

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Михаила Владимировича СВЕЧНИКОВА "Диагностика внутреннего строения многослойных зеркал по данным рефлектометрии в рамках расширенной модели", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

В последние десятилетия поступательное развитие различных методов рентгеновской диагностики неразрывно связано как с совершенствованием самих источников рентгеновского излучения, так и с разработкой целого ряда элементов рентгеновской оптики. Если говорить об излучении в мягкой рентгеновской (МР) области и в области экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения, то здесь наибольшее внимание исследователей и технологов связано с разработкой высококачественных многослойных рентгеновских структур (зеркал) с повышенными требованиями к точности заданной формы и с возможно минимальными высотами межслойных шероховатостей и переходных слоёв. Именно эти условия только и могут обеспечивать максимально высокие коэффициенты отражения при нормальном падении и дифракционное качество изображений в МР и ЭУФ диапазонах.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что в ней теоретически и экспериментально рассматриваются и анализируются такие принципиальные для данной тематики вопросы как разработка новых методов диагностики поперечного профиля и межслойных шероховатостей многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) по данным рентгеновской рефлектометрии, совершенствование безэталонного метода измерения шероховатости подложек среднечастотного диапазона, а также развитие оригинальной модели и составление программ расчетов для восстановления внутреннего строения МРЗ, причем, что особенно важно, с учетом различных реально существующих физических процессов, которые происходят на поверхности и на межслойных границах в МРЗ.

Структура диссертации классическая. Она состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка используемых сокращений, списка работ автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 148 страницах, включая 87 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 124 наименования библиографии.

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации, цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, практическая значимость, научные положения, выносимые на защиту, и отмечен личный вклад автора.

В первой главе, объемом 22 стр., содержится краткое изложение современного состояния методов создания и диагностики многослойных рентгеновских зеркал. В первую

очередь рассмотрено влияние шероховатостей с различными латеральными размерами на коэффициенты отражения и изображающие свойства МРЗ, а также обосновано наибольшее внимание именно к среднечастотным шероховатостям. На трех простых примерах продемонстрировано, что основной проблемой оптики дифракционного качества для МР и ЭУФ диапазона является разработка таких новых методов полировки подложек, которые обеспечивают ангстремную шероховатость в среднечастотном диапазоне. В разделах 1.2 и 1.3 проводится очень полезный и обстоятельный сравнительный анализ возможностей таких методов измерений среднечастотных шероховатостей как диффузное рассеяние рентгеновского излучения, атомно-силовая микроскопия, интерферометрия белого света, рентгеновская рефлектометрия, электронная микроскопия поперечных срезов и т.д. Сделан вывод о том, что оптические интерференционные микроскопы, широко используемые для измерения среднечастотного рельефа в диапазоне пространственных частот $\sim 10^{-3}$ -1 мкм^{-1} , также обладают рядом недостатков, в связи с чем очень актуальным является создание альтернативного безэталонного метода изучения шероховатостей среднечастотного диапазона. Отмечено также, что по целому ряду причин рентгеновская рефлектометрия является наиболее информативным методом для исследования толщин слоев, ширин и формы профиля переходных областей, шероховатостей и плотностей напыляемых плёнок. В следующих разделах приводятся полезные для дальнейшего сведения о зеркалах ЭУФ диапазона для литографии и астрономии. Отмечено, что в данной работе изучаются МРЗ на основе пары Be/Al , которая ранее не исследовалась и которая обладает одновременно рекордными коэффициентами отражения и спектральной селективностью.

Во второй главе, объемом 33 стр., излагаются оригинальные результаты по дальнейшему развитию метода интерферометрии с дифракционной волной сравнения (метод ИДВС) применительно к изучению среднечастотного рельефа. Этот метод, в основе которого лежит оптоволоконный источник с субволновой выходной апертурой, был предложен ранее (2008 г.) в ИФМ Н.И. Чхало и др. для измерения aberrаций оптических элементов телескопов и объективов с субнанометровой точностью. При обработке экспериментальных данных по PSD-функциям сферической подложки, полученных методами ИДВС и атомно-силовой микроскопии (АСМ), автор убедительно показал, что для расширения диапазона пространственных частот шероховатостей до 0.1 мкм^{-1} необходимо совершенствование известного подхода, использующего полиномы Цернике для описания оптических поверхностей и волновых фронтов оптических систем. В специальном разделе 2.2. получена связь между порядком используемых полиномов

