

На правах рукописи

Мальшев Илья Вячеславович

**ЗЕРКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АСФЕРИЧЕСКИХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ ДЛЯ МЯГКОГО
РЕНТГЕНОВСКОГО И ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО
ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2019г.

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН (ИФМ РАН)– филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федерального исследовательского центра Института прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород.

Научный руководитель: **Чхало Николай Иванович**, доктор физико-математических наук, заведующий отделом многослойной рентгеновской оптики ИФМ РАН

Официальные оппоненты: **Бушуев Владимир Алексеевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Павлинский Михаил Николаевич
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космических исследований Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени П.Н.Лебедева Российской академии наук»

Защита состоится «19» декабря 2019 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 002.069.03 при Институте физики микроструктур РАН по адресу: 603087, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, Россия.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте: http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/2019_MalishevIV/Diss.pdf

Автореферат разослан «__» ноября 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Д.Ю. Водолазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности

В спектральной области мягкого рентгеновского (МР) ($\lambda=0.3-10$ нм) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) ($\lambda=10-200$ нм) излучения интерес к высокоразрешающим оптическим системам сопровождается интенсивным развитием методов измерения и технологии коррекции поверхностей оптических элементов, а также созданием новых оптических систем на основе асферических поверхностей (АП). Использование АП высокого (выше 2-го) порядка в оптических приборах позволяет добиться лучшего разрешения и большего поля зрения при меньшем числе оптических элементов, массе и габаритах. Особенно это выгодно в МР и ВУФ диапазонах, где из-за сильного поглощения используется зеркальная оптика. Из-за малости коэффициентов отражения зеркал, их число выгодно делать минимальным.

Развитые в последнее время в ИФМ РАН методы прецизионных измерений на интерферометре с дифракционной волной сравнения (ИДВС), ионно-пучковой асферизации и коррекции локальных ошибок формы оптических поверхностей позволяют создавать новые оптические системы на основе АП высокого порядка, в том числе с неосесимметричной асферизацией поверхности [А6,А8,А12]. Поэтому в диссертации разрабатываются новые системы на основе АП высоких порядков, которые были применены при разработке ВУФ телескопа для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и светосильного зеркального МР микроскопа.

Применительно к задаче ДЗЗ важной является величина поля зрения телескопа: чем оно больше, тем больший участок на Земле можно увидеть. В области ВУФ диапазона длин волн из-за большого поглощения излучения материалом линз (стеклом, плавленным кварцем и т.д.) и хроматической аберрации линз применение находят только зеркальные телескопы – рефлекторы. Классические двухзеркальные схемы рефлекторов на основе АП второго порядка: схема Кассегрена, Ричи-Кретьена, Грегори имеют следующие недостатки: малые поля зрения менее 1° [1-3] и относительные отверстия, менее 1:5, приводящие к малой светосиле при фиксированной длине телескопа.

В задачах, где требуется большое поле зрения, например в системах ДЗЗ используются телескопы с трёхзеркальными объективами и четвертым плоским зеркалом. Они имеют большие поля зрения: в схеме Корша до $3-4^\circ$, в схеме Кука до $8^\circ-10^\circ$ - в сагиттальном направлении и до 1.5° - в меридиональном. Недостатками являются малые относительные

отверстия, менее 1:4, и, как следствие, большие габариты, а также большое число (два – три) сложных в изготовлении и юстировке внеосевых асферических зеркал [4-5].

Поэтому актуальной является разработка новых схем телескопов-рефлекторов для ДЗЗ на основе АП высоких порядков, в том числе с неосесимметричной асферизацией, которые превосходят классические схемы по полю зрения и разрешению, имеют минимальное число поверхностей, а также уменьшают массу и габариты прибора.

В МР диапазоне на протяжении последних 30-ти лет активно развивается мягкая рентгеновская микроскопия (МРМ) в спектральной области «окна прозрачности воды», длины волн 2.3-4.4 нм. Особенности взаимодействия мягкого рентгеновского излучения с веществом в этом диапазоне, такие как слабое рассеяние, относительно большая глубина проникновения в воду до края поглощения кислорода ($\lambda = 2.4$ нм) и в белок до края поглощения углерода ($\lambda = 4.4$ нм) и резкие скачки поглощения за ними, а также малая длина волны делают возможным изучение живых водосодержащих органических клеток толщиной до десяти и больше микрометров на поле зрения 10 мкм и более с разрешением менее 100 нм, которое выше дифракционного предела разрешения в 200-300 нм в самых светосильных микроскопах видимого света. В качестве изображающего объектива в МРМ используются зонные пластинки Френеля (ЗПФ). При этом лучшее разрешение в изображении объемных белковых образцов, полученное в результате угловой томографии, составляет 60-70 нм с синхротронными высокомономохроматичными источниками [6-7] и 100-140 нм с лабораторными лазерно-плазменными источниками [8-9] при дифракционном пределе используемых в [6-9] ЗПФ 30-50 нм. Достигнутое аксиальное разрешение хуже 100 нм [8-9]. Недостижение дифракционного предела связано с тремя факторами. Во-первых, при восстановлении трёхмерного изображения образца по серии его угловых проекций пользуются методом «фильтрации обратных проекций» [10], который предполагает, что лучи строго параллельны, т.е. размер образца вдоль оптической оси гораздо меньше глубины фокуса ЗПФ. Однако, на практике используют ЗПФ с глубиной фокуса 1-1.5 мкм [6-9], а изучают клетки толщиной 5 – 15 мкм, поэтому лучи не параллельные. Появившиеся методы учёта непараллельности лучей пока не нашли практического применения. Во-вторых, из-за низких числовых апертур ($NA = 0.01 - 0.1$) время накопления сигнала для каждого снимка довольно велико, обычно 1-2 минуты, поэтому шумы ПЗС-детектора и дрейф образца из-за температурных колебаний, внешних вибраций и

броуновского движения клеток значительны. В-третьих, центр вращения столика с образцом не совпадает с центром образца, поэтому при сканировании по углу возникают смещения образца. Сложность юстировки и при этом накопление образцом дополнительной дозы приводит к тому, что шаг по углу выбирают довольно большим, 1-4° [6-9], что согласно критерию Кроувера, приводит к ограничению разрешения из-за недостатка информации об объекте. В-четвертых, из-за маленького рабочего расстояния между ЗПФ и образцом (доли миллиметра) столик с образцом невозможно наклонить на большие углы. Диапазон углов сканирования составляет $\pm 40^\circ$ [9], $\pm 60^\circ$ [6] для протяженных столиков с образцами, и $\pm 90^\circ$, если образец помещается на конце зауженного капилляра [7,9]. Ограничение диапазона углов также приводит к ограничению информации об объекте и ухудшению разрешения. Таким образом, угловая томография на ЗПФ имеет ряд проблем, которые не позволяют продвинуться в область разрешений лучше 60 нм. Поэтому актуальным является создание нового типа МРМ на основе светосильного объектива Шварцшильда и методики z-томографии образцов для него, которая, благодаря малой глубине фокуса и большой величине сигнала, позволит получить трёхмерное изображение с латеральным и аксиальным разрешением лучше 60 нм.

