

Отзыв официального оппонента

*на диссертационную работу Свечникова Михаила Владимировича
«Диагностика внутреннего строения многослойных рентгеновских зеркал
по данным рефлектометрии в рамках расширенной модели»,
представленную в диссертационный совет Д 002.069.03 при Федеральном
исследовательском центре «Институт прикладной физики Российской
академии наук» по адресу 603087, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д.
Афонино, ул. Академическая, д.7 на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и
методы экспериментальной физики*

Многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) широко применяются в качестве основных элементов оптических приборов коротковолнового диапазона, в т.ч. для спектроскопии и микроскопии высокого разрешения, исследований в космосе, современной нанолитографии. От таких важных параметров многослойной зеркальной оптики, как толщина, порядок следования и состав слоев, а также шероховатость и диффузность межслойных границ зависят ключевые свойства изготавливаемых приборов дифракционного качества для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения. Главной задачей, которая должна быть решена при конструировании, тестировании и изготовлении подобной дорогостоящей оптики, является повышение коэффициентов отражения МРЗ около-нормального падения с учетом нанометровых диффузионных (стоп-) слоев и субнанометровых шероховатостей интерфейсов, особенно в наиболее сложном для исследований диапазоне средних пространственных частот. В этой связи, точная и комплексная диагностика морфологических свойств и состава МРЗ имеет большое, как фундаментальное, так и прикладное значение для достижения максимального пространственного и углового разрешения применяемых рентгенооптических схем. Постоянно растущие возможности технологии изготовления многослойных структур и появление новых когерентных источников рентгеновского излучения требуют соответствующего роста возможностей методов диагностики МРЗ. Такие, уже ставшие классическими методами диагностики как рентгеновская рефлектометрия, интерференционная микроскопия, атомно-силовая микроскопия и просвечивающая электронная микроскопия требуют постоянного совершенствования для изучения тонкой структуры МРЗ. Развитие материаловедения до нового качественного уровня за счет использования передовых технологий наноконструирования и

наноманипулирования сделало эти методы анализа незаменимыми в нанометрологии. Поэтому проблема развития экспериментально-теоретических методов анализа МРЗ, которой посвящена представленная диссертация, является весьма **актуальной**.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация изложена на 148 страницах и содержит 124 библиографических наименования. В конце каждой главы, исключая обзорную, приводятся основные результаты. Во **введении** определена цель и сформулированы задачи диссертационной работы, положения, выносимые на защиту, а также отмечена ее научная новизна и практическая значимость. Определен **личный вклад** соискателя, который в полученных в диссертации результатах является основополагающим.

В **первой главе**, которая называется литературным обзором, рассмотрены некоторые особенности анализа шероховатости среднечастотного диапазона (латеральные размеры 1 мкм – 1 мм) и ее влияния на коэффициенты отражения и изображающие свойства различных МРЗ, необходимых для изучения короны Солнца и применения в нанолитографии. Большое внимание уделено проблеме решения обратной задачи рассеяния с учетом специфики МРЗ и применимости известных подходов. Глава 1 показывает достаточные знания автора по теме исследования для постановки задач, а также знакомство с современной научной литературой.

Вторая глава посвящена вопросу практического применения интерферометрии с дифракционной волной сравнения для измерения среднечастотного рельефа сверхгладких поверхностей и способам сопоставления получаемых данных с результатами измерений атомно-силовой микроскопии. **Впервые установлена полуэмпирическая связь** между степенью старших полиномов Цернике в наборе, используемом при аппроксимации поверхности, и максимальной отображаемой пространственной частотой поверхностного рельефа. Автором подробно **исследовано влияние** шумов пикселей регистрирующей интерферограмму камеры, интенсивности лазера, а также флуктуации фазы сферического фронта на точность восстановления волнового фронта фазосдвигающей системой.

