

ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Вывенко Олега Федоровича 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.

Объектами исследования в данной работе являются многослойные короткопериодные зеркала на основе пар материалов W/Be и Cr/Be, необходимые для проведения синхротронных исследований в широком диапазоне энергий рентгеновского излучения. Применение таких структур позволяет эффективно подавлять высокие порядки дифракции, за счет различного соотношения толщин поглотителя и разделителя, и работать при больших углах скольжения, что существенно упрощает требования к конструкции спектрометра-монокроматора. Несмотря на высокие теоретические коэффициенты отражения и хорошую спектральную селективность, экспериментально полученные значения оказываются значительно хуже предсказанных, что связано с формированием переходных слоев между слоями ввиду перемешивания, образования химических соединений и шероховатостей. Влиять на протяженность данных слоев, тем самым увеличивая отражательные характеристики зеркал, можно с помощью введения тонких барьерных слоев. В этом смысле, тема диссертации Сахоненкова С.С., посвященная исследованию методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской рефлектометрии формирования переходных слоев и влияния введения тонких барьерных слоев В₄С или Si на их состав и протяженность в многослойных зеркалах W(Cr)/Be представляется несомненно **актуальной**.

Важным достоинством работы, которое определило успех проведенного исследования, является разработка подхода к изучению методом РФЭС различных аспектов формирования переходных слоев в многослойных зеркалах. В нем получены многочисленные экспериментальные данные о химических сдвигах Be-1s, W-4f, B-1s, Si-2p РФЭС спектров, несущие информацию о соединениях, образуемых как в модельных и эталонных системах, так и в многослойных зеркалах, которые привели к выводам об образовании бериллидов разной стехиометрии в зависимости от порядка осаждения, а также продуктов взаимодействия основных слоев с барьерным.

Наиболее важным, на мой взгляд, результатом является обнаружение формирования двух типов бериллидов (W(Cr)Be₂ и W(Cr)Be₁₂) на границе между слоями W и Be в зависимости от порядка нанесения основных слоев. В прикладном аспекте важным результатом работы является установление того факта, что в короткопериодных многослойных зеркалах W/Be происходит полное перемешивание слоев с формированием двух бериллидов, а использование тонких барьерных слоев В₄С или Si позволяет его уменьшить. При этом соединения, сформированные в результате взаимодействия барьерного слоя с основными, обладают лучшими оптическими характеристиками, как следствие происходит увеличение коэффициента отражения зеркал.

Новизна исследования состоит, в первую очередь, в первом систематическом изучении состава переходных слоев в короткопериодных многослойных рентгеновских зеркалах W(Cr)/Be. В нем впервые получены закономерности изменения химических сдвигов

характерных спектров исследуемых элементов при изменении состава переходного слоя, в следствие изменения порядка осаждения слоев и температурных воздействиях. Важным новым достоинством работы является сочетание спектроскопического подхода с материаловедческим, в которой помимо анализа данных РФЭС проведено численное моделирование процесса магнетронного распыления, используемого при синтезе многослойных структур.

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается с одной стороны использованием современной хорошо апробированной экспериментальной измерительной техники, как лабораторной, так и исследовательских станций на каналах вывода синхротронного излучения, а с другой - проведением поэтапного исследования с применением как модельных структур, так и непосредственно многослойных зеркал, что в комбинации позволило получить однозначную информацию о композиционном составе межслоевых областей. Выводы, полученные в этой работе на основе фотоэлектронных измерений, в целом, хорошо коррелируют с данным измерений похожих по свойствам структур.

При знакомстве с диссертационной работой возникли следующие вопросы и замечания:

1. В целом, диссертация содержит подробное изложение полученных экспериментальных результатов, их анализ и интерпретацию. Она хорошо иллюстрирована, написана ясным и доступным языком. Вместе с тем, имеется ряд замечаний, касающихся оформления диссертации.
 - 1.1. Неудачное расположение рисунков по отношению к тексту их обсуждения как, например, рисунок 3.9 на стр. 76 обсуждается в начале страницы 75.
 - 1.2. Имеются опечатки. Например, в таблице 2.5 цвета, указанные в подписи к таблице, не соответствуют используемым цветам.
 - 1.3. Встречаются неудачные фразы: стр.4. «Одним из классов оптических элементов для управления рентгеновскими пучками является многослойное зеркало (МЗ), которое фактически представляет собой искусственно созданный **одномерный кристалл в виде периодической многослойной наноструктуры**».
2. На стр. 61 указано, что поверхность пленки вольфрама предварительно была очищена при помощи травления ионами аргона, что позволило избавиться от естественно образовавшегося оксида. Почему данная процедура не была применена для остальных эталонных образцов?
3. В работе большая часть анализа проводится на основе разложений полученных спектров ФЭС на компоненты. Такая процедура относится математическим классу некорректных задач, которые не имеют однозначного решения, и требуют задания ограничений на решения, которым в данном случае выступает использование параметров формы линий и положения пиков из разложения измеренных $W 4f$ спектров эталонных образцов (рисунок 3.2b). Однако $W 4f$ спектры на этом рисунке содержат малоинтенсивные компоненты оксидов, которые сложно задать однозначно. Отсюда остается непонятным как данный спектр можно использовать в качестве эталонного.

Сделанные замечания не затрагивают основных положений и выводов диссертации. Объем и качество полученных экспериментальных результатов, основанных на совершенном владении сложной экспериментальной техникой и глубоком понимании физико-химических процессов в исследованных структурах, свидетельствуют о высокой научной квалификации диссертанта. Результаты диссертации опубликованы в высокорейтинговых журналах и докладывались на престижных научных конференциях.

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», соискатель Сахоненков Сергей Сергеевич 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.

Председатель диссертационного совета
Доктор физ.-мат. наук,
профессор по специальности физика твердого тела,
профессор СПбГУ

9 сентября 2022 г.



Вывенко О. Ф.