Для достижения дифракционного качества изображений в ВУФ и, особенно, в МР диапазоне, в силу малости длины волны, требования к точности формы поверхностей изображающего объектива и его аберрациям очень жёсткие. Согласно критерию Марешала, параметр среднеквадратического отклонения (СКО) аберраций не должен превышать $\lambda/14$, что на длине волны 3.37 нм разрабатываемого микроскопа составляет 0.24 нм. В ВУФ диапазоне требования к точности формы не такие строгие, но, тем не менее, находятся в нанометровой области. На таком уровне точностей необходимо учитывать все возможные систематические ошибки измерений: деформацию, возникающую из-за веса оптической детали, аберрации дополнительной оптики в интерферометре, деформации из-за установки и фиксации оптической детали в приборе. Проблема метрологии и коррекции формы осложняется тем, что изображающие объективы и телескопы имеют в своём составе асферические поверхности.

Аттестация формы и аберраций асферических оптических поверхностей является комплексной задачей. Во-первых, асферические поверхности измеряются на интерферометрах с использованием дополнительных корректоров волнового фронта, преобразующих сферический фронт в асферический, по форме совпадающий с

исследуемой асферической поверхностью, поэтому необходимо учитывать ошибки, вносимые корректорами. Таким образом, разработка способа учёта аберраций корректоров является крайне актуальной задачей. Во-вторых, необходимо учитывать деформацию оптической поверхности из-за её веса. Особенно это важно при аттестации аберраций телескопов космического базирования, потому что на орбите из-за невесомости форма зеркал телескопа отличается от измеряемой на Земле. В-третьих, оптические элементы устанавливаются в оправы, поэтому важной является разработка методов креплений, которые вносят в установленный в них оптический элемент минимальные деформации. В-четвёртых, в задачах, где есть значительный перепад температур, например, в космических телескопах, есть проблема деформации поверхности из-за изменения температуры, поэтому используют так называемые «полукинематические» оправы, которые практически не препятствуют изменению размеров оптической детали [11]. Особую актуальность эта задача приобрела в связи с работами по созданию новой солнечной обсерватории «АРКА», в которой требуется достичь сверхвысокого разрешения 0.1" [12].

Цели и задачи диссертационной работы

Целями диссертационной работы является следующее. 1. Разработка новых оптических систем для телескопов и микроскопов, предназначенных для работы в вакуумном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах, и обладающих минимальным числом оптических элементов, большей светосилой, увеличенным полем зрения и дифракционным качеством изображения. 2. Разработка методики реконструкции трёхмерного изображения по данным светосильной рентгеновской микроскопии в присутствии сильного поглощения. 3. Разработка методов крепления прецизионных оптических элементов в оправы и приборы, и методов измерений аберраций с субнанометровой точностью. Для достижения целей диссертационной работы решаются следующие задачи.

1. Модификация схемы телескопа Шмидта-Кассегрена с применением зеркального корректора волнового фронта с неосесимметричной асферизацией и создание прототипа УФ-ВУФ телескопа на её основе.
2. Модификация схемы «камеры Шмидта» с зеркальным корректором и создание на её основе коллиматора, предназначенного для измерения углового разрешения телескопа на всём поле зрения.
3. Разработка рентгенооптической схемы с переменным увеличением и полем зрения, и светосильного объектива с асферизацией первичного

зеркала для микроскопа на длину волны 3.37 нм из «окна прозрачности воды».

4. Разработка алгоритма реконструкции трёхмерного изображения органических клеток по данным z-томографии в светосильной (зеркальной) мягкой рентгеновской микроскопии.

5. Разработка методики измерения формы асферических поверхностей с учетом аберраций корректора волнового фронта и деформации, вызванной весом детали.

6. Разработка метода бездеформационного монтажа прецизионных оптических деталей в оправы и приборы.

Научная новизна работы

1. Впервые предложена, разработана и изучена полнозеркальная модификация схемы телескопа Шмидта-Кассегрена, состоящая из зеркального корректора волнового фронта, имеющего неосесимметричную асферическую поверхность 6-го порядка, и из объектива со сферическими зеркалами. Схема имеет только одно асферическое зеркало, что значительно упрощает изготовление и юстировку, не имеет хроматических аберраций и кривизны поля, обладает большим относительным отверстием 1:3.2, широким полем зрения 3° и разрешением в 1.3".

2. Впервые предложена, разработана и изучена полнозеркальная модификация схемы коллиматора на основе «камеры Шмидта» с использованием зеркального корректора с неосесимметричной асферизацией и выпуклой сферической mirrors в плоскости объектов. Схема имеет относительное отверстие 1:3.2 и поле зрения 3° . Разрешение ограничено дифракцией и составляет $\delta\varphi = 0.5''$ -1" на длинах волн 120 – 380 нм.

3. Впервые предложена и разработана рентгенооптическая схема с переменным увеличением и полем зрения для мягкого рентгеновского микроскопа на длину волны 3.37 нм. Проекционная часть схемы состоит из объектива Шварцшильда (ОШ) и цифрового детектора (ЦД). Изменение увеличения и поля зрения схемы осуществляется заменой оптического объектива ЦД. За счет асферизации первичного зеркала ОШ латеральное разрешение микроскопа улучшается в 6-20 раз по сравнению с классическим ОШ со сферическими зеркалами: до 8 нм с контрастом 30% на поле зрения 10×10 мкм²; до 36 нм (соответствует 2 пикселям при увеличении $\times 195$) с контрастом 90% на поле зрения 40×40 мкм²; и до 76 нм с контрастом 97% на поле зрения 100×100 мкм². За счёт большой числовой апертуры ОШ, равной 0.3, глубина фокуса микроскопа мала и

составляет 37.5 нм, что позволяет проводить z-томографию для трёхмерной реконструкции образцов.

4. Впервые разработан алгоритм и методика реконструкции трёхмерного изображения биологических клеток в светосильных ($NA \gg 0.1$) МРМ за счёт использования z-томографии. Алгоритм учитывает сильное поглощение излучения средой и позволяет применить мощный деконволюционный аппарат, развитый в оптической конфокальной микроскопии, для учёта функции рассеяния точки и эффективного улучшения разрешения. При реконструкции изображения трёхмерной модельной белковой клетки, рассчитанной для МРМ с $NA = 0.3$, $\lambda = 3.37$ нм в случае дифракционно ограниченной оптики было получено 40 нм разрешение с контрастом 50%, что соответствует 20 нм рэлеевскому разрешению с контрастом 20%.

5. Разработана методика измерения формы оптических элементов, позволяющая отделить неосесимметричную ошибку формы измеряемой поверхности от aberrаций корректора волнового фронта и деформации, вызванной весом оптической детали. Методика обеспечивает субнанометровую точность измерений и впервые была использована при аттестации формы асферического зеркала объектива ЭУФ литографа и первичного зеркала рентгеновского космического телескопа для изучения Солнца.

