

## 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 научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

### **Актуальность диссертационной работы**

Диссертационная работа Сахоненкова С.С. посвящена изучению процессов формирования переходных областей на границах раздела слоев в короткопериодных многослойных структурах на основе пар материалов W/Be и Cr/Be, являющихся основой работы зеркал, работающих в области рентгеновского излучения, определению их состава и протяженности с целью изучения возможности управления отражательными характеристиками данных зеркал. Исследование проводится методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, рентгеновской рефлектометрии и просвечивающей электронной микроскопии. Необходимость детального изучения данной проблемы обусловлена широкой востребованностью высокоэффективных оптических элементов (зеркал), работающих в области рентгеновского излучения, в самых различных областях медицины, материаловедения, химии, биохимии, астрономии, энергетики, аналитического приборостроения и других видах промышленности. Одним из классов оптических элементов для управления рентгеновскими пучками, широко используемых в настоящее время, являются многослойные зеркала, представляющие собой периодические структуры из чередующихся слоев двух (и более) различных материалов и тонких барьерных переходных слоев, предотвращающих перемешивание основных компонентов формируемых слоев и снижение оптического контраста между слоями, что обеспечивает конструктивную интерференцию волн, отраженных от границ раздела слоев, и, соответственно, высокий коэффициент отражения падающего излучения. В качестве объектов исследования в диссертационной работе Сахоненкова С.С. были выбраны короткопериодные многослойные структуры на основе пар материалов W/Be и Cr/Be, которые, согласно теоретическим расчетам, должны обладать высокими коэффициентами отражения и хорошей спектральной селективностью. Применение такого типа зеркал 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 используемых монохроматоров. При этом реальные значения коэффициентов отражения оказываются

существенно ниже теоретически предсказанных. С целью повышения отражательных характеристик формируемых зеркал в рамках проводимой работы были проведены детальные исследования влияния переходных слоев, которые могут существенно повысить отражательные характеристики подобных зеркал. В связи с вышеперечисленным, как по поставленным и решаемым научным задачам, так и по результатам проведенных исследований **актуальность диссертационной работы Сахоненкова С.С. не вызывает сомнений.**

#### **Содержание диссертационной работы**

В рамках диссертационной работы Сахоненковым С.С. проделана большая, кропотливая и важная научно-исследовательская работа, актуальная, в том числе, с практической точки зрения. Представленная работа сочетает в себе как попытки разобраться в физике функционирования слоистых интерференционных зеркал в области рентгеновского излучения, так и в особенностях технологии и принципах их формирования. Получена детальная информация о составе и протяженности переходных областей в многослойных структурах W/Be и Cr/Be, которые являются важными компонентами слоистых интерференционных зеркал, и условий их стабильности, а также о формировании соответствующих переходных слоев в зависимости от порядка их напыления. Изучено влияние тонких барьерных слоев, введенных на границах, на состав и протяженность переходных слоев в многослойных зеркалах. Проанализировано влияние кислорода на формируемые структуры. Изучены и теоретически промоделированы процессы магнетронного напыления зеркал и их оптимизации. Проведено исследование тонких барьерных слоев В<sub>4</sub>С и Si, предотвращающих перемешивание основных компонентов формируемых слоев. Изучено влияние температурного отжига на перемешивание компонентов в многослойных структурах на основе W и Be. Установлено, что отжиг до 300°С не приводит к существенному перемешиванию слоев. Проведена теоретическая оценка влияния различных факторов на степень перемешивания слоев и протяженность переходных областей. Проведен анализ температурного воздействия на отражательные характеристики формируемых многослойных зеркал. В конце работы, в качестве итоговой части, проанализировано влияние изучаемых процессов, а также состава и протяженности слоев на оптические свойства многослойных зеркал.

В целом, проделана большая работа на высоком научно-техническом и аналитическом уровне, причем с выходом результатов работы и проведенного анализа **непосредственно в сферу практического использования.** Работа позволяет сформулировать определенные рекомендации по изготовлению зеркал для достижения максимально

возможных оптических характеристик формируемых зеркал в области рентгеновского излучения.

