

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН  
к.ф.-м.н.



О.А. Алексеева

«15» ноября 2018 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Свечникова Михаила Владимировича «Диагностика внутреннего строения многослойных рентгеновских зеркал по данным рефлектометрии в рамках расширенной модели», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

### **Актуальность работы.**

Многослойные рентгеновские зеркала в настоящее время активно применяются в различных областях науки и техники. Среди них отметим следующие: использование данных рентгенооптических элементов в качестве монохроматоров и анализаторов жёсткого и, особенно, мягкого рентгеновского излучения. Использование их же в рентгеновской микроскопии и рентгеновской астрономии и, наконец, в последние годы, применение этих зеркал для рентгеновской литографии. Геометрия зеркал, в зависимости от их назначения, может значительно различаться. Однако, во всех случаях чрезвычайно важным остаётся проблема создания совершенных многослойных покрытий. Ясно, что эта проблема не может быть решена без создания и использования средств метрологического контроля для анализа этих изделий. На решение этой проблемы и ориентирована рассматриваемая диссертационная работа. Ясно, что таким образом она является весьма актуальной.

### **Научная новизна результатов.**

1. Автором предложен метод анализа шероховатости поверхности подложек для многослойных зеркал, имеющих сложный профиль. Этот метод основан на применении интерферометрии с дифракционной волной сравнения для изучения шероховатости среднечастотного диапазона (латеральные размеры рельефа 1 мкм – 1 мм). Проведенные автором эксперименты, полностью подтвердили надёжность предложенного подхода.

2. Автором разработан метод и разработано программное обеспечение позволяющее описать структуру интерфейсов многослойных покрытий с помощью аналитических функций, моделирующих особенности процессов напыления этих покрытий и образования переходных слоёв на границах их раздела. Этот метод был им применён для анализа структур и

ряда многослойных покрытий.

3. Автором изучены строение ряда перспективных многослойных покрытий для мягкого рентгеновского диапазона длин волн. Эти покрытия имеют ряд преимуществ по сравнению с применяемыми в настоящее время.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации.**

В качестве теоретической и практической значимости проведенных М.В. Свечниковым исследований необходимо отметить, что они стали основой для разработки методики калибровки интерферометров белого света, применяемых для изучения в среднечастотном диапазоне шероховатости, что позволяет повысить точность измерений шероховатости подложек для изображающей рентгеновской оптики.

Соотношения, устанавливающие связь между степенью полиномов Цернике, используемых при аппроксимации рельефа поверхности и максимальной отображаемой пространственной частотой рельефа, и результаты численного моделирования влияния флуктуаций интенсивности лазера, разности фаз волновых фронтов и пиксельных шумов регистрирующей матрицы на предельную пространственную частоту и точность восстановления волновых фронтов, стали составной частью уникальной методики, разработанной в ИФМ РАН по изучению шероховатости и формы поверхности, и аберраций оптических систем с помощью фазосдвигающей интерферометрии с дифракционной волной сравнения. С использованием этих результатов разработаны зеркала для рентгеновского микроскопа, стенда нанолитографа с рабочей длиной волны 13.5 нм, опытных образцов телескопов для изучения Солнца (в интересах ФИ РАН им. П.Н. Лебедева) и мониторинга ближнего космоса в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн (ЦНИИмаш).

Программа для реконструкции внутреннего строения МРЗ по данным рентгеновской рефлектометрии, основанная на разработанной модели, является мощным инструментом анализа и уже заменила ее аналоги для изучения МРЗ в ИФМ РАН. С её помощью получен ряд новых данных о ранее изготовленных и вновь разрабатываемых МРЗ.

Продемонстрированные рекордные коэффициенты Mo/Be/Si МРЗ на длине волны 13.5 нм представляют огромный интерес для литографических применений в силу ожидаемого значительного экономического эффекта.

Зеркала на основе Be/Al, которые показывают рекордно высокие коэффициенты отражения при высокой спектральной селективности, станут основой для следующих космических миссий по изучению Короны Солнца в диапазоне длин волн 17.1–30.4 нм.

#### **Основное содержание и замечания по диссертации.**

Во введении М.В. Свечников обосновывает актуальность темы диссертации, определяет цель, формулирует задачи, отмечает научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, формулирует положения, выносимые на защиту.