Практическая значимость работы

1. На базе полнозеркальной модификации схемы Шмидта-Кассегрена разработан прототип двухканального УФ-ВУФ телескопа на диапазон длин волн 120 – 380 нм, имеющий входной зрачок диаметром 180 мм, относительное отверстие 1:3.2 и угловое разрешение $\delta\varphi = 1.3''$ на широком поле зрения 3° .

2. На базе полнозеркальной модификации «камеры Шмидта» разработан коллиматор и применен для аттестации углового разрешения УФ-ВУФ телескопа одновременно на всём поле зрения в 3° .

3. Методики измерения формы асферических поверхностей позволили определить деформации формы зеркал и aberrации объективов: ВУФ литографа и телескопов для дистанционного зондирования околоземного пространства и солнечной короны, и измерить форму эллипсоида вращения для рентгеновского микроанализа.

4. Метод бездеформационного монтажа прецизионных оптических деталей в оправы и приборы был использован при разработке макета первичного зеркала космического телескопа обсерватории «АРКА».

Методология и методы исследований

При аттестации aberrаций прототипа телескопа и коллиматора применялся метод автоколлимации, когда лучи проходят схему туда обратно, и точка фокусировки совпадает с точкой установки источника сферической волны. При аттестации aberrаций объектива Шварцшильда и зеркала-эллипсоида применялся метод анаберационных точек: первый источник устанавливался в предметной плоскости, второй источник – в плоскости изображения. Лучи, отражённые от объектива или эллипсоида приходили во вторую анаберационную точку. Модель формирования изображения в высокоапертурной мягкой рентгеновской микроскопии была разработана на базе известной модели Бугера-Ламберта-Бера. Для механических расчётов напряжений и деформаций в зеркале и оправе из-за вибраций и ударов при запуске на орбиту Земли и перепада температур использовалась программа SolidWorks. В ней реализован широко известный метод разбиения твёрдого тела на конечное число элементов-тетраэдров и применяется теория упругости.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика измерения формы оптических поверхностей с использованием поворота детали вокруг оптической оси позволяет отделить неосесимметричную ошибку формы измеряемой поверхности от aberrаций корректора волнового фронта и деформации поверхности из-за веса детали. Ошибка измерений составляет менее 1 нм по параметру СКО.
2. Модификация оптической схемы телескопа Шмидта-Кассегрена за счёт использования зеркального корректора волнового фронта с неосесимметричным профилем асферизации 6-го порядка по r и 2-го порядка по φ позволяет создать зеркальный телескоп с большим полем зрения 3° и разрешением 1.3" для УФ и ВУФ диапазонов длин волн.
3. Модификация схемы «камеры Шмидта» на основе зеркального корректора волнового фронта с неосесимметричной асферизацией и выпуклой сферической миры позволяет создать коллиматор с большим полем зрения 3° и дифракционно ограниченным разрешением 0.5"-1" в зависимости от $\lambda = 120-380$ нм.
4. Оптическая схема мягкого рентгеновского микроскопа на длину волны 3.37 нм, состоящая из объектива Шварцшильда, с асферическим первичным зеркалом, и цифрового детектора позволяет реализовать переменное увеличение $\times 90$, $\times 195$, $\times 920$ и обеспечивает латеральное разрешение: 8 нм с контрастом 30% на поле зрения 10×10 мкм²; 36 нм с

контрастом 90% на поле зрения 40×40 мкм²; 76 нм с контрастом 97% на поле зрения 100×100 мкм², и короткую глубину фокуса 37.5 нм.

5. Алгоритм «восстановления интенсивности» перед деконволюцией позволяет реализовать z -томографию органических клеток в светосильных ($NA \gg 0.1$) мягких рентгеновских микроскопах в том числе в диапазоне длин волн «окна прозрачности воды». На микроскопе с $NA = 0.3$ и $\lambda = 3.37$ нм в случае дифракционно ограниченной оптики разрешение в трёхмерном изображении реконструированной модельной клетки составляет 40 нм с контрастом 50% и 20 нм с рлеевским контрастом 20%.

6. Модификация пластинчатой оправы за счёт использования перемычек и слоя эпоксидного клея в местах контакта оправы и опорной плиты уменьшает деформацию рабочей поверхности оптической детали, возникающую из-за фиксации оправы на опорной плите, до уровня около 1 нм по СКО.

Личное участие автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, были получены соискателем лично или при его непосредственном участии, в том числе, участие в постановке научных задач, измерение аберраций, и разрешения оптических систем и формы поверхности оптических элементов, расчёт и оптимизация оптических систем, анализ и обобщение полученных результатов. В разработке методики и математического аппарата для разделения вклада ошибки формы поверхности асферических поверхностей от аберрации линзового корректора волнового фронта [A11] и от деформации, вызванной весом детали [A9-A10], а также в написании статей по этим тематикам вклад автора является определяющим. Работы по измерению и коррекции формы поверхности зеркал асферического объектива Шварцшильда для ЭУФ-литографа [A8,A13,A15] были проведены совместно с М.Н. Тороповым и А.Е. Пестовым. В разработке методики измерения на ИДВС формы зеркала-эллипсоида скользящего угла падения и написании статьи по этой теме вклад автора - определяющий [A7]. Зеркало-эллипсоид и результаты измерения его формы на интерферометре белого света были предоставлены А.Д. Ахсахаляном. Расчёт модификаций схем Шмидта-Кассегрена и «камеры Шмидта» с использованием зеркального корректора был проведен автором лично. В работах по сборке, юстировке, измерению аберраций и коррекции формы зеркал прототипа ВУФ и УФ телескопа для мониторинга Земли [A12,A14] и коллиматора для измерения его оптических характеристик [A6] автор

принимал участие вместе с М.Н. Тороповым и А.Е. Пестовым. Разработка алгоритма «восстановления интенсивности» перед деконволюцией z-томографических изображений биологических клеток была проделана автором лично [A1,A2]. Разработка модификации оправы для первичного зеркала телескопа «АРКА», которая устраняет деформацию из-за установки зеркала в телескоп, проделана автором лично [A9-A10]. Все исследования, в том числе, постановка задач, обсуждение результатов и написание статей проводились под руководством научного руководителя Н.И. Чхало.

Степень достоверности и апробация результатов

Все результаты, вошедшие в диссертационную работу, представлены в реферируемых научных изданиях и докладывались на научных конференциях. Апробация содержащихся в данной диссертационной работе результатов проводилась на следующих научных конференциях, симпозиумах и совещаниях:

Методика измерения формы оптических поверхностей на основе поворотов оптической детали вокруг оптической оси, позволяющая отделить ошибку формы измеряемой поверхности от: а) деформации поверхности из-за веса детали, а также разработка бездеформационного крепления первичного зеркала для телескопа АРКА докладывались на международной конференции “SPIE. EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space V” в Праге, Чехия, в 2017 г и на конференции «Рентгеновская оптика 2016» в г. Черноголовка, 26-29 сентября 2016; б) аберраций корректора волнового фронта при измерении формы первичного зеркала объектива для ЭУФ-литографа докладывалась на симпозиуме «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2016 г. Методика измерения формы зеркала - эллипсоида скользящего падения на интерферометре с дифракционной волной сравнения (ИДВС) докладывалась на симпозиуме «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2016 г. Методика z-томографии для мягкой рентгеновской микроскопии и состояние дел по изготовлению МРМ докладывались на симпозиуме «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, в 2018 и 2019г. Возможности интерферометра с дифракционной волной сравнения для аттестации формы супергладких поверхностей с ошибкой формы на уровне единиц нанометров докладывались на конференции «Physics of X-Ray and Neutron Multilayer Structures» в Пализо (Франция) в 2018г.

