

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Ильи Вячеславовича МАЛЫШЕВА "Зеркальные системы на основе асферических поверхностей высоких порядков для мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового диапазонов длин волн", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Области мягкого рентгеновского ($\lambda=0.3-10$ нм) и вакуумного ультрафиолетового ($\lambda=10-200$ нм) диапазонов длин волн представляют огромный интерес для многих областей науки (диагностика плазмы и излучения Солнца, рентгеновская астрономия, телескопия и микроскопия, визуализация и томография медико-биологических объектов, литография и т.п.). Дальнейший прогресс немислим без совершенствования старых и создания новых высокоразрешающих оптических систем. Наиболее перспективными являются разработки оптических систем на основе асферических поверхностей (параболоиды, гиперболоиды, эллипсоиды и более сложные поверхности), использование которых позволяет существенно снизить aberrации, повысить пространственное разрешение, увеличить поле зрения, снизить время накопления сигнала, упростить рентгеномикроскопический эксперимент, уменьшить число оптических элементов и т.п.

Актуальность данной диссертационной работы обусловлена тем, что в ней, во-первых, разработана схема нового типа для рентгеновского микроскопа на длину волны 3.37 нм с малой глубиной фокуса в спектральной области "окна прозрачности воды" на основе светосильного объектива Шварцшильда и развита методика z-томографии образцов, что позволяет получать трёхмерное изображение с латеральным и аксиальным разрешением лучше 60 нм и дифракционным качеством изображения., во-вторых – разработан и аттестован телескоп-рефлектор в диапазоне длин волн 120–380 нм для дистанционного зондирования Земли на основе асферической поверхности высокого порядка, который по полю зрения и разрешению превосходит ранее известные рефлекторы, и, в-третьих – разработана методика измерения формы асферических поверхностей с учетом aberrаций корректора волнового фронта и деформации, которая вызвана весом оптической детали.

Структура диссертации классическая. Она состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка публикаций автора (15 статей и 17 материалов конференций и тезисов докладов) и списка цитируемой литературы, содержащего 107 наименований. Диссертация изложена на 179 страницах, включая 97 рисунков и 7 таблиц.

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации и степень её разработанности, цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, практическая значимость, методология и методы исследований, основные положения, выносимые на

защиту, личное участие и степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе, объемом 20 стр., приведен обзор современного состояния исследований в области разработки зеркальных оптических систем на основе асферических поверхностей высокого порядка для мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового диапазонов длин волн. В этой главе подробно проанализированы такие вопросы как анализ схем телескопов-рефлекторов (системы Ньютона, Кассегрена, Ричи-Кретьена, Грегори, триплет Кука, схема Корша), особенности мягкой рентгеновской микроскопии в “окне прозрачности воды” ($\lambda \sim 2.3\text{--}4.4$ нм), микроскопы на зонных пластинках Френеля и на основе высокоапертурных светосильных объективов Шварцшильда. Обсуждены причины, которые не позволяют реализовать томографию на основе зонных пластинок Френеля с разрешением лучше, чем 60-100 нм. Большое внимание уделено таким важным для практики проблемам как воздействие внешних факторов на результаты измерений формы асферических поверхностей зеркал, влияние aberrаций корректоров волнового фронта на эти результаты, и задача определения собственной ошибки формы поверхности на фоне систематической ошибки, которая может быть вызвана весом, способом монтажа и aberrациями интерферометра. В результате критического анализа этих проблем и сформулированы основные цели и задачи данной диссертации.

Вторая глава, объемом 29 стр., посвящена расчетам, разработке и изготовлению полнозеркальной модификации телескопа Шмидта-Кассегрена с зеркальным корректором для дистанционного зондирования Земли на длинах волн 120 – 380 нм на всем поле зрения. Путем минимизации сумм Зейделя рассчитаны в абсолютных единицах все основные параметры телескопа, включая соответствующие коэффициенты полиномов Цернике и максимальный съём материала для осесимметричной асферизации зеркального корректора, имеющего неосесимметричную асферизацию, описываемую полиномами 6-го порядка по радиальной координате и 2-го порядка по азимутальной. Показано, что среднее по полю зрения и длинам волн разрешение разработанной схемы Шмидта-Кассегрена с зеркальным коллиматором составляет 1.3". Особо следует подчеркнуть, что несомненным достоинством предложенной схемы является отсутствие асферизации первичного и вторичного зеркал, что существенно упрощает изготовление телескопа по сравнению с ранее предложенной схемой на основе трех асферических зеркал. Помимо теоретических расчетов в специальном параграфе 2.3 была проведена реальная аттестация aberrаций прототипа телескопа и его пятен фокусировки по полю зрения на интерферометре с дифракционной волной сравнения в автоколлимационной схеме, и осуществлена коррекция aberrаций телескопа Шмидта-Кассегрена с зеркальным корректором, для чего

был сконструирован и изготовлен широкоугольный коллиматор на основе “камеры Шмидта”. На многочисленных рисунках убедительно показано, что качество изготовления оптики и сборки прототипа телескопа позволило достичь в поле зрения 3° расчетного разрешения $1.3''$, близкого к дифракционному.

