

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Павлычева Андрея Алексеевича 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.

Актуальность проведенного А. У. Гайсиным исследования особенностей формирования межфазных границ в многослойных наноструктурах Mo/Si и Mo/Be, которое положено в основу представленной им диссертационной работы, не вызывает никаких сомнений. Многослойные наноструктуры, как хорошо известно, лежат в основе многослойных зеркал, эффективно работающих в диапазоне ультрамягкого и мягкого рентгеновского излучения. Такие зеркала необходимы для создания современных оптических приборов, крайне востребованных в настоящее время и имеющих большую практическую значимость.

Достижение высоких коэффициентов отражения от многослойных зеркал может быть реализовано путем специального подбора чередующихся материалов, обеспечивающих максимально высокий скачок оптических постоянных на межфазной границе для выбранной длины волны электромагнитного излучения. Предшествующие исследования показали, что формирование неоднородных слоев на межфазной границе из-за химического взаимодействия, диффузии атомов и шероховатости поверхности раздела могут существенно сглаживать контрастность границы раздела и, как следствие, уменьшают отражательную способность многослойных рентгеновских зеркал.

Важным достоинством представленной работы является выбор рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), в том числе, фотоэлектронной спектроскопии высоких кинетических энергий фотоэлектронов, в качестве основного метода исследования многослойных наноструктур. Несмотря на то, что РФЭС – общепризнанный метод изучения межфазных границ и химического состояния атомов на поверхности твердых тел,

он является достаточно новым применительно к изучению особенностей формирования многослойных рентгеновских зеркал. В качестве дополнительного метода исследования в диссертации использована рентгеновская рефлектометрия. Совместное применение РФЭС и рентгеновской рефлектометрии позволило эффективно решить поставленные задачи и получить важные результаты о взаимосвязи состава межслоевой области с отражающей способностью зеркал. В качестве конкретных объектов исследования в данной работе выбраны многослойные зеркала нормального падения на основе пар Mo/Si и Mo/Be, используемые на длинах волн 13.5 и 11.4 нм, соответственно.

Изучение процессов формирования, определение состава и протяженности межслоевых областей в многослойных рентгеновских зеркалах Mo/Si и Mo/Be методом РФЭС являются основной целью работы. Для ее достижения А. У. Гайсиным был решен целый ряд сопутствующих /вспомогательных/ задач, а именно, адаптация метода РФЭС к определению толщин слоев многослойных зеркал, теоретическая оценка влияния баллистических процессов на формирование межслоевых областей в многослойных системах, изучение состава и протяженности этих областей, анализ возможных продуктов реакции в зависимости от материала, введенного на межфазной границе барьерного слоя, установление связи между составом межслоевой области и отражающей способностью зеркал и ряд других задач. Следует отметить научную новизну, а также теоретическую и практическую значимость полученных А. У. Гайсиным результатов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она изложена на 138 страницах, включает 34 рисунков и список цитированной литературы, содержащий 189 ссылок. Полученные в диссертации результаты широко представлялись и обсуждались на российских и международных конференциях. По результатам исследования опубликовано 5 статей в рецензируемых зарубежных периодических научных изданиях, индексируемых в международных библиографических базах данных Web of Science и Scopus.

На защиту автор выносит 7 научных положений, среди которых отмечу следующие:

а) методику применения РФЭС для неразрушающего послойного анализа многослойных рентгеновских зеркал, б) обнаружение двух типов бериллидов ( $\text{MoBe}_2$  и  $\text{MoBe}_{12}$ ) на межфазной границе  $\text{Mo/Be}$  и силицида молибдена  $\text{MoSi}_2$  разной толщины на межфазной границе  $\text{Mo/Si}$  и в) модель расчета протяженности межслоевых областей в многослойных наноструктурах на основе измерений интенсивностей фотоэлектронных пиков. Достоверность полученных результатов определяется систематическим характером проведенного исследования, использованием экспериментальных установок экстра класса и современного оборудования, а также их непротиворечивостью и согласованностью с данными теоретических вычислений.

После ознакомления с диссертацией считаю нужным сделать следующие замечания.

Во-первых, автор предполагает, что основной причиной меньших значений отражательной способности многослойных рентгеновских зеркал по сравнению с расчетными значениями является несовершенство межфазных границ, которые полагаются совершенными в расчетах зеркал. Однако, следует иметь в виду, что, когда толщины слоев имеют порядок нескольких нанометров, их оптические постоянные становятся функциями толщины. С ростом толщины электронно-оптические характеристики слоев будут приближаться к соответствующим макроскопическим значениям. Это означает, что не только несовершенство границ, но и особенности электронного и атомного строения наноструктур влияют на отражательные способности зеркал в изучаемом диапазоне длин волн. Насколько значимым, по мнению автора, является указанный фактор? Имеются ли, например, данные о степени кристалличности исследуемых зеркал?

Во-вторых, в диссертационной работе для анализа РФЭС широко используется разложение измеренных фотоэлектронных линий на отдельные компоненты, поведение которых является важным источником информации о формировании межфазной границы.

Для разложения экспериментального сигнала, как указано на стр. 50 (также стр. 58), используется линия Лоренца модифицированной формы  $LF(\alpha, \beta, w, m)$ . Как выглядит соответствующее представление? Почему выбиралось именно такое спектральное распределение сил осцилляторов для электронных переходов? Как объясняется природа асимметрии фотоэлектронной линии в изучаемых объектах?

В заключении отмечу, что сделанные замечания и возникшие у меня вопросы не снижают хорошего впечатления от представленной Гайсиным Айдаром Ураловичем диссертационной работы. Считаю, что:

Диссертация 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 специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета

Д.ф.-м.н, профессор, СПбГУ



Павлычев Андрей Алексеевич

25 марта 2022 г.