Краткое содержание диссертации

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. В первой части делается обзор телескопов – рефлекторов и сравниваются их характеристики. Во второй части делается обзор по мягким рентгеновским микроскопам для «окна прозрачности воды»: длины волн 2.3 – 4.4 нм. Обсуждаются проблемы, не позволяющие в МРМ на ЗПФ реализовать томографию с разрешением лучше 60-100 нм. В третьей части обсуждается воздействие внешних факторов на результаты измерений формы поверхности оптических деталей: веса; способа монтажа в прибор и изменение температуры. На основе обзора дается обоснование актуальности и значимости задач, решаемых в диссертационной работе.

Вторая глава посвящена разработке полнозеркальных модификаций: телескопа Шмидта-Кассегрена (ШК) с зеркальным корректором (ЗК) (рис. 1) и коллиматора на основе «камеры Шмидта» с ЗК, предназначенного для одновременного измерения разрешения телескопа на всём поле зрения. Расчёт схемы телескопа проводится с использованием сумм Зейделя сферической аберрации, комы и астигматизма. Такой подход применялся в [13] для расчёта классического Шмидта-Кассегрена с линзовым корректором и позволяет сделать габаритный расчёт, т.е. найти расстояния и радиусы кривизны зеркал, а также осесимметричную часть асферического профиля зеркального корректора (рис. 2а). Дальнейший расчёт неосесимметричной части асферического профиля проведён в оптической программе трассировки лучей Zemax. Для устранения комы и астигматизма, вызванных наклоном ЗК относительно оптической оси объектива (см. рис. 1) коэффициенты при соответствующих полиномах задаются переменными, и проводится минимизация размеров пятен фокусировки телескопа для выбранных точек на поле зрения 3° , в итоге находится неосесимметричная часть асферизации ЗК (рис. 2б). Трассировка лучей производится по закону Снеллиуса.

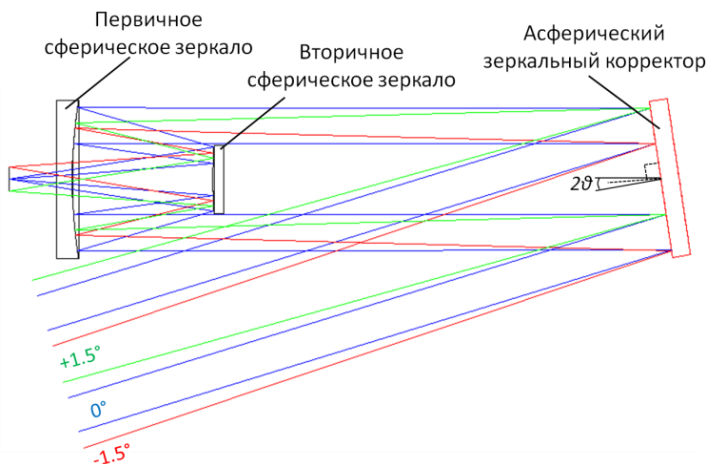


Рис. 1. Схема модификации телескопа Шмидта-Кассегрена с зеркальным асферическим корректором и сферическими зеркалами объектива.

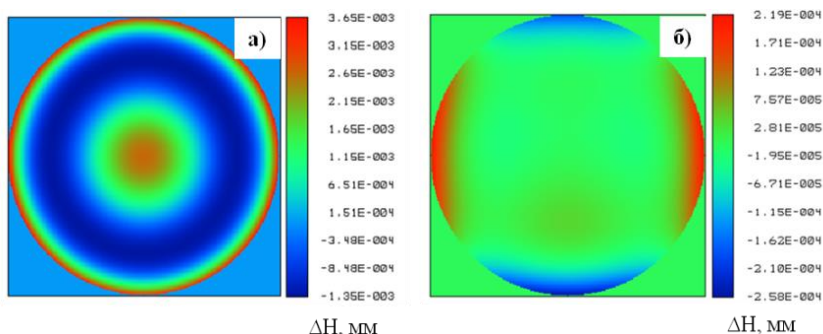


Рис.2. Профили асферизации зеркального корректора: а) осесимметричная часть (максимальный перепад высот МП=5мкм); б) неосесимметричная часть (МП≈0.5мкм).

Модификация схемы ШК сохраняет все её достоинства: близкое к дифракционному разрешение в 1.3", широкое поле зрения 3°, большое относительное отверстие $\approx 1:3$, приводящее к большой светосиле при компактных габаритах телескопа, а также плоскую поверхность изображения (отсутствие кривизны поля), но в тоже время обладает двумя существенными преимуществами по сравнению с ней: 1) отсутствуют линзы, поэтому есть возможность работы в ВУФ и МР диапазоне, где поглощение стекла не позволяет использовать телескопы с линзами; 2) нет хроматических aberrаций.

На основе предложенной схемы разрабатывается прототип двухканального телескопа для ДЗЗ в УФ и ВУФ диапазонах длин волн. Описывается методика измерения aberrаций прототипа телескопа и его пятен фокусировки по полю зрения на ИДВС в автоколлимационной схеме.

Также рассчитывается модификация оптической схемы коллиматора – «камеры Шмидта» с ЗК; разрабатывается на её основе коллиматор; и с его помощью аттестуется разрешение телескопа. Коллиматор имитирует удалённые объекты, свет от которых приходит в телескоп с углов зрения от -1.5° до $+1.5^\circ$. Эксперимент показывает, что в видимом диапазоне прототип телескопа способен увидеть даже 6-мкм полосы мираы коллиматора, что соответствует разрешению $1.5-1.7''$ в зависимости от точки на поле зрения (рис. 3). Построенные функции передачи частоты прототипа телескопа с учётом измеренных aberrаций показывают, что на рабочих длинах волн 120-380 нм среднее по длинам волн и углам зрения разрешение составляет $1.3''$, что совпадает с расчётным разрешением и немного лучше измеренного на видимом свете, т.к. дифракционное уширение играет меньшую роль.

