

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу 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

**Актуальность работы** связана с необходимостью создания телескопов для дистанционного зондирования Земли и изучения короны Солнца, работающих в ВУФ диапазоне длин волн и имеющих супер-разрешение на уровне угловой секунды и её долей. Создание таких телескопов позволит внести вклад в решение следующих научных и прикладных задач: 1) изучение механизма нагрева короны Солнца, что даст возможность подтвердить или опровергнуть теорию «нановспышек»; 2) регистрация гиперзвуковых объектов в верхних слоях атмосферы (с точностью  $\approx 250$  м на огромном поле зрения  $\approx 2000$  км), где на фоне «черной» в ВУФ диапазоне Земли отчетливо виден сигнал от ионизированных этими объектами молекул атмосферы; и 3) сбор данных по космическому фону в ионосфере Земли.

Для получения дифракционно ограниченного разрешения крайне важен учёт деформаций оптических элементов, вызванных их весом, а также анализ возможных систематических ошибок измерений. Две из пяти глав диссертации автор посвятил решению этих проблем и успешно с ними справился. Другая часть диссертационной работы посвящена разработке микроскопа, предназначенного для работы в диапазоне «окна прозрачности воды» ( $\lambda = 2.2 - 4.4$  нм). Этот диапазон очень привлекателен для медицинских и биологических приложений по той причине, что в нём можно изучать внутреннюю структуру «толстых» (до 10 – 15 мкм) водосодержащих белковых клеток в естественном абсорбционном контрасте без нарезания на тонкие слои, использования контрастирующих флюорофоров и высушивания и при этом получать разрешение в десятки нанометров.

**Ключевым моментом работы** является то, что для получения уникальных характеристик приборов автор применяет зеркальные асферические поверхности, описываемые полиномами высоких порядков, в том числе с неосесимметричной асферизацией. Возможность создания таких сложных поверхностей и, притом, обладающих дифракционным качеством с ошибкой формы на уровне долей и единиц нанометров, обусловлена богатым опытом Малышева И.В. и коллектива, в котором он работает, в области прецизионных измерений на

интерферометре с дифракционной волной сравнения, ионно-пучковой асферизации и коррекции локальных ошибок формы оптических поверхностей.

Применение зеркального корректора аберраций с неосесимметричной асферизацией позволило автору впервые в мире создать телескоп по схеме Шмидта-Кассегрена для ВУФ диапазона. Такой телескоп имеет **на порядок большее поле зрения, а также меньшие габариты и большую светосилу** по сравнению со стандартными телескопами - рефлекторами Кассегрена, Ричи-Кретьена и Грегори, использующих поверхности 2-го порядка, а по сравнению с рефлекторами Кука и Корша – большую светосилу, меньшее число зеркал, а **самое главное - более слабые допуски на положение зеркал**, что крайне важно, потому что при запуске аппарата в космос из-за вибраций оптические элементы могут разюстироваться.

Диссертация состоит из введения, 5ти глав и заключения. Содержит 179 страниц, 97 рисунков и 7 таблиц.

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, изложены цели работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, формулируются основные положения, выносимые на защиту и личное участие автора диссертации.

**Первая глава** – обзорная и разделена на три части. В первой части делается обзор телескопов – рефлекторов. Сравняются их разрешения, поля зрения, относительные отверстия, число зеркал, в том числе асферических, которое определяет сложность изготовления схемы. Во второй части дан обзор по мягким рентгеновским микроскопам (МРМ) для «окна прозрачности воды»: длины волн 2.3 – 4.4 нм. Обсуждаются проблемы, не позволяющие в МРМ на зонных пластинках Френеля реализовать томографию с разрешением лучше 60-100 нм. В третьей части обсуждается воздействие внешних факторов на результаты измерений формы поверхности зеркал: деформаций из-за веса, из-за установки оптической детали в оправу и из-за изменения температуры.

**Вторая глава** посвящена разработке полнозеркальных модификаций: телескопа Шмидта-Кассегрена (ШК) с зеркальным корректором (ЗК) и коллиматора на основе «камеры Шмидта», предназначенного для одновременного измерения разрешения телескопа на всём поле зрения. Расчёт схемы проводится с использованием сумм Зейделя. Описывается методика измерения аберраций разработанного прототипа телескопа и его пятен фокусировки по полю зрения на ИДВС в автоколлимационной схеме. Приводятся результаты расчёта оптической схемы коллиматора и измерения разрешения телескопа.

**В третьей главе** описывается разработка оптической части светосильного мягкого рентгеновского микроскопа на основе зеркальной оптики на длину волны 3.37 нм в «окне прозрачности воды». За счёт большой числовой апертуры  $NA = 0.3$  проекционного объектива



Шварцшильда микроскоп имеет малую глубину фокуса  $DOF = \pm 37.5$  нм (depth of focus), что позволяет эффективно реализовать z-томографию образцов, которая раньше в МРМ не применялась. В главе описывается предлагаемая двухуровневая схема увеличения микроскопа на основе объектива Шварцшильда (ОШ) с увеличением  $\times 46$  и цифрового детектора со сменным увеличением от 2 до 20 раз. Общее увеличение микроскопа до 920 раз позволяет получить разрешение двумерных объектов до 8 нм с контрастом 30% на поле зрения  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>, а также разрешение трёхмерных объектов до 40 нм с контрастом 50%. За счёт использования в ОШ первичного зеркала, имеющего профиль асферизации 6-го порядка, разрешение в зависимости от поля зрения улучшено в 6-20 раз по сравнению с классическими ОШ на основе сферических зеркал.

