интерфейсах W/Be и Si/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 W/Be введение барьерных слоев карбида бора улучшает отражательные характеристики и повышает температурную стабильность 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 короткопериодных многослойных зеркал методом магнетронного распыления.

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 ошибок, и неудачных формулировок, которые, однако, не затрудняют чтение.

Помимо этого, можно упомянуть следующие недочеты:

1. Подпись к таблице 2.5 не соответствует ее содержанию. В частности, указано, что тип образца указан цветом – красным, зеленым или синим, однако в таблице образцы выделены оранжевым, серым и синим. Отсутствуют обозначения N и d, заявленные в подписи.
2. Отсутствует список сокращений и обозначений. Некоторые аббревиатуры не расшифрованы, например CPS.
3. Некоторые фотоэлектронные спектры выглядят неестественно (в части спектра интенсивность постоянна), например, на рис. 4.8b, спектры Be/Si на рис. 4.6. В большинстве случаев спектры приведены после вычитания фона, что не позволяет читателю оценить разумность использованных моделей фона для различных образцов.

4. Первую главу едва ли можно назвать литбозором. В ней скорее приводится справочная информация. Обзор литературы по теме исследования сильно фрагментирован и распределен по главам, что затрудняет оценку того, какое место занимают полученные результаты среди уже существующих исследований. Целесообразно было бы привести в начале диссертации имеющиеся литературные данные по изучению границ раздела слоев в короткопериодных многослойных структурах, в том числе на основе пар материалов W/Be и Cr/Be.

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, объёму и **достоверности** экспериментальных результатов, глубине и **значимости** выводов работа полностью советует уровню диссертации на соискание степени кандидата наук. Полученные автором результаты опубликованы в четырех статьях в рецензируемых научных изданиях и многократно им представлены и обсуждены на конференциях. Уровень публикаций достаточно высокий. Примечательно, что во всех четырех научных статьях по теме диссертации С.С. Сахоненков является первым автором, что свидетельствует о доминирующем **личном вкладе автора** в изложенные в диссертации результаты исследований.

Считаю, что диссертация Сахоненкова Сергея Сергеевича на тему: «Изучение влияния материала барьерного слоя и температуры отжига на процесс формирования межслоевых областей в многослойных короткопериодных рентгеновских зеркалах на основе бериллия» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Сахоненков Сергей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор СПбГУ



Д.Ю. Усачёв

Дата 06.09.2022г.