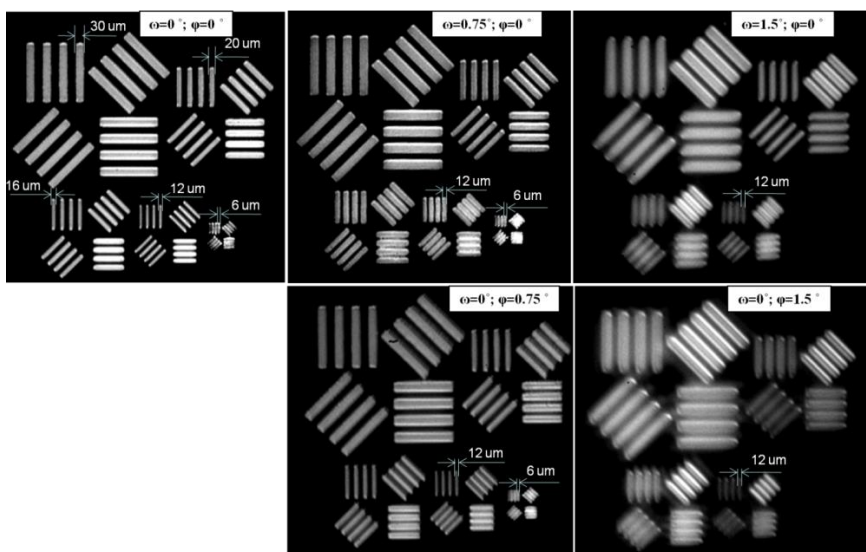


Рис. 3. Качество изображения полос мираы коллиматора в плоскости изображения телескопа при различных углах зрения телескопа.

В третьей главе предлагается схема светосильного мягкого рентгеновского микроскопа на основе зеркальной оптики на длину волны

3.37 нм из «окна прозрачности воды». За счёт использования сменных линзовых объективов микроскоп позволяет легко менять увеличение от 90 до 920 крат и поле зрения от 10×10 мкм² до 100×100 мкм² (рис. 4а). За счёт большой числовой апертуры $NA = 0.3$ проекционного объектива Шварцшильда (ОШ) микроскоп имеет малую глубину фокуса 37 нм, что впервые делает возможным применение z-томографии образцов в МРМ, что, в сочетании с предлагаемым алгоритмом трёхмерной реконструкции изображения, теоретически позволяет получить 3D-разрешение на уровне 20 нм. Большая светосила по сравнению с микроскопами на зонных пластинках Френеля (ЗПФ) уменьшает время экспозиции образцов на порядок, до нескольких секунд. Максимальное увеличение предлагаемой схемы до 920 крат в сочетании с дифракционным разрешением ОШ по расчёту позволяет получить разрешение двумерных объектов до 8 нм с контрастом 30% на поле зрения 10×10 мкм², а также разрешение трёхмерных объектов до 20 нм с контрастом 20%, что больше чем на порядок превышает дифракционный предел разрешения в оптической микроскопии. 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.

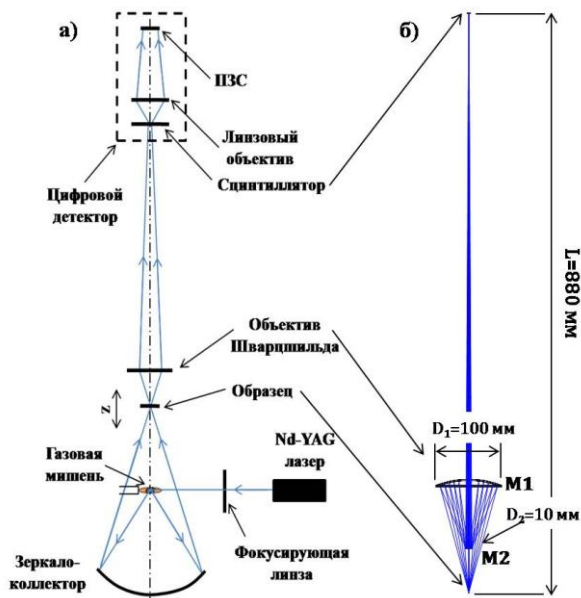


Рис. 4. а) Схема зеркального МР-микроскопа; б) Объектив Шварцшильда.

Во второй части главы предлагается новый метод z-томографии для светосильных ($NA \gg 0.1$) МРМ, когда образец сдвигается вдоль оптической оси, и делается серия его снимков. Для реконструкции трёхмерной структуры образца по данным z-томографии в условиях сильного поглощения в МР диапазоне, разрабатывается алгоритм «последовательного восстановления интенсивности» перед деконволюцией, который позволяет свести сложную обратную задачу нахождения структуры коэффициента поглощения образца $\mu(x, y, z)$ по измеренным z-проекциям $\Delta I(x, y, z_s)$:

$$\Delta I(x, y, z_s) = \int_{z_a}^{z_b} \left(\mu(x, y, z) I^0(x, y) \cdot \exp\left(-\int_{z_a}^z \sum_{\substack{Rays, \\ NA \leq 0.3}} \mu(x, y, z') / N_R dz'\right) \right) \otimes_{x,y} h(x, y, z - z_s) dz$$

к классической обратной задаче, решаемой в оптической микроскопии:

$$I_1(x, y, z_s) = \int_{z_a}^{z_b} \mu(x, y, z) I^0(x, y) \otimes_{x,y} h(x, y, z - z_s) dz,$$

где в первом и последующих тонких слоях (с толщиной \ll глубины проникновения в белок) «восстановленная интенсивность» I_1 равна:

$$I_1(z_s \in z_a \div z_1) = \Delta I(z_s \in z_a \div z_1) \cdot \exp\left(\int_{z_a}^{z_s} \sum_{\substack{Rays, \\ NA \leq 0.3}} \frac{\Delta I(z' \in z_a \div z_1)}{I^0 \Delta z \cdot N_R} dz'\right)$$

$$I_1(z_s \in z_{n-1} \div z_n) = \Delta I(z_s \in z_{n-1} \div z_n) \cdot \exp\left(\int_{z_a}^{z_{n-1}} \sum_{\substack{Rays, \\ NA \leq 0.3}} \frac{I_1(z' \in z_a \div z_{n-1})}{I^0 \Delta z \cdot N_R} dz' + \int_{z_{n-1}}^{z_s} \sum_{\substack{Rays, \\ NA \leq 0.3}} \frac{\Delta I(z' \in z_{n-1} \div z_n)}{I^0 \Delta z \cdot N_R} dz'\right)$$

Проводится деконволюционная реконструкция трёхмерного изображения модельной белковой клетки почек (рис.5), встречающейся в статьях, например в [12], в случае дифракционно ограниченной оптики: по стандартному для оптической конфокальной микроскопии методу (рис. ба) и по предлагаемому методу с «восстановлением интенсивности» (рис. бб). В стандартном методе не учитывается сильное поглощение МР излучения, поэтому после деконволюционной реконструкции возникает двоение изображения. После «восстановления интенсивности» дальнейшие по ходу движения лучей области клетки становятся видны, поэтому деконволюция проходит успешно, и все органеллы приобретают правильную форму. Белковые шарики диаметром 40 нм, в плотном расположенные друг к другу (рис. 5б), в реконструированном изображении имеют контраст 50%, что соответствует 20 нм разрешению с рэлеевским 20% контрастом.