В главе рассматриваются существующие методы угловой томографии для реконструкции трёхмерной структуры органических клеток в МРМ на ЗПФ и предлагается новый метод z-томографии, когда образец сдвигается вдоль оптической оси, и делается серия его снимков.

**Четвёртая глава** посвящена разработке методов измерения асферических поверхностей на интерферометре с дифракционной волной сравнения (ИДВС). В начале главы описывается принцип работы таких дифракционных интерферометров. Далее описывается эксперимент по измерению формы зеркал и aberrаций объектива Шварцшильда на интерферометре. Предлагается методика поворотов измеряемой оптической детали и решения системы уравнений для определения aberrаций линзового корректора и ошибки формы вогнутого зеркала объектива. Во второй части главы описывается методика применения ИДВС для измерения поверхности многослойных рентгеновских зеркал скользящего падения.

**В пятой главе** разрабатывается метод бездеформационного крепления первичного зеркала телескопа солнечной обсерватории АРКА, который позволил уменьшить деформацию зеркала из-за его установки и фиксации в телескопе более чем на 2 порядка. Рассчитаны оптимальные размеры перемычек, пластин и слоя эпоксидного клея в креплении первичного зеркала, обеспечивающие эффективное уменьшение деформации зеркала из-за установки оправы с зеркалом в телескоп с одной стороны, и выдерживающие пусковые нагрузки в ракете, с другой. Рассчитаны и измерены деформация поверхности зеркала, возникающая из-за его веса, и деформация из-за установки в телескоп. Моделируется влияние перепада температур на форму поверхности зеркала и разрешение телескопа. Приводится расчёт влияния деформации «установки» и ошибки измерения ИДВС на  $0.1''$  разрешение телескопа.

**В заключении** сформулированы основные выводы по результатам работы.

Содержание диссертации и защищаемых положений отражает результаты опубликованных работ диссертанта (15 работ в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе в иностранных: Applied Physics, JATIS, Ultramicroscopy, Journal of Modern Optics и др.), а также его участие в различных конференциях.

Представленные в диссертации результаты имеют как практическую, так и теоретическую ценность и, несомненно, обладают научной новизной.

**Практическая ценность** заключается в: 1) создании нового типа зеркального ВУФ телескопа и нового типа коллиматора для аттестации разрешения телескопов с большим полем зрения; 2) создании методики и оправы для «бездеформационного» крепления оптических деталей с точностью остаточных деформаций на уровне 1 нм по СКО, обеспечивающих близкое к дифракционному качество изображения на длине волны 17.1 нм; 3) разработке метода измерения формы поверхности рентгеновских зеркал скользящего угла падения на интерферометре с дифракционной волной сравнения. **Теоретическая ценность** заключается в: 1) разработке алгоритма z-томографии биологических клеток в светосильном зеркальном мягком рентгеновском микроскопе; 2) разработке методики по нахождению и учёту деформации веса и ошибки корректора волнового фронта в результатах измерений формы оптических поверхностей.

По тексту диссертации можно сделать ряд **замечаний**, которые, однако, не портят общего положительного впечатления от диссертационной работы:

1. Не ясно, почему 50% контраст 40 нм органелл в виде шариков соответствует 20% контрасту с разрешением 20 нм.

2. На Рис. 5.3, стр. 150 показана измеренная ошибка формы поверхности зеркала до виброиспытаний, затем в программе Solid Works проводится моделирование напряжений, которые должны возникнуть во время запуска ракеты или виброиспытаний, и показывается, что согласно расчёту предлагаемая оправка их выдерживает. Проводились ли виброиспытания? Если да, то не изменилась ли форма поверхности зеркала после них?

3. На стр. 78 утверждается, что диаметры пятен фокусировки объектива Шварцшильда с числовой апертурой  $NA=0.4$  в два раза больше, чем диаметры пятен фокусировки объектива с  $NA = 0.3$ , и поэтому предпочтение отдаётся в пользу объектива с  $NA=0.3$ . Однако на малом поле зрения  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ , на котором автор хочет получить супер-разрешение,  $NA=0.4$  также как и  $NA=0.3$  имеет дифракционное качество изображения, и кроме того меньшую в 1.8 раза глубину фокуса и меньшее время экспозиции кадра из-за большей светосилы. Хочется прояснить, почему автор отдаёт предпочтение объективу с числовой апертурой 0.3 и делает реконструкцию трёхмерного изображения именно для этого объектива.



4. Как была получена функция рассеяния точки (Рис. 3.12)?
5. Имеются «слипшиеся» слова, что немного усложняет восприятие диссертации.

**Заключение:**

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, имеющие большое значение для методов экспериментальной физики. Полученные автором **результаты достоверны, выводы и научные положения обоснованы.** Диссертационная работа содержит достаточное число результатов измерений, расчётов, рисунков, таблиц и графиков. Она написана ясно, грамотно и аккуратно оформлена. В конце каждой главы и работы в целом приведены четкие выводы. Автореферат хорошо передаёт основное содержание диссертации.

Диссертационная работа «**ЗЕРКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ ДЛЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН**» отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», а её автор Малышев Илья Вячеславович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент:

Заведующий отделом Астрофизики  
высоких энергий ИКИ РАН,  
доктор физико-математических наук

Павлинский М.Н.

25 ноября 2019 г.

ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук  
117997 Россия, Москва, ул. Профсоюзная 84/32, тел.: +7(495) 333-52-12,  
факс: +7(495) 333-12-48, e-mail: iki@cosmos.ru

ПОДПИСЬ Павлинского М.Н.  
УДОСТОВЕРЯЮ  
Учёный секретарь ИКИ РАН  
к.ф.м.н.



Садовский А.М.