В первой главе автором приводится обзор, отражающий современное состояние исследований по теме диссертации. С использованием большого числа литературных ссылок и иллюстраций анализируется влияние

шероховатостей различного масштаба на коэффициенты отражения и изображающие свойства зеркальных систем. Подробно останавливается на проблемах метрологии шероховатости среднечастотного диапазона. Далее М.В. Свечниковым приводится краткий обзор подходов к численному решению обратной задачи рефлектометрии. Анализирует недостатки существующих подходов. В заключении главы автор диссертации анализирует проблемы применения традиционных многослойных рентгеновских зеркал для изучения излучения короны Солнца в окрестности  $\lambda \approx 17$  нм и для литографии на длинах волн  $\lambda = 11.2$  нм и  $\lambda = 13.5$  нм. Показаны требования к величине отражения, к ширине спектральной полосы пропускания, к временной стабильности отражающих покрытий. Обосновывается высокая перспективность исследуемых зеркал на основе бериллия для этих задач.

Вторая глава диссертации М.В. Свечникова посвящена вопросу практического применения интерферометрии с дифракционной волной сравнения (ИДВС) для измерения среднечастотного рельефа сверхгладких подложек. Описывается предложенный им подход и приводятся результаты эксперимента по изучению шероховатостей среднечастотного диапазона, и сравнение в области пересечения рабочих диапазонов с данными атомно-силовой микроскопии. Выводится формула, устанавливающая связь между степенью старших полиномов Цернике в наборе, используемом при аппроксимации поверхности, и максимальной отображаемой пространственной частотой поверхностного рельефа. Изучается влияние факторов, связанных с шумами пикселей регистрирующей интерферограмму камеры, интенсивности лазера и флуктуации фазы сферического фронта, воздействующих на фазосдвигающий интерферометр, на точность восстановления исследуемого волнового фронта.

Третья глава диссертации посвящена решению обратной задачи рефлектометрии, в части численной реконструкции одномерной структуры МРЗ по набору кривых рентгеновского отражения. Для решения этой задачи М.В. Свечников предлагает расширенную модель многослойного зеркала, представляющую переходные области между слоями в виде линейной комбинации функций, часто используемых при описании переходных областей, а параметрами подгонки выступают коэффициенты при этих функциях. На численных примерах и реальных зеркалах иллюстрируются преимущества этого подхода по сравнению с модельными подходами других авторов. Описывается написанная автором программа для численной реконструкции МРЗ по рефлектометрическим измерениям, основанная на разработанном им подходе.

Четвертая глава диссертации посвящена практическому исследованию Ве-содержащих многослойных зеркал ЭУФ диапазона с помощью рефлектометрической техники как основного метода. Приводится краткое описание экспериментального оборудования, с помощью которого были синтезированы и исследованы образцы МРЗ. Описываются результаты исследований двухкомпонентных зеркал Ве/Al и зеркал с прослойками кремния Ве/Si/Al, Al/Si/Ве, Si/Al/Si/Ве, предназначенных для длины волны

17.1 нм. Анализируется влияние Si прослоек на коэффициенты отражения и межслоевую шероховатость зеркал. Проводится сравнительное исследование внутренней структуры и отражательной эффективности Mo/Be структуры, а также с тонкими прослойками В4С, С и Si, представляющих интерес для фотолитографии на  $\lambda=11.2$  нм. Далее детально исследуются Mo/Be/Si МРЗ для задач фотолитографии на длине волны 13.5 нм. Приводятся результаты исследований четырёх образцов с периодами структур 6.95–7.06 нм с использованием рефлектометра на синхротроне BESSY-II в диапазоне длин волн 12,7-14 нм. Показано, что все исследованные структуры на длине волны 13.5 нм при углах падения, близких к нормали, имеют коэффициенты отражения выше 71%. Эти результаты представляют значительный интерес для ЭУФ литографии.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы.

Основными результатами выполненных исследований являются:

1. Предложено применение интерферометрии с дифракционной волной сравнения для изучения шероховатости среднечастотного диапазона (латеральные размеры 1 мкм – 1 мм). Создан экспериментальный стенд ИДВС и проведены эксперименты, подтвердившие работоспособность принципов, заложенных в основу предложенного метода. Получен спектр шероховатости тестовой подложки в диапазоне 0.0017–0.05 мкм-1, среднеквадратическая эффективная шероховатость составила 0.8 нм. Выявлены и проанализированы ограничения интерферометра, не позволившие экспериментально наблюдать в одном кадре весь требуемый диапазон латеральных масштабов рельефа.

