

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Физического института
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
доктор физико-математических наук
Савинов Сергей Юрьевич



« 26 »

ноября 2019 года

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Малышева Ильи Вячеславовича «Зеркальные системы на основе асферических поверхностей высоких порядков для мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового диапазонов длин волн», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Развитие оптических технологий поставило вопрос об активном освоении спектральных областей, сложных с точки зрения создания светосильных и высокоразрешающих оптических систем, таких спектральные области мягкого рентгеновского (МР) (длины волн $\lambda = 0,3-10$ нм) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) ($\lambda = 10-200$ нм) излучения. Короткая рабочая длина волны и сильное поглощение в любых материалах требует поиска новых оптических систем, методов изготовления и контроля соответствующих оптических элементов. Представленные в диссертации результаты научных исследований направлены на решение указанных проблем по разработке новой прецизионной оптики для МР и ВУФ диапазонов, позволяющей решать важные фундаментальные и прикладные задачи, такие как дистанционное зондирование Земли, рентгеновская микроскопия и микротомография высокого пространственного разрешения и т.п. Таким образом, **актуальность** диссертации не вызывает сомнения.

Одной из основных тем диссертационной работы является разработка новых оптических схем зеркальных ВУФ-телескопов на основе асферических оптических элементов. Автором предложены новые оптические схемы типа телескопа Шмидта-Кассегрена и коллиматора на основе «камеры Шмидта» с использованием зеркальных корректоров

волнового фронта. Новые схемы позволяют существенно улучшить светосилу и угловое разрешение современных телескопов, работающих в ВУФ-диапазоне.

Новым решением является также предложение автора использовать рентгенооптическую схему с переменным увеличением для создания зеркального рентгеновского микроскопа, работающего на длине волны $\lambda = 3,37$ нм (спектральный диапазон «водяного окна»). В этой схеме за счет асферизации большого зеркала объектива Шварцшильда поперечное разрешение микроскопа улучшается в 6-20 раз по сравнению с аналогичным объективом на основе сферических зеркал. Меньшие геометрические aberrации позволяют увеличить числовую апертуру до $NA=0,3$, что, в свою очередь, уменьшает глубину резкости (до 37,5 нм) для использования методов z-томографии и получения трёхмерных изображений.

К новизне результатов, интересных с научной точки зрения, можно отнести и сам метод z-томографии, разработанный автором для получения трёхмерных изображений биологических объектов в широкоапертурных рентгеновских микроскопах. Данный подход учитывает сильное поглощение излучения материалом исследуемого объекта и позволяет применить деконволюционный аппарат, развитый в оптической конфокальной микроскопии, для существенного улучшения пространственного разрешения, до десятков нм.

Необходимо отметить также новую методику прецизионного измерения формы оптических элементов для определения формы измеряемой поверхности на фоне aberrаций корректора волнового фронта и деформации, вызванной весом оптической детали. Показано, что данная методика обеспечивает субнанометровую точность измерений, что впервые было использовано при аттестации формы асферического зеркала оптического оборудования для ЭУФ-литографии и первичного зеркала рентгеновского космического телескопа.

Целый ряд результатов, полученных И.В.Мальшевым, имеют **теоретическую и практическую ценность**. Так, на основе модифицированной схемы Шмидта-Кассегрена был создан прототип двухканального УФ-ВУФ телескопа на диапазон длин волн 120 – 380 нм, обладающего большой светосилой (относительное отверстие 1:3,2) и высоким угловым разрешением $\delta\varphi = 1,3''$ в поле зрения около 3° . Данный тип телескопа может использоваться для решения задач дистанционного зондирования Земли и поиска различных объектов в верхних слоях атмосферы. Для аттестации телескопов такого типа разработан и протестирован новый коллиматор, позволяющий проводить аттестацию углового разрешения УФ-ВУФ телескопа на всём поле зрения.

Для решения задач, связанных с применением высокоразрешающей оптики в условиях реальных экспериментов на Земле и в космосе в диссертации были разработаны

новые методики контроля формы асферических поверхностей, которые позволяют определить параметры деформации формы зеркал и соответствующие aberrации объективов. Данные методики были апробированы автором для изучения оптического качества многослойных зеркал, изготовленных для литографического оборудования, телескопов и установок рентгеновского микроанализа. Практическую ценность представляют собой также метод бездеформационного монтажа прецизионных оптических деталей в оправы и приборы, разработанный автором диссертации для зеркал космического телескопа обсерватории «АРКА».

