

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук»

На правах рукописи

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно - квалификационной работы (диссертации)

**Зеркальные системы на основе асферических поверхностей высоких порядков для
мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового диапазонов длин волн**

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в
аспирантуре

направление подготовки: 03.06.01 — Физика и астрономия

направленность (профиль): 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Выполнил аспирант: _____ Малышев Илья Вячеславович

Научный руководитель: _____ доктор физ.-мат. наук:

Чхало Николай Иванович

дата: ____ июня 2019г.

Нижний Новгород – 2019г.

Актуальность темы и степень ее разработанности

В спектральной области мягкого рентгеновского (МР) ($\lambda=0.3-10$ нм) и вакуумного ультрафиолетового излучения (ВУФ) ($\lambda=10-200$ нм) интерес к высокоразрешающим оптическим системам сопровождается интенсивным развитием технологии измерения и коррекции поверхностей оптических элементов, а также созданием новых оптических систем на основе асферических поверхностей (АП). Использование АП в оптических приборах позволяет добиться лучшего разрешения и поля зрения при меньшем числе оптических элементов, массе и габаритах. Особенно выгодно использовать асферические поверхности в МР и ВУФ диапазонах, где число зеркал лучше делать минимальным из-за малости коэффициентов отражения. Применительно к задаче дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) важным становится размер поля зрения телескопа: чем он 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.) применения находят только зеркальные телескопы – рефлекторы. Классические двухзеркальные схемы рефлекторов на основе АП второго порядка: схема Кассегрена, Ричи-Кретьена, Грегори имеют малые углы поля зрения до 1° [1-3]. Трёхзеркальные схемы (с дополнительным четвертым плоским зеркалом для удобного расположения ПЗС – камеры) имеют большие поля зрения: в схеме Корша до 4° и в схеме Кука до 14° в сагиттальном направлении и до 1.5° в меридиональном, но имеют малые относительные отверстия, большие габариты и сложные в изготовлении и юстировке внеосевые асферические зеркала [4-8]. Поэтому актуальной является разработка новых схем для телескопов ВУФ диапазона на основе АП высоких порядков, которые превосходят классические схемы по полю зрения и разрешению, имеют минимальное число поверхностей.

В МР диапазоне на протяжении последних 30-ти лет активно развивается мягкая рентгеновская микроскопия (МРМ). Особенности взаимодействия мягкого рентгеновского излучения с веществом в «окне прозрачности воды», длины волн 2.3 – 4.4 нм, 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 десятка микрометров на поле зрения около 10 мкм и разрешением в несколько десятков нанометров [9,10], что на порядок лучше разрешения микроскопов видимого света в 200-300 нм. В качестве изображающего объектива в МРМ используются зонные пластинки Френеля. При этом лучшее латеральное разрешение, полученное на МРМ, в изображении объемных белковых образцов в результате угловой томографии составляет 70 нм с синхротронным высокомономохроматичным источником [11] и 100 нм с лабораторным лазерно-плазменным источником [12] при дифракционном пределе

используемых в [11,12] ЗПФ 40-50 нм (определяется шириной последней зоны пластинки). Достигнутое аксиальное разрешение при угловой томографии хуже 100 нм [12,13]. Не достижение дифракционного предела связано с тремя факторами. Во-первых, при восстановлении трёхмерного изображения образца по серии его угловых проекций пользуются методом «фильтрации обратных проекций» [14], который предполагает, что лучи строго параллельны, т.е. размер образца вдоль оптической оси гораздо меньше глубины фокуса ЗПФ. На практике используют ЗПФ с глубиной фокуса 1-1.5 мкм [11-13], а изучают клетки с аксиальным размером 5 – 10 мкм, поэтому лучи не параллельные. Появившиеся методы учёта непараллельности лучей [15,16] 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 [11-13], поэтому шумы ПЗС-детектора и дрейф образца из-за температурных колебаний, внешних вибраций и броуновского движения клеток значительны. В-третьих, на практике центр вращения столика с образцом не совпадает с центром образца, поэтому при сканировании по углу возникают смещения образца по всем направлениям. Сложность юстировки и накопление образцом нежелательной дозы при юстировке приводит к тому, что шаг по углу выбирают довольно большим, равным $1-2^\circ$ [12,17], это, согласно критерию Кроувера, [18], 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, в литературе это называется «отсутствие клина». Обычно, углы сканирования от $\pm 40^\circ$ [12] до $\pm 60^\circ$ [6], хотя есть и работа, где образец помещается на конце зауженного капилляра, и углы сканирования составляют уже $\pm 90^\circ$ [11,13,19]. 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 100 нм. Поэтому актуальным является создание нового типа МРМ – на основе светосильного объектива Шварцшильда и методики z-томографии образцов для него, которая позволит получить трёхмерное изображение с латеральным и аксиальным разрешением < 100 нм.