2. Разработана модель МРЗ для восстановления его внутреннего строения по данным рентгеновской рефлектометрии, в которой межслоевые области (интерфейсы) представлены в виде линейной комбинации набора функций, соответствующих физическим процессам, протекающим при формировании интерфейсов. Предложенная модель, помимо формального описания кривых отражения, даёт качественное представление о физических процессах на границах, протекающих в МРЗ.

3. На основе разработанной модели написана программа для восстановления структурных параметров МРЗ по данным рентгеновской рефлектометрии. Этот инструмент рефлектометрической реконструкции предназначен для широкого круга пользователей. Данную программу также отличает возможность проводить реконструкцию каждой структуры по произвольному количеству рефлектометрических кривых одновременно.

4. Показано, что для МРЗ на основе Be/Al, оптимальных в спектральном диапазоне 17.1–20 нм, возрастание коэффициента отражения на  $\lambda=17.14$  нм с 46% для чистого Be/Al МРЗ до рекордных 61% для Be/Si/Al МРЗ с прослойкой Si толщиной 1 нм связано с уменьшением протяженности интерфейсов с 1.3 нм до 0.5 нм.

5. Показано, что в окрестности длины волны 11 нм бинарное Mo/Be МРЗ является наиболее высокоотражающим среди структур Mo/Be, Mo/Be/Si, Mo/Be/C, Mo/Be/B4C. Его отражение составляет рекордные

70.25±0.1%. Изучено влияние прослоек на внутреннее строение МРЗ. Элементарная ячейка Mo/Be МРЗ обладает сильной асимметрией: протяжённость интерфейса Mo-on-Be составляет 0.67 нм, а интерфейса Be-on-Mo – 0.33 нм. Субнанометровые прослойки C и B4C в Mo/Be МРЗ приводят к увеличению межслоевой шероховатости, а прослойка Si межслоевую шероховатость уменьшает. Протяжённость интерфейса Be-on-Mo улучшается с 0.33 в Mo/Be до 0.28 нм в Mo/Be/Si МРЗ.

6. Показано, что трехкомпонентное Mo/Be/Si МРЗ обладает наивысшим пиковым отражением среди всех известных структур в диапазоне длин волн 12.5–14 нм. Рекордный коэффициент отражения на длине волны 13.5 нм составил 71.8±0.1%, а на длине волны 12.9 нм – до 72.8±0.1%. Выявлено, что в Mo/Be/Si структурах с толстым слоем Si (2.5–2.7 нм) протяжённость интерфейса Be-on-Mo оказалось меньше, чем в МРЗ с тонкой прослойкой Si (0.5 нм) и составила 0.22 нм.

Текст автореферата не лишен стилистических ошибок:

1. На стр. 6 вводится аббревиатура МИС – многослойная интерференционная структура, однако в дальнейшем она нигде не используется.

2. На стр. 6 приводится утверждение «Использование модифицированных коэффициентов отражения вместо френелевских позволяет использовать аналитическое выражение для расчёта и оптимизации периодических МРЗ» не совсем корректно. Этот подход используется не только при расчете периодических МРЗ, но и аperiodических.

3. На стр. 8, строка 20 снизу целесообразно добавить и шероховатость среднечастотного диапазона, так как ее измерение является одной из основных задач диссертации.

4. На стр. 8, строка 9 снизу пропущено слово отражения.

5. На стр. 9, строка 7 сверху допущена ошибка в написании формулы структуры. Вместо Si/Be/Al/Be, должно быть написано Si/Be/Si/Al.

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. Наш взгляд наибольший интерес представляют полученные автором результаты по использованию метода интерферометрии с дифракционной волной сравнения (ИДВС) для измерения среднечастотного рельефа сверхгладких подложек. Однако в автореферате описание физических принципов этого метода не приведено, что затрудняет оценку работы. Возможно это связано с ограниченным объемом автореферата.

2. В третьей главе в литературном обзоре описания методов рентгеновского рассеяния для анализа шероховатости поверхности автор приводит довольно внушительный список публикаций. В нем, однако, отсутствуют три основные работы, где получены используемые далее выражения, а именно:

1) А.В.Виноградов, И.А.Брытов, А.Я.Грудский и др.; под общей редакцией А.В.Виноградова. Зеркальная рентгеновская оптика – Л.: Машиностроение. 1989 – 463с.