Содержание диссертационной работы изложено в логически последовательном стиле, имеет чёткую и ясную форму и оформлено в соответствии с действующими требованиями ВАК.

Во введении И.В. Малышев 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 достаточно полный обзор научных публикаций и работ, отражающий современное состояние исследований по теме диссертации с использованием большого числа литературных ссылок и иллюстраций. Так, проводится сравнительный анализ оптических схем телескопов, используемых в ВУФ диапазоне. Во второй части главы делается обзор задач и решений в области рентгеновской микроскопии в спектральной области «окна прозрачности воды», длины волн $\lambda = 2,3 - 4,4$ нм. Третья часть посвящена обсуждению воздействия внешних факторов на результаты измерений формы поверхности прецизионных оптических деталей, таких как собственный вес, механические напряжения при монтаже и влияние перепада температуры. На основе обзора дается обоснование актуальности и значимости задач, решаемых в диссертационной работе.

Темой второй главы диссертации И.В. Малышева является разработка новых модификаций телескопа Шмидта-Кассегрена с использованием зеркального корректора, а также нового коллиматора для измерения углового разрешения ВУФ-телескопа во всём поле зрения. Расчёт и оптимизация оптических схем проводились двумя способами: аналитически, с расчётом геометрических aberrаций на основе сумм Зейделя и численно, с использованием оптической программы трассировки лучей Zemax. Важно отметить, что в данной главе содержатся также результаты экспериментальных исследований разработанных оптических систем. Автор описывает методы и технику измерений aberrаций разработанного прототипа телескопа на интерферометре в автоколлимационной схеме. Эксперимент, проведенный

автором, показал, что на видимом свете прототип телескопа способен разрешить 6-мкм полосы миры коллиматора, что соответствует угловому разрешению 1,5"-1,7" во всём поле зрения. Измеренные функции передачи частоты прототипа телескопа показали, что на рабочих длинах волн $\lambda = 120-380$ нм среднее по длинам волн и углам зрения угловое разрешение составляет около 1,3", что совпадает с расчётным значением.

Третья глава посвящена разработке зеркального рентгеновского микроскопа на основе многослойной оптики на рабочую длину волны $\lambda = 3,37$ нм в спектральном диапазоне «окна прозрачности воды». За счёт большой числовой апертуры $NA = 0,3$ объектива Шварцшильда микроскоп имеет малую глубину фокуса 37,5 нм, что позволяет реализовать z-томографию образцов для получения трёхмерных изображений. Необходимо отметить, что техника z-томографии ранее в МР-микроскопии не применялась. Предлагаемая оптическая схема рентгеновского микроскопа содержит два каскада увеличения: двухзеркальный рентгеновский объектив Шварцшильда позволяет получить увеличенное (до 46 раз) изображение объекта на поверхности тонкого люминесцентного экрана, далее оптическое изображение переносится на поверхность цифрового детектора с помощью микро-объектива с увеличением от 2 до 20 раз. Таким образом, общее увеличение рентгеновского микроскопа достаточно велико (до 920), что теоретически позволяет получить высокое пространственное разрешение, до 8 нм с контрастом 30% на поле зрения 10×10 мкм². Показано также, что при использовании методов z-томографии трёхмерные изображения объектов могут быть получены с пространственным разрешением до 20 нм. Большое внимание в данной главе автор уделяет реализации метода z-томографии в МР-микроскопии. Z-томография основана на получении серии изображений объекта с малой глубиной фокуса (числовая апертура оптической системы $NA \gg 0,1$) при его перемещении вдоль оптической оси. Описывается разработанный алгоритм восстановления интенсивности перед деконволюцией для реконструкции трёхмерной структуры образца в условиях сильного поглощения излучения, характерного для мягкого рентгеновского диапазона. Приводятся результаты численного моделирования процесса получения трёхмерного рентгеновского изображения белковой структуры клетки по данным z-томографии.