В третьей главе, объемом 48 стр., изложены результаты по разработке оптической схемы светосильного микроскопа на длину волны 3.37 нм и методике реконструкции трехмерного изображения. Известным преимуществом микроскопии в МР диапазоне по сравнению со всеми другими видами микроскопии является то, что в ней можно реализовать томографию медико-биологических образцов с толщиной до 10-15 микрон и с нанометровым разрешением без их нарезания на тонкие слои. Автор убедительно показал, что с точки зрения светосилы и пространственного разрешения схема микроскопа на основе светосильного зеркального объектива Шварцшильда является гораздо более привлекательной и удобной по сравнению с использованием зонных пластинок Френеля. В предлагаемой схеме мягкого рентгеновского микроскопа на основе зеркальной оптики при типичной числовой апертуре $NA=0.3$ и длине волны 3.37 нм дифракционный предел составляет 7 нм, а глубина фокуса 37 нм, что позволяет визуализировать 3D структуру образцов с нанометровым разрешением, которое много меньше толщины изучаемых образцов 1 – 10 мкм, и в связи с этим может быть реализована z -томография образцов при их сдвигах вдоль оси z . Схема микроскопа и расчет объектива Шварцшильда с асферизацией первичного зеркала изложены предельно детально с указанием всех числовых параметров. Показано, что для объектива Шварцшильда с увеличением $\times 46$, согласованном с размером пикселя 3.5 мкм ПЗС-детектора, оптимальной является числовая апертура $NA=0.3$, а использование сменных линзовых объективов позволяет легко менять увеличение от 90 до 920 крат и поле зрения от 100×100 мкм² до 10×10 мкм².

Одним из самых крупных достижений И.В. Малышева считаю развитие нового метода z -томографии с использованием светосильного объектива ($NA \gg 0.1$), при котором интегрирование ведется вдоль лучей, сходящихся в виде светового конуса, а также предложенный автором рекуррентный алгоритм решения сложной обратной задачи, т.е. впечатляющую по своему качеству трёхмерную реконструкцию изображения органических клеток. Показано, что при этом возможно получить разрешение 3D структуры на уровне 40 нм с контрастом 50 %.

В четвертой главе, объемом 33 стр., излагаются результаты использования разработанных методов по измерению формы асферических поверхностей второго и более высоких порядков на интерферометре с дифракционной волной сравнения. Для разделения ошибки линзового корректора и измеряемого зеркала предложен и реализован

метод, который основан на поворотах зеркала вокруг оптической оси при неподвижном корректоре. Решение трех систем линейных уравнений при трёх различных положениях зеркала, которое поворачивается вокруг оптической оси на 0, 120 и 240 градусов, с неизвестными параметрами поверхности зеркала и aberrаций линзового корректора позволяет определять суммарные aberrации, измеряемые на интерферометре. Соответствующая схема эксперимента и процедура расчетов, а также анализ возможных ошибок подробно изложены в п. 4.3.1. В итоге предложенная методика поворотов зеркала вокруг оптической оси позволила отделить aberrации корректора от aberrаций зеркала и скорректировать среднеквадратичную ошибку формы поверхности первичного асферического зеркала до уровня 0.8 нм. В заключительной части этой главы интерферометр с дифракционной волной сравнения был применен для прецизионного измерения формы поверхности рентгеновского зеркала скользящего падения в виде эллипсоида вращения с установкой обоих источников сферических волн в фокусах эллипсоида, а также описаны экспериментальные схемы применения этого интерферометра для измерения ошибки формы параболоида и гиперболоида, что крайне важно при использовании источников жесткого рентгеновского излучения ($\lambda=0.01-0.2$ нм).