- 2) А.В.Виноградов, И.В.Кожевников, Отражение и рассеяние рентгеновского излучения от шероховатых поверхностей, Труды ФИАН, 196, (1989), сс. 18 – 46
- 3) E.L.Church, Fractal surface finish, Appl. Opt., 27, (1988), pp.1518 - 1526
3. Следует также отметить, предложенная автором модель МРЗ для восстановления его внутреннего строения по данным рентгеновской рефлектометрии, в которой межслоевые области (интерфейсы) представлены в виде линейной комбинации набора функций, соответствующих физическим процессам, протекающим при формировании интерфейсов, не является достаточной и единственной. Это понимает и сам автор. Именно по этой причине он привлекает данные электронной микроскопии в сочетании с предложенным им подходом для анализа реального строения ряда многослойных структур, перспективных для использования в качестве зеркал для мягкого рентгеновского излучения.
4. Имеется следующее замечание по оформлению рисунков в диссертации. Хотя подписи в них сделаны на русском языке в теле практически всех рисунков содержится английский текст.
5. Список цитируемой литературы содержит 124 наименования, из которых только 4 на русском языке. При этом большая часть представляет собой английские переводы российских изданий.
6. В тексте диссертации имеется сравнительно небольшое число опечаток и опечаток:
- 1) В разделе Введение, стр. 6, строка 11 снизу – лишнее двоеточие.
  - 2) Стр. 11, 1-я строка сверху, пропущено слово «отражения».
  - 3) Стр. 11, 22-я снизу допущена ошибка в написании формулы структуры. Вместо Si/Be/Al/Be, должно быть написано Si/Be/Si/Al.
  - 4) Стр. 11, 16-я снизу в слове суперполированная – лишний пробел
  - 5) Стр. 18, 3-я строка сверху в слове «прямого» - лишняя буква “s”.
  - 6) Стр. 31, 3-я строка сверху, приведенная формула для оценки разрешающей способности двухзеркальной сферы в общем случае корректна. Правильнее писать примерное равенство.

Сделанные в отзыве замечания не вносят принципиальных изменений в Положения и Выводы, выносимые автором на защиту и не снижают общей положительной оценки работы.

### **Заключение.**

Представляемая работа прошла серьезную апробацию, ее основные результаты неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. По теме диссертационной работы опубликовано 30 научных работ (из них 10 — статьи в рекомендованных ВАК журналах и 20 — материалы конференций).

Автореферат диссертации М.В. Свечникова оформлен в соответствии с требованиями ВАК, написан четким и понятным языком. Он дает достаточно полное представление о содержании диссертации, содержит необходимые формулировки цели и задач исследований, выносимых на защиту положений, научной новизны и практической значимости.

В целом диссертация М.В. Свечникова представляет собой ясную и хорошо оформленную работу. Текст диссертации содержит необходимые иллюстрации и написан ясным и профессиональным языком. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему, и соответствует разделу II Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертация была рассмотрена на заседании Объединённого научного семинара Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (Протокол № 75 от 14.11.2018 г.). Работа отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Свечников Михаил Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

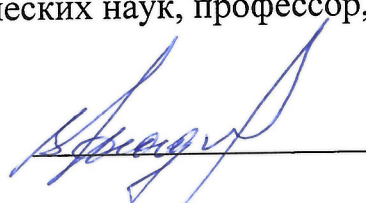
Отзыв подготовили

Заведующий лабораторией рефлектометрии и малоуглового рассеяния Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,

доктор физико-математических наук, профессор,

e-mail: [asad@crys.ras.ru](mailto:asad@crys.ras.ru)

Тел. +7(499)135-22-00



Асадчиков Виктор Евгеньевич

Старший научный сотрудник лаборатории роста тонких пленок и неорганических наноструктур Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,

кандидат физико-математических наук,

e-mail: [amuslimov@mail.ru](mailto:amuslimov@mail.ru)

Тел. +7(499)135-42-40



Муслимов Арсен Эмирбегович

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН).

Адрес: 119333, г. Москва, Ленинский пр., 59. Тел.: +7(499)135-63-11

Оф. сайт: <http://www.kif.ras.ru>, E-mail: [office@crys.ras.ru](mailto:office@crys.ras.ru)