Четвёртая глава диссертации посвящена разработке методов измерения асферических поверхностей на интерферометре с дифракционной волной сравнения (ИДВС). В начале главы описывается принцип работы таких интерферометров. Далее описывается эксперимент по измерению формы зеркал и aberrаций объектива Шварцшильда с использованием интерферометра типа ИДВС. Для устранения систематических ошибок измерения при

определении aberrаций линзового корректора и формы зеркала предлагается использовать серию из 4-х измерений при разных углах поворота измеряемой оптической детали. На основе полученных данных о значениях aberrаций изготовленных зеркал проводится численное моделирование, которое позволяет оценить ожидаемое изображение интерференционных полос в литографической оптической системе на рабочей длине волны 13,5 нм. Во второй части главы автор разрабатывает методику применения ИДВС для измерения поверхности многослойных рентгеновских зеркал второго порядка: эллипсоидов, параболоидов и гиперболоидов. Описываются результаты эксперимента по измерению формы поверхности рентгеновского зеркала-эллипсоида. Приводится сравнение результатов измерений на ИДВС и на интерферометре белого света.

В пятой главе диссертации И.В.Малышев описывает подходы и результаты создания новой механической оправы для бездеформационного крепления первичного зеркала телескопа солнечной обсерватории «АРКА», которая позволяет уменьшить деформацию зеркала в телескопе более чем на 2 порядка. На основе компьютерного моделирования автор рассчитывает оптимальные размеры перемычек, пластин и слоя эпоксидного клея, обеспечивающие эффективное уменьшение деформации зеркала из-за установки оправы с зеркалом в телескоп и выдерживающие пусковые нагрузки при запуске ракеты. Необходимо отметить, что при расчёте учитываются такие факторы, как деформация поверхности зеркала, возникающая из-за его собственного веса, и влияние перепада температур. Автор приводит оценку влияния деформации монтажа и измеренной формы зеркала на разрешение телескопа «АРКА», которая указывает на реальность достижения углового разрешения 0,1" при использовании пикселя размером 10 мкм.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Можно констатировать, что с поставленными задачами И.В.Малышев успешно справился, достоверность результатов и выводов диссертации не вызывает сомнений. Это подтверждено многочисленными публикациями в рецензируемых журналах и апробацией на Всероссийских и международных конференциях.

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК, достаточно подробно передаёт содержание диссертации, содержит необходимые формулировки цели и задач исследований, выносимых на защиту положений, научной новизны и практической значимости, и не имеет каких-либо расхождений с содержанием диссертации. Публикации соискателя в полной мере отражают наиболее значимые моменты проведенных исследований.

Диссертация заслуживает положительной оценки. Однако она не лишена некоторых недостатков и неточностей, к которым следует отнести следующие:

1. Рентгеновская микроскопия высокого пространственного разрешения в настоящее время является хорошо развитой областью научных исследований, по этой теме существует большое количество опубликованных работ, что делает сложным детальный обзор. Однако, представленный в диссертации обзор микроскопии мягкого рентгеновского диапазона, несомненно, выиграл бы, при включении в него больше информации о современных достижениях рентгеновской микроскопии, в том числе выполненным с использованием синхротронных источников, где разрабатываются основные методики исследований биологических объектов.
2. Некоторые утверждения автора в разделе, посвященной рентгеновской микроскопии, являются спорными. Например, о высоком пропускании белков наряду с водой в диапазоне $\lambda=2.4 - 4.3$ нм (стр. 25) или о низкой дозовой нагрузке образцов при исследовании «живых» объектов. Они требуют дополнительного обоснования. По-видимому, автор ещё не имеет достаточного опыта экспериментальной работы в области рентгеновской микроскопии, что, впрочем, не снижает высокого качества представленной диссертации.
3. Автор в обзоре допускает неточность в описании методов рентгеновской томографии. Большинство томографических исследований проводится с использованием не параллельного, а конического пучка рентгеновских лучей в связи со сложностью коллимации излучения рентгеновской трубки. Существующие алгоритмы трёхмерной реконструкции легко адаптируются для схемы конических пучков. Кроме того, в рентгеновской микротомографии конический пучок позволяет получать увеличенные проекции объектов и, соответственно, улучшать пространственное разрешение по объекту.
4. В диссертации несколько раз используется неудачная терминология. Проекционной микроскопией обычно называют «теневую» схему без использования оптики, термин «водяное окно» для обозначения спектрального диапазона является уже общепринятым. Термин «белковая клетка» является совершенно непонятным с точки зрения биологии.
5. При рассмотрении задач определения формы зеркал из картины интерференционных полос в диссертации не было указано, какая программа использовалась для обработки интерференционных картин.