Третья глава посвящена **решению обратной задачи** рефлектометрии, т.е. численному восстановлению одномерной структуры МРЗ по набору кривых рентгеновского отражения на основе предложенной соискателем расширенной теоретической модели. Суть модели, обладающей **научной новизной** и объединяющей модельный и безмодельный подходы, состоит в представлении переходных областей между слоями в виде линейной

комбинации функций распределения, отвечающих реальным структурам и имеющих весовые коэффициенты, которые являются параметрами подгонки в процедуре минимизации функционала невязки решения обратной задачи. Преимущество **предложенного** подхода **обосновывается** на основе сравнения с результатами, получаемыми для чисто модельного подхода с фиксированной формой интерфейсов в задачах расчетов реальных МРЗ. В данной главе представлен графический интерфейс и отмечено удобство работы с **написанной** автором компьютерной программой, основанной на **разработанной** им модели для численной реконструкции МРЗ по рефлектометрическим измерениям.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию Ве-содержащих многослойных зеркал экстремального ультрафиолетового диапазона с помощью методов рефлектометрии различных спектральных диапазонов рентгеновского излучения – жесткого и экстремального ультрафиолетового. В ней описывается оборудование, с помощью которого были синтезированы и исследованы образцы МРЗ, в частности, двухкомпонентные зеркала Ве/Al и зеркала с прослойками кремния Ве/Si/Al, Al/Si/Ве, Si/Al/Si/Ве, предназначенных для работы на длине волны 17.1 нм. **Важным оказывается** влияние Si прослоек на коэффициенты отражения и межслоевую шероховатость зеркал. В этой главе также проводится **сравнительное исследование** внутренней структуры и отражательной способности чистых Мо/Ве структур, а также имеющих тонкие прослойки В₄С, С и Si, что представляет значительный интерес для фотолитографии на длину волны 11.2 нм. Далее приводятся подробные результаты рефлектометрических исследований нескольких образцов, в т.ч с использованием рефлектометра синхротрона BESSY-II в диапазоне длин волн 12.7-14 нм. В этой главе продемонстрировано, что все исследованные структуры на длине волны 13.5 нм при определенных углах падения имеют коэффициенты отражения выше 71%, а одна обладает рекордной эффективностью.

В заключении работы сформулированы полученные **результаты**.

Сделанные в диссертации **выводы** и выносимые на защиту **положения** являются **обоснованными и достоверными**. Это подтверждается как корректной работой алгоритмов на модельных примерах, так и сравнением результатов анализа реальных МРЗ, полученных различными независимыми методами. Надежность полученных результатов дополнительно подтверждается их сопоставлением с данными, представленными в литературе, а также опытом их использования в работах, проводимых в ИФМ РАН. Содержание диссертации и защищаемых положений отражает

результаты опубликованных работ диссертанта (10 работ в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе в иностранных: Journal of Applied Crystallography, AIP Advances, Thin Solid Films и др.), а также его участие в различных конференциях. В работе имеется полное соответствие поставленных целей и полученных результатов. Содержание диссертации в целом и смысл ее отдельных глав обладают внутренним единством. Вначале каждой главы очерчивается круг решаемых задач, а в конце – приводятся научные выводы с рекомендациями по их практическому использованию. Диссертация написана, в целом, доходчиво, хотя опечатки и неточности в ней есть, что отражено в списке замечаний ниже.

Представленные в диссертационной работе результаты имеют как **теоретическую, так и практическую ценность**. Теоретическая ценность состоит в разработке новых методов и компьютерных программ реконструкции моделей МРЗ и обработки экспериментальных данных рефлектометрии, учитывающих особенности объектов исследования. Практическая ценность заключается в ориентированности полученных результатов на их дальнейшее непосредственное применение в ИФМ РАН и других организациях по изучению шероховатости и формы поверхности изображающей рентгеновской оптики.

Тем не менее, диссертация обладает рядом недостатков, которые следует отметить.

1. На с.21 отмечается: «Наблюдаемый в [18] эффект шепчущей галереи на криволинейных поверхностях действительно усиливает влияние шероховатости на зеркальный пик отражения, однако это влияние является интегральной характеристикой, не несущей информации о частотных свойствах шероховатости поверхности». Это не так, при чем сразу по нескольким причинам. Во-первых, явление ШГ в рентгеновском диапазоне несет информацию и о величине (среднеквадратичном отклонении), и о частотах шероховатости – см., например, §4.4 в книге [117]. Из ослабления зеркальной компоненты и знания величины шероховатости можно сделать вывод о том, какие пространственные частоты (радиусы корреляции) преобладают на поверхности. Из измерений и расчетов диффузной компоненты интенсивности рассеяния ШГ можно «вытащить» основной спектр корреляционных радиусов и величин шероховатости, т.е. функцию спектральной плотности мощности. Для этого необходимо проводить исследования для углов вблизи критического. Так же, как и в случае многослойного зеркала, необходимо учитывать многократное рассеяние и его многоволновой характер. Термин «интегральная характеристика» в равной степени относится к обоим сравниваемым методам – они используют

усреднение интенсивности, полученное на статистически «большой» поверхности.