Для достижения дифракционного качества изображений в ВУФ и МР диапазонах требования к точности формы поверхностей изображающего объектива очень жёсткие в силу малости длины волны. Согласно критерию Марешаля, aberrации не должны превышать $\lambda/14$, поэтому для двухзеркального объектива на длину волны $\lambda = 3.37$ нм (из «окна прозрачности воды») остаточная ошибка формы поверхностей не должна превышать по параметру среднеквадратического отклонения (СКО) величину $\lambda/(2 \cdot 14 \cdot \sqrt{2}) \approx 0.1$ нм (множитель 1/2 из-за того, что при зеркальном отражении набег фазы в aberrациях в 2 раза больше ошибки формы,

множитель $1/\sqrt{2}$ из-за того что зеркала два, и ошибки зеркал независимы). Для достижения дифракционного предела для двухзеркального объектива, работающего в ВУФ диапазоне, остаточная ошибка формы по СКО должна быть на уровне 0.3 – 5 нм. На таком уровне точностей воздействие на форму оптических элементов внешних факторов: веса оптической детали, aberrаций интерферометра, деформации из-за прижима оптической детали в оправе к опорной плите (далее: «деформации из-за прижима») резко возрастает. Проблема метрологии и коррекции формы осложняется тем, что изображающие объективы и телескопы имеют в своём составе асферические поверхности.

Аттестация формы и aberrаций 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 [20]. Поэтому необходимо учитывать ошибки, вносимые корректорами. Таким образом, актуальность этой части работы заключается в разработке способа учёта aberrаций корректоров волнового фронта, используемых для аттестации асферических поверхностей.

Во-вторых, необходимо учитывать деформацию оптической поверхности из-за её веса. Особенно это важно при аттестации aberrаций телескопов космического базирования, потому что на орбите веса нет, и форма и aberrации телескопа отличаются от измеряемых на Земле [21, 22]. В-третьих, оптические элементы устанавливаются в оправы, поэтому важной является разработка креплений, которые вносят в установленный в них оптический элемент минимальные «деформации из-за прижима» [23]. В-четвёртых, в задачах, где есть значительный перепад температур, например, в космических телескопах, есть проблема деформации поверхности из-за изменения температуры [24]. Для нас задача бездеформационного крепления, обеспечивающего минимальную деформацию формы зеркала из-за: веса, прижима в креплении и перепада температур, особенно актуальна в связи с работами по созданию новой солнечной обсерватории «АРКА», в которой требуется достичь сверхвысокого разрешения в 0.1"[25].

Цели и задачи диссертационной работы

1. Разработка методики измерения формы поверхности асферических поверхностей на фоне aberrации корректора волнового фронта и деформации, вызванной весом детали.
2. Разработка модифицированной схемы телескопа Шмидт-Кассегрена с применением зеркального корректора волнового фронта и создание прототипа УФ-ВУФ телескопа на её основе, предназначенного для мониторинга околоземного пространства на длинах волн 120 – 380 нм.

3. Разработка светосильного высокоточного коллиматора на основе модифицированной схемы «камеры Шмидта» для измерения углового разрешения и поля зрения УФ-ВУФ телескопа.
4. Разработка рентгенооптической схемы и светосильного объектива с асферизацией первичного зеркала, описываемой полиномом высокого порядка, для микроскопа на «окно прозрачности воды» ($\lambda = 3.37$ нм).
5. Разработка алгоритма учёта поглощения при реконструкции трёхмерного изображения, полученного путём z-томографии органических образцов в светосильном микроскопе на длину волны 3.37 нм с числовой апертурой $NA \gg 0.1$.