6. В диссертации замечены некоторые опечатки, например, использование непринятого в России обозначения $atan(x)$ вместо $arctg(x)$, несколько рисунков выполнены заметно менее качественно, чем остальные.

Указанные недостатки и замечания, в целом, не снижают её качества и не вносят принципиальных изменений в Положения и Выводы, выносимые автором на защиту, и не снижают общей положительной оценки работы.

Заключение. Диссертационная работа И.В. Малышева «Зеркальные системы на основе асферических поверхностей высоких порядков для мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового диапазонов длин волн» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. Текст диссертации содержит необходимые иллюстрации и написан ясным и профессиональным языком.

Представляемая работа прошла серьезную апробацию, её основные результаты неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. По теме диссертационной работы опубликовано 32 научных работы (из них 15 – статьи в рекомендованных ВАК журналах и 17 – материалы конференций).

Диссертация была рассмотрена на заседании научного семинара Отделения квантовой радиофизики Физического института им. П.Н. Лебедева РАН 25 октября 2019 г.

Все это позволяет утверждать, что представленная диссертационная работа И.В. Малышева удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям и критериям, установленным в п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», а её автор, Малышев Илья Вячеславович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики».

Отзыв подготовил

И.о. зав. лабораторией рентгеновской оптики

Отделения квантовой радиофизики ФИАН,

Ведущий научный сотрудник

Кандидат физико-математических наук

iart@lebedev.ru

тел. (499)132-65-22

 Артюков Игорь Анатольевич

«25» ноября 2019 г.

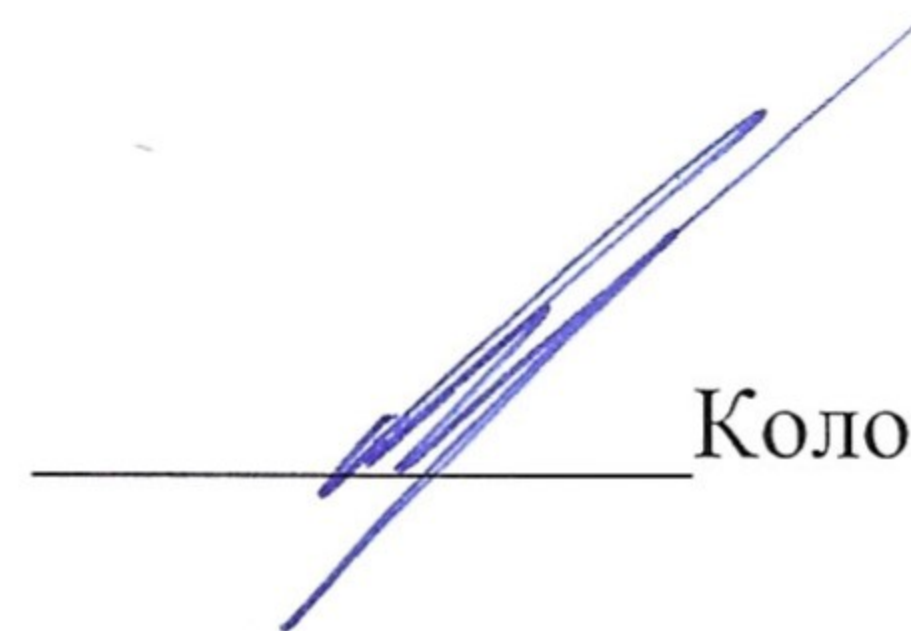
«Подпись И.А. Артюкова заверяю»

Учёный секретарь Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Кандидат физико-математических наук

kolobov@lebedev.ru

тел. (499) 132-69-78



Колобов Андрей Владимирович

«25» ноября 2019 г.

Адрес:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук».

119991 ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, д.53

Тел. 8 (499) 135-14-29

<http://www.lebedev.ru>

postmaster@lebedev.ru