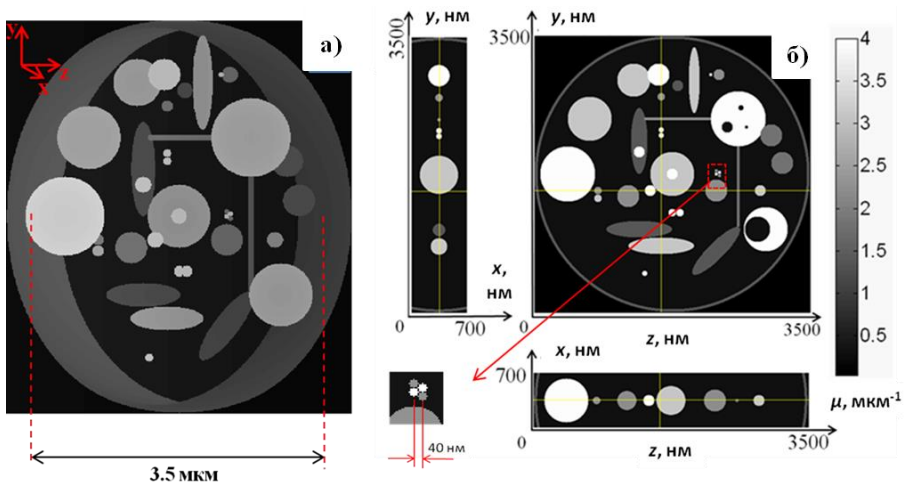


Рис. 5. Распределение μ в моделируемом образце – клетке с белковыми органеллами: а) объёмное изображение, вид полуанфас; б) сечения клетки

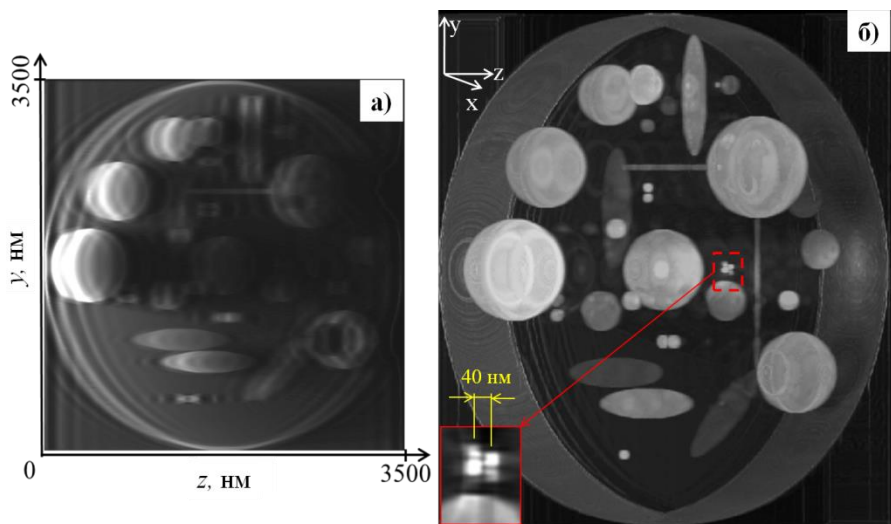


Рис. 6. Результаты деконволюционной реконструкции изображения: а) по стандартному для конфокальной микроскопии методу; б) по предлагаемому методу с «восстановлением интенсивности». Увеличено YZ-сечение 40 нм шариков.

Четвёртая глава посвящена разработке методов измерения асферических поверхностей 2-го и более высоких порядков на

интерферометре с дифракционной волной сравнения (ИДВС)[14]. Разрабатывается методика измерения формы поверхности первичного асферического зеркала, описываемой полиномом 6-го порядка по r , позволяющая учесть aberrации линзового корректора. Она основана на поворотах зеркала вокруг оптической оси при неподвижном корректоре и решении системы уравнений с неизвестными: картой поверхности зеркала и картой aberrаций корректора, сумма которых даёт измеряемые на интерферометре aberrации. Предложенная методика в сочетании с высокой точностью ИДВС позволяет определить и в итоге скорректировать СКО ошибки формы поверхности до уровня 0.8 нм (рис. 7а) - на уровне ошибки измерений (рис. 7в). Найденная карта aberrаций корректора имеет СКО = 3.7 нм (рис. 7б).

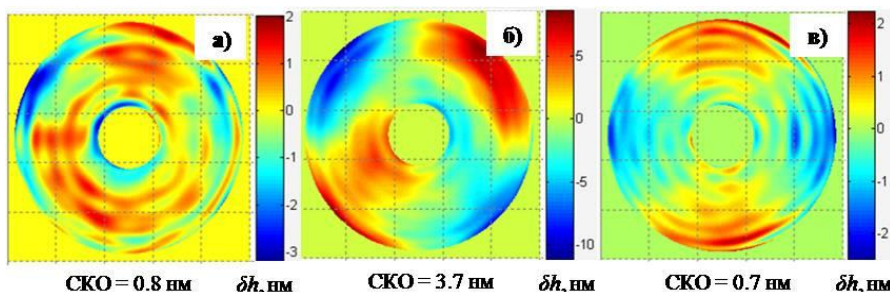


Рис. 7. Найденные карты: а) ошибка формы поверхности зеркала ($d = 200$ мм); б) aberrации корректора; в) ошибка измерений.

Также разрабатывается методика измерения рентгеновских зеркал скользящего падения с асферизацией 2-го порядка на ИДВС. Проводится эксперимент по измерению формы рентгеновского зеркала-эллипсоида и сравнение результатов измерений на ИДВС и на интерферометре белого света (ИБС), совпавших с точностью 24 мкрад (определяется ошибками сшивки кадров на ИБС), которая в 20 раз выше точности изготовления таких коммерчески доступных зеркал[15].

В пятой главе разрабатывается модификация пластинчатой оправы [11] для монтажа первичного зеркала телескопа солнечной обсерватории АРКА, которая позволила уменьшить деформацию зеркала из-за его установки и фиксации в телескопе более чем на 2 порядка до СКО ≈ 1 нми фактически сделать оправу бездеформационной. Рассчитываются оптимальные размеры перемычек, пластин и слоя эпоксидного клея, обеспечивающие, с одной стороны, максимальное уменьшение деформации зеркала из-за установки оправы с зеркалом в телескоп при наличии остаточных 5-микронных зазоров между притёртыми плитой

телескопа и оправой, а, с другой стороны, выдерживающие нагрузки при запуске ракеты (рис. 8а). По методике поворотов, разработанной в 4й главе, с точностью 1 нм по СКО определяется деформация поверхности зеркала из-за его веса (рис. 8б). Учёт этой деформации обязателен, потому что в космосе она пропадёт, что приведёт к 4х-кратному ухудшению разрешения.