Научная новизна работы

1. Разработана методика измерения формы зеркал скользящего падения второго порядка на интерферометре с дифракционной волной сравнения.
2. Рассчитана, изготовлена и изучена полнозеркальная модификация схемы телескопа Шмидт-Кассегрена, состоящая из зеркального корректора волнового фронта, имеющего неосесимметричную асферическую поверхность 6-го порядка, и из объектива со сферическими зеркалами. Схема имеет относительное отверстие 1:3.2, не имеет хроматических aberrаций и кривизны поля изображения, и по расчёту обеспечивает среднее угловое разрешение $\delta\varphi = 1''$ на поле зрения $2\omega = 3^\circ$. На практике угловое разрешение составило $1.5''$ на поле зрения $\pm 0.75^\circ$ и до $3.5''$ на поле зрения $\pm 1.5^\circ$.
3. Рассчитана, изготовлена и изучена полнозеркальная модификация схемы коллиматора на основе «камеры Шмидта» с неосесимметричным асферическим зеркальным корректором волнового фронта и выпуклой сферической мюрой в плоскости объектов. По расчёту схема имеет среднее угловое разрешение $\delta\varphi = 0.5''$. На практике получено разрешение $1.4''$. Относительное отверстие 1:3.2, поле зрения $2\omega = 3^\circ$.
4. Асферизация 6-го порядка первичного зеркала объектива Шварцшильда уменьшила его пятна фокусировки более чем в 20 раз на поле зрения 10 мкм: с 6 мкм до 0.22 – 0.34 мкм и более чем в 6 раз на поле зрения 100 мкм и во столько же раз улучшила латеральное разрешение: до 14 нм с контрастом 67% на поле зрения 10 мкм и до 144 нм (ограничивается пикселем) с контрастом 98% на поле зрения 100 мкм.
5. Разработан алгоритм реконструкции трёхмерного изображения в светосильных ($NA \gg 0.1$) мягких рентгеновских микроскопах (МРМ) с z-томографией биологических клеток, учитывающий поглощение излучения средой при решении обратной деконволюционной задачи. Алгоритм позволяет применить мощный деконволюционный аппарат, развитый в оптической микроскопии, для учёта функции рассеяния точки и эффективного улучшения разрешения. В результате реконструкции изображения трёхмерной модельной белковой клетки,

рассчитанного для МРМ дифракционного качества с $NA = 0.3$ и $\lambda = 3.37$ нм, было получено 40 нм «объемное» разрешение с контрастом 50%. В случае с МРМ с измеренными aberrациями на уровне СКО = 5.2 нм «объемное» разрешение составило 70-90 с контрастом 50%.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана методика измерения формы оптических поверхностей (в том числе асферических) на основе поворотов оптической детали вокруг оптической оси (далее «методика поворотов»), позволяющая отделить ошибку формы измеряемой поверхности от aberrации корректора волнового фронта и деформации поверхности из-за веса детали.
2. По предложенной «методике поворотов» были определены aberrации линзового корректора с точностью 0.7 нм по СКО и форма поверхности вогнутого асферического зеркала объектива ЭУФ-литографа на длину волны 13.5 нм. Также по «методике поворотов» с точностью 0.9 нм по СКО была определена деформация первичного зеркала телескопа, вызванная весом зеркала.
3. Разработана оправа для «бездеформационного» крепления первичного зеркала телескопа обсерватории «АРКА». Проведено моделирование напряжений, возникающих в оправе в результате пусковых нагрузок и перепада температур при запуске телескопа на орбиту Земли, от куда найдены оптимальные размеры пластин и перемычек в оправе, которые с одной стороны выдерживают нагрузки, а с другой уменьшают деформацию поверхности зеркала из-за установки оправы с зеркалом в телескоп.
4. Разработана методика измерения асферических поверхностей 2-го порядка на интерферометре с дифракционной волной сравнения. Методика была применена для изучения рентгеновского зеркала - эллипсоида скользящего угла падения.
5. На основе полнозеркальной модификации схемы Шмидт-Кассегрена с зеркальным корректором aberrаций с неосесимметричной асферизацией 6-го порядка и сферическими первичным и вторичным зеркалами создан прототип двухканального телескопа с диаметром входного зрачка 180 мм. Угловое разрешение оптической части телескопа составило 1.5" с контрастом 20-33% на поле зрения $\pm 0.75^\circ$ и до 3.5" с контрастом 50% на поле зрения $\pm 1.5^\circ$ при теоретическом пределе 1" с контрастом 20%.
6. На основе полнозеркальной модификации «камеры Шмидта» создан широкоугольный коллиматор для аттестации разрешения прототипа телескопа Шмидт-Кассегрена с зеркальным корректором. Угловое разрешение коллиматора составило 1.4" на поле зрения 3° при теоретическом пределе 0.5".
7. Разработана схема мягкого рентгеновского микроскопа на основе объектива Шварцшильда и цифрового детектора со сцинтиллятором со сменным увеличением от 90 до 920 раз.

8. Изготовлен и изучен проекционный объектив Шварцшильда $\times 46$ с асферическим первичным зеркалом, форма которого описывается полиномом 6-го порядка. Параметр СКО остаточных aberrаций составил 5.2 нм. На основе измеренных aberrаций объектива и цифрового детектора для различных увеличений микроскопа сгенерированы функции рассеяния точки (ФРТ) для разрабатываемого МРМ. С учётом полученной для максимального увеличения $\times 920$ ФРТ сделан расчёт трехмерного изображения модельной трёхмерной белковой клетки, и проведена его реконструкция по предложенной методике z-томографии. Разрешение составило 70-90 нм при контрасте 50 %.