В пятой главе, объемом 18 стр., изложены результаты исследований по разработке метода бездеформационного монтажа зеркал в оправы и оптические приборы. Важность этих исследований для практики трудно переоценить, поскольку в реальности требуется учет деформаций зеркал из-за их веса, из-за монтажа зеркала в оправу и монтажа оправы в телескоп, из-за перепада температур в телескопе на орбите Земли, из-за вибраций и нагрузок при запуске ракеты, тем более что в 2023 году планируется запуск нового телескопа «АРКА» для наблюдения Солнца на длинах волн 17.1 нм и 30.4 нм с угловым разрешением на уровне 0.1'' и требованием к aberrациям волнового фронта ≈ 1.2 нм (для $\lambda = 17.1$ нм). В связи с этим, в диссертации: 1) разработана модификация пластинчатой бездеформационной оправы для монтажа первичного зеркала телескопа, 2) рассчитаны оптимальные размеры перемычек, пластин и толщины слоя эпоксидного клея, 3) по методике поворотов с точностью 1 нм определяется деформация поверхности зеркала из-за его веса, 4) даны рекомендации по предотвращению деформации зеркала из-за различного теплового расширения металлической оправы и зеркала из плавленого кварца.

Основные наиболее существенные результаты диссертационной работы И.В. Малышева можно сформулировать следующим образом:

1. На основе высокоапертурного объектива Шварцшильда разработана схема рентгеновского микроскопа на длине волны 3.37 нм, которая обеспечивает сменное увеличение в 90, 195 и 920 раз и поля зрения 100×100 мкм², 40×40 мкм² и 10×10 мкм²,

соответственно. Асферизация 6-го порядка первичного зеркала улучшает латеральное разрешение в 6-20 раз по сравнению с классической схемой объектива Шварцшильда (например, до 8 нм с контрастом 30% в поле зрения 10×10 мкм²).

2. Разработан и реализован алгоритм реконструкции трёхмерного строения органических клеток по данным z -томографии в светосильной мягкой рентгеновской микроскопии в спектральной области “окна прозрачности воды”. Показано, что данный алгоритм обеспечивает разрешение 3D структуры 40 нм с контрастом 50%.
3. Разработана методика измерения формы оптических элементов с произвольной формой поверхности, которая позволяет отделить ошибку формы измеряемой поверхности от aberrаций корректора волнового фронта и деформации, вызванной весом оптической детали. Методика обеспечивает субнанометровую точность измерений и использовалась при изготовлении асферических зеркал для проекционного объектива ЭУФ литографа и первичного зеркала рентгеновского телескопа для изучения Солнца.

В целом диссертация И.В. Малышева производит сильное впечатление. В первую очередь благодаря своей целостности, многообразию решаемых задач, колоссальному объёму проведенных исследований и большому количеству полученных впечатляющих результатов, а также органическому сочетанию теоретических расчетов и их экспериментальной реализации.

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

1. В параграфе 2.2, посвященном расчёту схемы телескопа Шмидта-Кассегрена с зеркальным корректором, приведены заимствованные из книги [70] (Н.Н. Михельсон, Оптические телескопы, 1976) весьма невысокого качества рисунки 2.2 и 2.3, часть обозначений на которых не совпадают (или отсутствуют) в расчетных формулах автора (2.1)-(2.7), что затрудняет понимание процедуры вычислений.
2. Вряд ли имеет смысл указывать размеры в схеме объектива Шварцшильда на стр. 73 с точностью до 3-го знака после запятой, когда остальные размеры и параметры в лучшем случае ограничиваются первым знаком.
3. Из изложенного материала так и не удалось понять, каким образом была получена “известная” аппаратная функции микроскопа, т.е. явный вид функции рассеяния точки h (рис. 3.12, и даже формула (3.7) на стр. 91).

4. Имеется досадная путаница в неправильных ссылках на рис. (3.23) и формулу (3.20) на стр. 88-89; рис. 3.22 для функции рассеяния точки h и уравнение (3.7) на стр. 91.
5. В работе используется 18 аббревиатур, что зачастую затрудняет чтение. Желательно в предложениях, где таких сокращений несколько, все-таки приводить полную расшифровку хотя бы части из них.

Диссертация изложена четко, в меру грамотно и аккуратно, хотя местами и излишне многословно. Она представляет собой цельную и хорошо логично выстроенную научную работу очень высокого уровня. Многочисленные тщательно подобранные цветные рисунки и графики хорошо иллюстрируют основные достижения, изложенные в диссертации. Все шесть защищаемых положений четко сформулированы и правильно отражают суть диссертационной работы. Формулировка основных результатов и выводов в конце каждой главы хорошо помогает восприятию материала диссертации. Автореферат дает достаточно полное представление о диссертации. По теме диссертации опубликованы 15 статей в высокорейтинговых и рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК, таких как Applied Optics, Journal of Modern Optics, Ultramicroscopy, Astron. Telesc. Instrum. Syst., Precision Engineering, Proc. SPIE, ЖТФ, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, Космонавтика и ракетостроение. Результаты диссертации неоднократно (17 материалов и тезисов) 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, Илья Вячеславович Малышев, безусловно 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: bushuev@phys.msu.ru, vabushuev@yandex.ru
17 ноября 2019 г.

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



Н.Н. Сыроев