2. С. 71, «Напомним, что геометрическая шероховатость приводит к уменьшению зеркального отражения, как если бы вместо этой шероховатости был плавный переходный слой соответствующей формы». Для какой модели это справедливо (ссылка)? Данное высказывание равносильно эквивалентности решения двумерного уравнения Гельмгольца его одномерному аналогу, но не ясно, когда это справедливо?

3. На с.117 выражения (4.2) и (4.3) не являются аналитическими, как утверждает автор диссертации. Эти выражения были получены в работе [43] в явном виде, именно, в квадратурах, но это не говорит об их аналитичности.

4. На с.37 утверждается: «Для наблюдения СШ с размерами менее 1 мм нужна схема с уменьшением в 1–10 раз. В эксперименте в качестве НС мы использовали плоско-сферическую линзу диаметром 50 мм и с фокусным расстоянием 250 мм. Реальные коэффициенты увеличения составляли 2.8 и 12.5 в двух последовательных измерениях». Очевидно, «с уменьшением» – опечатка. Должно быть: «с увеличением»; на с.61: «Флуктуации стабилизированного источника были существенно меньше шума детектора, поэтому его отношение шум-сигнал считаем $\ll 0.01$ » – очевидно, должно быть «существенно больше», если « $\ll 0.01$ » относится к детектору.

5. В выражении (2.6) (с.44 и др.) приведено разложение функции $W(r)$ по круговым полиномам Цернике, при этом сама функция $W(r)$ не определена.

6. С.69, «Основные результаты гл. 2», написано: «Минимальный порядок полиномов, необходимый для отображения пространственной частоты ν составляет $n_{\min} = 2\pi\nu$, при условии, что частота измеряется в обратных радиусах единичного круга». Однако, частота единичного круга равняется единице. Очевидно, должно быть: «в долях радиуса единичного круга».


7. Имеется много замечаний по оформлению диссертации и автореферата: оно изобилует жаргонизмами, английскими аббревиатурами, плохим русским языком и просто небрежностью. Например, в диссертации и автореферате написано: «Рис. 1. PSD-функции сферической подложки радиуса кривизны 100 мм...» Вставки к этому рисунку в подписи к нему не объяснены, а английские аббревиатуры не расшифрованы. На с.70: «...для оценки шероховатостей интерфейсов – малоугловое рассеяние рентгеновского излучения (GIXS); для определения химического состава структуры по глубине – вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС)...» – в одном предложении используется аббревиатуры методов на английском и на русском языках. Автор легко и повсеместно использует подобный сленг: «более-менее», “пользование оборудования” “оттранслированного” «радиус

круга в 4 степени», «симметричными свойствами», «фреймворк» и т.д., и т.п. Другой пример – в списке литературы приведены только ссылки на английские версии русских журналов. Еще хуже – чисто русские работы приводятся на английском, например, книга под ред. А.В. Виноградова «Рентгеновская оптика». Кроме того, текст диссертации не удобен для прочтения в электронном формате: автор использует много ссылок на различные части диссертации и используемую литературу, при этом гиперссылки на соответствующие страницы или номера отсутствуют.

Высказанные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы Свечникова М.В. и не портят весьма благоприятного общего впечатления, которое она производит. Представленная работа выполнена на высоком научном уровне, а основные результаты и личный вклад автора полно и правильно отражены как в самой диссертации, так и в автореферате. Диссертация соответствует паспорту специальности, а автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Представленная диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно критериям раздела II «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Свечников Михаил Владимирович заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики.

Доктор физико-математических наук (01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики), главный научный сотрудник Лаборатории наноэлектроники Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук»

Горай Леонид Иванович


7 декабря 2018 года

194021, Санкт-Петербург,
ул. Хлопина, д.8, корпус 3, лит. А
тел.: +7-812-448-6980 доб. 5658; e-mail: lig@pcgrate.com

Подпись официального оппонента заверяю:

Проректор по науке СПбАУ РАН
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН



Жуков Алексей Евгеньевич

07 декабря 2018г.