Цернике и частотными характеристиками шероховатой поверхности. В итоге анализа этой проблемы показано, что конечный, даже весьма большой набор полиномов, не может обеспечить правильное представление рельефа во всем среднечастотном диапазоне. Основным результатом главы 2 заключается в выводе об обязательной необходимости использования фазосдвигающей интерферометрии, что и позволит построить карту рельефа в каждом пикселе регистрирующей ПЗС-матрицы без каких-либо разложений. Особо следует отметить, что оппоненту очень понравился доходчивый и наглядно-убедительный стиль изложения и графические иллюстрации центральных для этой главы разделов 2.2.3 и 2.2.4. Крайне полезным считаю проведенный в п. 2.3 анализ влияния на точность метода фазосдвигающей интерферометрии таких шумовых факторов, как ошибки в определении фазового сдвига и флуктуации интенсивности лазера между кадрами серии в отдельно взятом пикселе.

В третьей главе, объемом 32 стр., излагаются результаты по построению адекватной модели многослойной структуры и нахождению ее параметров для наилучшего соответствия расчётных кривых отражения и экспериментальных данных, полученных методом рентгеновской рефлектометрии. В основе данной главы лежит предложенная автором расширенная модель многослойной структуры с функциями переходных слоёв в виде линейной комбинации некоторого заранее заданного набора функций с весовыми коэффициентами, обусловленными вертикальным распределением профилей шероховатостей, диффузией, химическими реакциями и/или механическим перемешиванием атомов в процессе напыления слоев. Просто удивительно, что такая логически простая модель не была предложена ещё ранее. Как и в предыдущей главе, автор вначале приводит некоторые модельные расчеты, которые ярко и убедительно свидетельствуют о том, как, начиная с некоторого угла скольжения, сравнительно небольшие различия в профилях переходных слоев приводят к очень существенным отличиям (вначале в разы, а далее и на 1-2 порядка) в кривых отражения. Основным результатом настоящей главы заключается в том, что использование суперпозиции нескольких базовых функций переходного слоя действительно позволяет автоматически найти вид переходного слоя без необходимости сложного и время затратного поиска профиля для каждой конкретной границы. Весьма полезным для широкого круга возможных пользователей является то, что в п. 3.2 автор достаточно подробно описал возможности и достоинства своей оригинальной программы Multifitting, предназначенной для реконструкции широкого класса МРЗ по данным рентгеновской рефлектометрии в жестком и мягком диапазонах энергий.

В четвертой главе, объемом 30 стр., описаны результаты рефлектометрических исследований многослойных зеркал Be/Al (для длины волны $\lambda = 17.1$ нм) с прослойками кремния и Mo/Be (для $\lambda = 11.2$ нм и 13.5 нм) с разными прослойками. Необходимость таких исследований обусловлена тем, что идеальные МРЗ Be/Al сочетают высокий коэффициент отражения с высокой спектральной селективностью, однако отражение от реальных образцов Be/Al оказалось существенно ниже. В связи с этим особый интерес вызывают исследования по изучению возможностей уменьшения межслойных шероховатостей, для чего были изготовлены четыре серии образцов с различными толщинами прослоек Si, нанесенных на различные границы: Be/Si/Al, Al/Si/Be и Si/Al/Si/Be. Реконструкция параметров МРЗ производилась в рамках представленной в главе 3 модели по угловым кривым отражения с использованием излучения с длинами волн $\lambda=0.154$ нм и $\lambda=17.14$ нм. Показано, что введение прослойки кремния в МРЗ на основе бериллия и алюминия приводит к заметному увеличению отражения, при этом наиболее высокие коэффициенты отражения (61%) реализуются для структуры Be/Si/Al с толщиной кремниевой прослойки примерно равной 1 нм. Это объясняется тем, что добавление тонких слоёв Si приводит к уменьшению межслойных шероховатостей и к появлению более резких интерфейсов (с 1.3 нм до 0.5 нм). Аналогичным образом для структур на основе Mo и Be с добавлением слоев B_4C , C и Si было получено, что максимальный коэффициент отражения реализуется для МРЗ Mo/Be и достигает 70.25% ($\lambda = 11.28$ нм, $\theta = 84^\circ$), что превышает все ранее полученные значения. На основе анализа интенсивности диффузного рассеяния на шероховатостях удалось обнаружить, что добавлении прослоек Si в структуры на основе Mo/Be приводит к уменьшению шероховатости зеркал во всем исследуемом диапазоне пространственных частот, тогда как добавление прослоек B_4C и C приводит к их увеличению.