**Научная новизна и значимость** работы определяются тем, что автор впервые получил ряд интересных и важных научных результатов, среди которых, как наиболее значимые, можно выделить:

Проведен детальный анализ химического строения и протяженностей переходных областей в перспективных многослойных зеркалах W/Be и Cr/Be.

Рассмотрено влияние тонких барьерных слоев  $B_4C$  и Si, введенных между вольфрамом и бериллием, на формирование переходных слоев.

Установлено, что в многослойных структурах с периодом 2 – 2.5 нм происходит полное перемешивание слоев W(Cr) и Be.

Использование тонких барьерных слоев  $B_4C$  и Si в системе W/Be вызывает образование борида/силицида вольфрама и карбида бериллия.

Установлено, что применение  $B_4C$  приводит к улучшению отражательных характеристик зеркала и повышению его температурной стабильности.

#### **Практическая и научная ценность работы.**

Полученные в рамках диссертационной работы результаты имеют очевидную **практическую значимость**. Полученная достоверная информация о структуре переходных областей в системах W(Cr)/Be позволяет развивать подходы и методы к управлению перемешанными межслоевыми областями в короткопериодных многослойных зеркалах. Показано, что в качестве одного из методов для уменьшения перемешивания в системе W/Be возможно применение тонких барьерных слоев  $B_4C$  или Si, которые могут быть также использованы для повышения термической стабильности формируемых зеркал.

**Достоверность полученных в диссертационной работе данных, проведенного анализа и представленных выводов** подтверждается сочетанием используемых экспериментальных методов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии основных уровней, просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской рефлектометрии, стабильностью и воспроизводимостью полученных результатов, полученных на различных установках и в различных экспериментах, а также корреляцией с проведенными теоретическими оценками. Результаты работы прошли апробацию на международных и внутрироссийских научных конференциях.

При этом диссертационная работа не лишена недостатков. По результатам работы можно высказать некоторые замечания:

- Заявляется, что были использованы барьерные слои  $V_4C$  протяженностью 0.1 нм, что меньше размеров атомов В и С и выглядит достаточно странным. Как такие слои могли быть осаждены? Требуется пояснение.

- В работе проводится оценка стехиометрии эталонных образцов на основе анализа интенсивностей фотоэлектронных пиков. Как известно, интенсивность фотоэлектронного пика складывается из интенсивностей главного фотоэлектронного пика и так-называемых «внутренних спутников» (например, пики встряски). Учитывалась ли интенсивность данных спутников в расчетах?

- Из анализа результатов РФЭС было показано, что после отжига систем при температуре  $300^\circ\text{C}$  не происходит дополнительного перемешивания. В таком случае, в области ПВО в кривых отражения не должно происходить сильных изменений, что послужило бы дополнительным подтверждением к сделанному выводу. К сожалению, в работе эти данные не представлены. Имеются ли они и что из них видно?

- Программа SRIM, в которой было проведено моделирование процесса напыления многослойных структур методом магнетронного напыления, основывается на приближении парных столкновений, которое неприменимо при малых энергиях частиц. В работе рассматривается осаждение атомов с энергиями единицы – десятки эВ. Требуется обоснование применимости данной программы при столь малых энергиях.

### **Заключение**

Высказанные замечания носят частный характер и не затрагивают основных выводов и защищаемых положений. Они не меняют в целом высокую и положительную оценку работы, которая выполнена на достойном научно-техническом уровне, отвечающем современным мировым требованиям.

Автореферат диссертации и опубликованные работы достаточно полно и правильно отражают ее основное содержание.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что она является законченной научно-квалификационной работой, имеет большое практическое значение для науки и техники.

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 научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Профессор  
Санкт-Петербургского  
государственного университета  
доктор физ.-мат. наук



/Шикин Александр Михайлович/

Дата · 06.09.2022