

ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Вывенко Олега Федоровича 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.

Молибденсодержащие многослойные интерференционные наноструктуры широко используются в качестве зеркальных оптических элементов для диапазона длин волн 11,3 – 13,5 нм в различного рода устройствах и технологиях, наиболее известными из которых являются лазеры на свободных электронах, спектрометры для исследований ярких корональных линий железа солнечного излучения, а также для литографии в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне. Вместе с тем, технология получения таких структур еще не позволяет достичь их теоретического значения коэффициента отражения, что вызвано, как правило, нерезкостью границ раздела между нанослоями различного состава. В этом смысле, тема диссертации Гайсина А.У., посвященная исследованию методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) влияния различных факторов на механизм формирования межслоевых областей в многослойных зеркалах представляется несомненно **актуальной**.

Важным достоинством работы, которое определило успех проведенного исследования, является разработка методики использования метода РФЭС, в том числе с использованием высоких энергий возбуждающих квантов, для проведения неразрушающего послойного анализа многослойных рентгеновских зеркал. В ней получены многочисленные экспериментальные данные о химических сдвигах Si-2p, Mo-3d Be-s1 РФЭС спектров, несущие информацию о соединениях, образуемых как в модельных бислоях, так и в многослойных системах, которые привели к выводам об образовании дисилицидов на обеих границах в системах Mo/Si и бериллидов разной стехиометрии в системах Mo/Be, а также продуктов взаимодействия основных слоев и барьерного слоя.

На мой взгляд особый интерес представляет обнаружение формирования двух типов бериллидов (MoBe_2 и MoBe_{12}), характеризующихся разной стехиометрией, на межфазной границе Mo/Be, а также различие в толщине силицида молибдена MoSi_2 на межфазной границе Mo/Si в зависимости от порядка нанесения основных слоев. В прикладном аспекте важным результатом работы является установление факта того, что введение барьерного слоя на межфазной границе как Mo/Si, так и Mo/Be МРЗ предотвращает взаимодиффузию слоев и уменьшает формирование бериллидов и силицидов в той или иной степени в зависимости от его материала и расположения.

Новизна исследований состоит, в первую очередь, в первом систематическом исследовании многослойных рентгеновских зеркал различного состава методом РФЭС, в том числе, ранее практически неизученных бериллийсодержащих наноструктур. В ней впервые получены закономерности изменения химических сдвигов характерных спектров исследуемых элементов при изменении очередности напыления и состава интерфейсов, а также и температурных обработках. Важным новым достоинством работы является

сочетание спектроскопического подхода с материаловедческим, в которой помимо анализа данных РФЭС проведены численные расчеты энергий формирований вероятных соединений.

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается с одной стороны использованием современной хорошо апробированной экспериментальной измерительной техники, как лабораторной, так и исследовательских станций в каналах вывода синхротронного излучения, а с другой - проведением поэтапного синтеза и исследования наноструктур, 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 другими экспериментальными методами на сходных по структуре и свойствам структурах. Достоверность идентификации типов соединений из данных РФЭС подтверждается также корреляцией с выводами на основе численных расчетов вероятных продуктов реакций.

При знакомстве с диссертационной работой возникли следующие вопросы и замечания:

1. В целом, диссертация содержит подробное изложение полученных экспериментальных результатов, их анализу и интерпретации. Она богато и красочно иллюстрирована, написана достаточно 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, спектры на стр. 50 обсуждаются только на с. 52.
 - 1.2. Имеется довольно большое число опечаток. Так, в тексте делается ссылки на рис. 1.1.3 и табл. 2.5.1, которые имеют номера 1.3 и 2.1 соответственно.
 - 1.3. Встречаются неудачные фразы: стр.4. «МРЗ представляют собой искусственно созданные **одномерные** кристаллы в **виде многослойных наноструктур.**»
 - 1.4. Формулировка защищаемого положения 4 требует пояснения, что понимается под асимметрией: «Асимметрия межслоевых областей в многослойных структурах Mo/Si и Mo/Be в наибольшей степени обусловлена механическим проникновением материалов при осаждении и разностью поверхностной свободной энергии между Mo и Be (Si)».
2. Во введении упоминаются «искажения, вносимые экспериментальными установками». Однако, характер подобных искажений в работе детально не освещен.
3. На стр. 49 указывается, что пленка Mo и MoSi₂ была изучена после удаления окисла с поверхности в результате травления ионами Ar⁺. Однако на приведенном спектре рис. 3.2 оксид кремния все же присутствует, что требует пояснения.
4. Многие выводы работы о композиционном составе образцов получены из разложения полученных спектров ФЭС на компоненты. Такая процедура относится математически к 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 Si 2p и Mo 3d спектров эталонных образцов (рисунок 3.2). Однако Si 2p спектры на этом рисунке сами по себе довольно сложны и требуют разложения на составляющие и остается непонятным как они использовались в дальнейшем.

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 и были высоко оценены специалистами на престижных научных конференциях. Следует также отметить, что объем представленного экспериментального материала даже превосходит необходимый для квалификационной работы такого уровня, и несомненно, все полученные наработки будут востребованы следующими поколениями исследователей.

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.

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

Вывенко Олег Федорович

26.03.2022