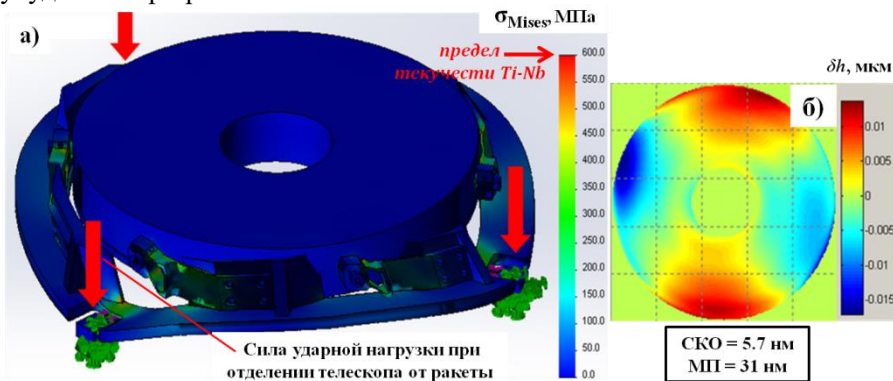


Рис. 8. а) Напряжения в оправе; б) Деформация зеркала из-за веса.

За счёт использования гибких пластин и Ti-Nбсплава с ТКР близким к ТКР кварца возможноена орбите Земли изменение температуры на 30 °С приводит только к локальным деформациям оптической поверхности в местах, где зеркало крепится в оправу на эпоксидный клей, что вызывает только 10% уменьшение концентрации энергии в 0.1"-пикселе ПЗС матрицы.

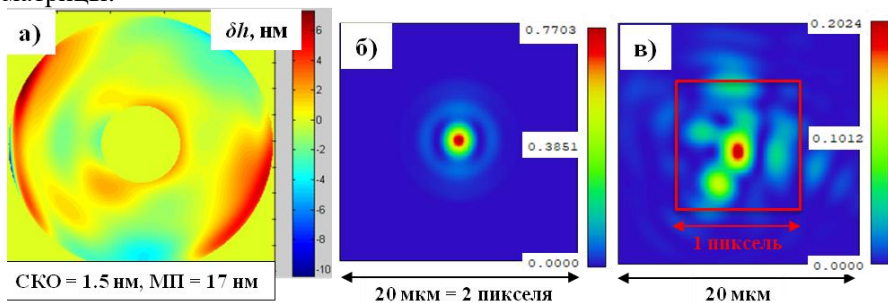


Рис. 9. а) Деформация из-за установки зеркала в телескоп + ошибка измерений; б) расчётное пятно фокусировки; в) пятно фокусировки с учётом карты (а).

Измеренная деформация из-за установки зеркала в телескоп вместе с ошибкой измерения на ИДВС (рис. 9а) приводит к 30% уменьшению

концентрации энергии в 0.1"-пикселе ПЗС матрицы (рис. 9б,в), поэтому разработанный метод монтажа позволяет телескопу АРКА увидеть детали Солнца с равным расчётному разрешением 0.1".

В заключении сформулированы выводы по результатам работы.

Основные результаты работы

К основным результатам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Разработана методика измерения формы оптических элементов с произвольной формой поверхности, позволяющая 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.

2. Разработана методика бездеформационного крепления высокоточных зеркал в металлические оправы и последующей установки в приборы. Метод сохраняет форму поверхности зеркал на уровне 1 нм в диапазоне температур -5 ... +55 °С и допускает запуск в космос.

3. Предложена модификация схемы Шмидта-Кассегрена с зеркальным асферическим корректором aberrаций, описываемым профилем 6-го порядка, и сферическими зеркалами объектива. Схема обеспечивает близкое к дифракционному 1.3" разрешение на широком поле зрения 3°. На основе этой схемы создан прототип двухканального телескопа для ВУФ и УФ диапазонов ($\lambda=120-380$ нм) с диаметром входного зрачка 180 мм и средним по полю зрения и длинам волн разрешением 1.3".

4. Предложена, реализована и изучена модификация схемы «камеры Шмидта» с зеркальным асферическим корректором aberrаций 6-го порядка с дифракционно ограниченным разрешением 0.5" в ВУФ диапазоне и разрешением 0.5" - 1" в УФ диапазоне. На основе этой схемы разработан коллиматор для изучения телескопов с полем зрения до 3°.

5. Разработана схема МРМ на длину волны 3.37 нм на основе высокоапертурного объектива Шварцшильда с числовой апертурой $NA = 0.3$ и цифрового детектора. Схема обеспечивает сменное увеличение $\times 90$, $\times 195$ и $\times 920$ крат 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 ОШ: до 8 нм с контрастом 30% на поле зрения 10×10 мкм²; 36 нм

(соответствует 2 пикселям при увеличении $\times 195$) с контрастом 90% на поле зрения 40×40 мкм²; 76 нм с контрастом 97% на поле зрения 100×100 мкм².

6. Разработан алгоритм реконструкции трёхмерного строения органических клеток по данным z-томографии в светосильной мягкой рентгеновской микроскопии в спектральной области «окна прозрачности воды». Для МРМ на основе ОШ на длине волны 3.37 нм в пределах дифракционно ограниченной оптики алгоритм обеспечивает разрешение 3D структуры 40 нм с контрастом 50%, что соответствует 20 нм релеевскому разрешению с контрастом 20% .

Список публикаций автора

A1. Малышев, И.В. Состояние разработки микроскопа на длину волны 3.37 нм в ИФМ РАН / И. В. Малышев, А. Е. Пестов, В. Н. Полковников, Н. Н. Салащенко, М. Н. Торопов, Н. И. Чхало // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2019. №1, С. 1–11.

A2. Malyshev, I.V. A method of z-tomography using high-aperture soft X-ray microscopy / Ilya V. Malyshev, Nikolay I. Chkhalo // Ultramicroscopy. - 2019. V.202, P.76-86.

A3. Чернышев А.К. Моделирование процесса коррекции локальных ошибок формы поверхности малоразмерным ионным пучком / А.К. Чернышев, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало // ЖТФ. - 2019. Т.89, №11, С. 1650-1655.

A4. Чхало, Н.И. Бериллий как материал для термостойких рентгеновских зеркал / Н.И. Чхало, М.В. Зорина, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Д.С. Казаков, А.В. Мильков, И.Л. Струля // ЖТФ. - 2019. Т.89, №11, С. 1686-1691.

A5. Чхало, Н.И. Ошибки измерений интерферометров с дифракционной волной сравнения / А.А. Ахсаханян, Д.А. Гаврилин, И.В. Малышев, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов, Б.А. Уласевич, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало // ЖТФ. - 2019. Т.89, №11, С. 1789-1794.

A6. Chkhalo, N.I. Collimator based on a Schmidt camera mirror design and its application to the study of the wide-angle UV and VUV telescope / Nikolay Ivanovich Chkhalo, Ilya Vyacheslavovich Malyshev, Alexey Evgenievich Pestov, Vladimir Nikolaevich Polkovnikov, Nikolay Nikolaevich Salashchenko, Michael Nikolaevich Toropov, Sergey N. Vdovichev, Igor Leonardovich Strulya, Yuri Alexandrovich Platinin, Artem A. Rizvanov // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. - 2018. V.4. No.1, P.014003.