Основные наиболее существенные результаты диссертационной работы М.В. Свечникова можно сформулировать следующим образом:

1. Для изучения шероховатости среднечастотного диапазона (латеральные размеры в диапазоне 1 мкм – 1 мм) предложен и успешно апробирован метод интерферометрии с дифракционной волной сравнения. Проведенные эксперименты на созданном автором экспериментальном стенде подтвердили работоспособность принципов, заложенных в основу предложенного метода. Выявлены и проанализированы ограничения интерферометра, не позволявшие ранее экспериментально наблюдать в одном кадре весь требуемый диапазон латеральных масштабов рельефа. Установлена связь между

порядком полиномов Цернике и пространственным спектром, который отображается таким разложением.

2. Разработана модель МРЗ для реконструкции его внутренней структуры по данным рентгеновской рефлектометрии, в которой профили интерфейсов представлены в виде линейной комбинации функций, которые соответствуют типичным физическим процессам, протекающим при формировании интерфейсов.

В целом диссертация М.В. Свечникова производит самое благоприятное впечатление. В первую очередь благодаря своей целостности, использованию нескольких взаимодополняющих методов диагностики многослойных рентгеновских зеркал, четкостью и продуманностью как самих экспериментов, так и их теоретической интерпретации, а также обоснованию и разработке оригинальной модели для восстановления внутреннего строения МРЗ по данным рентгеновской рефлектометрии, в которой профили межслойных областей представлены в виде линейной комбинации ряда функций, которые соответствуют физическим процессам, реально протекающим при формировании интерфейсов.

По диссертации можно сделать следующие **замечания**, большая часть из которых носит характер пожеланий и ни сколько не умаляет высокие достижения автора:

1. Интересно было бы сравнить глубины экстинкции, полученные с помощью программы IMD (см. рис. 1.3 на стр. 18), с аналитическими результатами, известными из динамической теории рассеяния.
2. Не совсем понятно, почему автор так категорически утверждает, что “В настоящее время для измерений СШ применяется диффузное рассеяние рентгеновского излучения (ДРРИ) с длиной волны 0.154 нм” (стр. 20), тем самым, как бы, отсекая использование рентгеновских трубок с анодами из других материалов.
3. При описании рис. 2.1. на стр. 37 с одной стороны говорится о необходимости схемы с уменьшением в 1-10 раз, тогда как ниже, почему то, речь идет о коэффициентах увеличения 2.8 и 12.5 в двух последовательных измерениях.
4. Необходимо было бы провести точную оценку справедливости приближения скалярного поля (стр. 37), а не просто сослаться на малую величину числовых апертур ($NA < 0.05$) и небольшое отличие от нормального падения света ($< 5^\circ$).
5. На основе компьютерных расчетов (стр. 48) сделан вывод о том, что при использовании одного и того же порядка полиномов Цернике элементы рельефа, находящиеся ближе к краю, разрешаются лучше, чем такие же элементы, находящиеся ближе к центру.

Желательно было бы привести хотя бы качественное объяснение данному интересному и в какой-то степени неожиданному результату.

6. Для большей убедительности выводов автора наряду с рис.3.5(b) на стр. 78 следовало бы привести также и спектральные кривые отражения для более высоких порядков отражения.

Диссертация изложена четко, грамотно и очень аккуратно, она представляет собой цельную и хорошо логично построенную научную работы высокого уровня. Многочисленные тщательно подобранные цветные рисунки и графики хорошо иллюстрируют основные достижения, изложенные в диссертации. Автор умеет давать простую и наглядную физическую интерпретацию полученным результатам. Все пять защищаемых положений сформулированы четко и правильно отражают суть диссертационной работы. Формулировка основных результатов в конце каждой главы хорошо помогает восприятию текста. Автореферат дает достаточно полное представление о материале диссертации. По теме диссертации опубликованы 10 статей в высокорейтинговых рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК, таких как Optics Letters., Optics Express., Journal of Applied Crystallography, Thin Solid Films, Review of Scientific Instruments, J. Nanosci. Nanotechnol. и др. Результаты диссертации неоднократно (20 публикаций) докладывались на представительных совещаниях и конференциях и получили высокую оценку специалистов.

Считаю, что по объему полученных результатов, их новизне, актуальности, практической и научной значимости представленная работа явно превышает средний уровень и соответствует Положению о присуждении учёных степеней, а её автор, Михаил Владимирович Свечников, вне всякого сомнения заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Профессор кафедры физики твердого тела
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук

Владимир Алексеевич Бушуев

119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2,
МГУ, физический факультет
тел. 8(495) 939-12-26, e-mail: vabushuev@yandex.ru
05 декабря 2018 г.

Подпись проф. В.А. Бушуева заверяю
декан физического факультета МГУ,
профессор



Н.Н. Сысоев