- A7. Malyshev, I.V. Surface shape measurement of mirrors in the form of rotation figures by using point diffraction interferometer / I. V. Malyshev, N. I. Chkhalo, A. D. Akhsahalian, M. N. Toropov, N. N. Salashchenko & D. E. Pariev // *Journal of Modern Optics*. - 2017. V.64, No.4, P. 413–421.
- A8. Chkhalo, N.I. High-performance facility and techniques for high-precision machining of optical components by ion beams / N.I. Chkhalo, I.A.Kaskov, I.V. Malyshev, M.S. Mikhaylenko, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, I.G. Zabrodin // *Precision Engineering*. - 2017. V.48, P.338–346.
- A9. Vishnyakov, E.A. Joint observations of solar corona in space projects ARKA and KORTES / Eugene A. Vishnyakov, Sergey A. Bogachev, Alexey S. Kirichenko, Anton A. Reva, Ivan P. Loboda, Ilya V. Malyshev, Artem S. Ulyanov, Sergey Y. Dyatkov, Nataliya F. Erkhova, Andrei A. Pertsov, Sergey V. Kuzin // *Proc. SPIE*. - 2017. P.102350B.
- A10. Malyshev, I.V. Deformation-free rim for the primary mirror of telescope having sub-second resolution / I. V. Malyshev, N. I. Chkhalo, M. N. Toropov, N. N. Salashchenko, A. E. Pestov, S. V. Kuzin, V. N. Polkovnikov / *Proc. SPIE*. - 2017. P.102350C.
- A11. Chkhalo, N.I. Problems in the application of a null lens for precise measurements of aspheric mirrors / N. I. Chkhalo, I. V. Malyshev, A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, M. N. Toropov, and A. A. Soloviev // *Applied Optics*. – 2016. V.55, No.3, P. 619–625.
- A12. Chkhalo, N.I. Reflective Schmidt–Cassegrain system for large-aperture telescopes / M. N. Brychikhin, N. I. Chkhalo, Ya. O. Eikhorn, I. V. Malyshev, A. E. Pestov, Yu. A. Plastinin, V. N. Polkovnikov, A. A. Rizvanov, N. N. Salashchenko, I. L. Strulya, and M. N. Toropov // *Applied Optics*. - 2016. V.55, No.16, P. 4430–4435.
- A13. Малышев, И. В. Методика аттестации асферических зеркал объектива ЭУФ-литографа на длину волны 13.5 нм / И. В. Малышев, М. Н. Торопов, Н. И. Чхало // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. - 2015. № 7, С. 87–92.
- A14. Акопов, А.К. Высокочувствительный многоканальный телескоп ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового диапазонов спектра для обнаружения сверхслабых излучений объектов. / А.К. Акопов, М.Н. Брычихин, Ю.А. Пластинин, А.А. Ризванов, И.Л. Струля, Я.О. Эйхорн, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // *Космонавтика и ракетостроение*. - 2014. Т.78, №5, С.77–85.
- A15. Малышев, И.В. Изготовление и аттестация проекционного объектива для ЭУФ-литографа на длину волны 13.5 нм / И. В. Малышев, М. Н. Торопов, Н. И. Чхало // *Вестник ННГУ*. - 2014. №1(2), С.178–184.

Список цитируемой литературы

1. Пономарёв, Д.Н. *Астрономические обсерватории Советского Союза* / Д.Н. Пономарёв. - М.: Наука, 1987, - 202 с.
2. Lew, Allen. *The Hubble Space Telescope Optical Systems Failure Report* / Allen Lew et al. // NASA-TM-103443. - 1990, P.C-7.
3. West, Steve C. *Progress at the Vatican Advanced Technology Telescope* / Steve C. West, Robert H. Nagel, David Allen Harvey, A. Brar, B. Phillips, J. Ray, Thomas J. Trebisky, Richard H. Cromwell, Neville J. Woolf, Chris Corbally, R. Boyle, Daniel R. Blanco, and L. Otten // Proc. SPIE, *Optical Telescopes of Today and Tomorrow*. - 1997. - V.2871, P.74-85.
4. Brooks, Paul. *Topsat – high resolution imaging from a small satellite* / Paul Brooks // *Acta Astronautica*. - 2003. - V.52, P.905-914.
5. L. G. Cook. *Three mirror anastigmatic optical system* // U.S. patent 4265510. - 1981.
6. Takman, P. A. C. *High-resolution compact X-ray microscopy* / P. A. C. Takman, H. Stollberg, G. A. Johansson, A. Holmberg, M. Lindblom and H. M. Hertz // *Journal of Microscopy*. - 2007. V.226, P. 175–181.
7. Weib, D. *Computed tomography of cryogenic biological specimens based on X-ray microscopic images* / D. Weib, G. Schneider, B. Niemann, P. Guttman, D. Rudolph, G. Schmah // *Ultramicroscopy*. - 2000. V.84, P. 185-197.
8. Bertilson, Michael. *Laboratory soft-x-ray microscope for cryotomography of biological specimens* / Michael Bertilson, Olov von Hofsten, Ulrich Vogt, Anders Holmberg, E. Athanasia, Christakou, Hans M. Hertz // *Opt. Lett.* - 2011. V.36. No.14. P. 2728-2730.
9. Bertilson, Michael. *High-resolution computed tomography with a compact soft x-ray microscope* / M Bertilson, O.vonHofsten, U. Vogt, A. Holmberg, H.M. Hertz // *Opt. Express*. - 2009. V.17. No.13, P.11057–11065.
10. Kak, A.C. *Principles of computerized tomographic imaging* / A.C. Kak, M. Slaney. - IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Press., 1988, P. 49.
11. Cheimets, Peter. *SDO-AIA Telescope Design* / Peter Cheimets, David C. Caldwell, Cathy Chou, Richard Gates, James Lemen, William A. Podgorski, C. Jacob Wolfson, Jean-Pierre Wuelser // *Proc. of SPIE*. - 2009. V.7438, P. 74380G-1.
12. Кузин, С. В. *Исследование солнечной короны со сверхвысоким пространственным разрешением в проекте «АРКА»* / С. В. Кузин, С. А. Богачев, А. А. Перцов, С. В. Шестов, А. А. Рева, А. С. Ульянов // *Известия РАН. Серия Физическая*. - 2011. Т. 75, С. 91-94.
13. Михельсон, Н.Н. *Оптические телескопы. Теория и конструкция* - М.: Физматлит, - 1976. 511с.
14. Chkhalo, N.I. *A source of a reference spherical wave based on a single mode optical fiber with a narrowed exit aperture* / N. I. Chkhalo, A. Y. Klimov, V. V. Rogov, N. N. Salashchenko, and M. N. Toropov // *Rev. Sci. Instrum.* - 2008. V. 79, P. 033107.
15. <https://www.xenocs.com/products/components/>

Мальшев Илья Вячеславович

**ЗЕРКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АСФЕРИЧЕСКИХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ ДЛЯ МЯГКОГО
РЕНТГЕНОВСКОГО И ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО
ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН**

Подписано к печати 17.10.2019

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН
603950, Нижний Новгород, ГСП-105