Методология и методы исследований

При расчёте оптических схем применялись соотношения, принятые в оптике для расчёта объектива Шварцшильда, схемы камеры Шмидта и схемы Шмидт-Кассегрена. При аттестации aberrаций 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 первую такую точку (первый фокус), второй источник – во вторую (второй фокус). Лучи, отражённые от объектива или эллипсоида приходили точно во вторую анаберационную точку. При разработке модели формирования изображения в мягкой рентгеновской микроскопии с учётом сильного поглощения излучения была использована интегральная расширенная модель Бугера-Ламберта-Бера об экспоненциальном затухании излучения при распространении.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика измерения формы оптических поверхностей за счёт поворота детали вокруг оптической оси, позволяет отделить неосесимметричную ошибку формы измеряемой поверхности от aberrации корректора волнового фронта и деформации поверхности из-за веса детали. При этом ошибка составляет менее 1 нм по параметру СКО.
2. Модификация оптической схемы телескопа Шмидт-Кассегрена за счёт использования зеркального корректора волнового фронта с неосесимметричным профилем асферизации 6-го порядка позволяет создать полнозеркальный телескоп с большим полем зрения $2\omega = 3^\circ$ и разрешением $\delta\varphi = 1''$.
3. Модификация схемы «камеры Шмидта» с неосесимметричным асферическим зеркальным корректором волнового фронта и выпуклой сферической мирой позволяет создать коллиматор с большим полем зрения $2\omega = 3^\circ$ и разрешением $\delta\varphi = 0.5''$.

4. «Бездеформационная» оправка для первичного зеркала телескопа солнечной обсерватории АРКА на основе гибких пластин, перемычек и слоя эпоксидного клея (в местах контакта оправы и опорной плиты) обеспечивает нанометровую деформацию зеркала из-за веса (СКО = 4.5 нм) и уменьшение деформации из-за фиксации оправы на опорной плите в присутствии клиновидных 5 мкм зазоров с СКО = 100 нм до СКО = 0.15 нм. Гибкие пластины эффективно уменьшают деформацию зеркала из-за перепада температуры на орбите Земли. Разрешение телескопа падает всего на 10% при изменении температуры на $\pm 30^\circ\text{C}$.
5. Алгоритм «восстановления интенсивности» перед деконволюцией позволяет реализовать z-томографию органических клеток в светосильных ($\text{NA} \gg 0.1$) мягких рентгеновских микроскопах в том числе в диапазоне длин волн «окна прозрачности воды». На микроскопе с $\text{NA} = 0.3$ и $\lambda = 3.37$ нм без учёта аберраций «объёмное» разрешение в трёхмерном изображении реконструированной белкой клетки составляет 40 нм с контрастом 50%. С учётом измеренных аберраций проекционного объектива Шварцшильда с СКО = 5.2 нм и аберраций цифрового детектора с СКО = 0.5 нм разрешение в изображении реконструированной белкой клетки составляет 70-90 нм с контрастом 50%.
6. Асферизация 6-го порядка первичного зеркала объектива Шварцшильда уменьшает его пятна фокусировки более чем в 20 раз на поле зрения 10 мкм: с 6 мкм до 0.22 – 0.34 мкм и более чем в 6 раз на поле зрения 100 мкм и во столько же раз улучшает латеральное разрешение (до 14 нм с контрастом 67% на поле зрения 10 мкм).

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 «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 2016 г.

Методика измерения формы зеркала - эллипсоида скользящего падения на интерферометре с дифракционной волной сравнения (ИДВС) докладывалась на симпозиуме «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 2016 г. Методика z-томографии для мягкой рентгеновской микроскопии и состояние дел по изготовлению МРМ докладывались на симпозиуме «Нанопфизика и нанопэлектроника», 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.

Содержание работы по главам с описанием идей и выводов

Первая глава – обзорная и разделена на три части. В первой части делается обзор телескопов – рефлекторов. Сравняются их характеристики по разрешению, полю зрения, а также габариты и степень сложности изготовления. 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 зонных пластинках Френеля (ЗПФ) реализовать томографию с разрешением лучше 70-100 нм. В третьей части уделяется внимание воздействию внешних факторов на результаты измерений формы поверхности зеркал для оптических систем: деформации из-за веса, из-за установки оптической детали в оправу и из-за изменения температуры. Рассматривается существующая методика для определения собственной ошибки формы поверхности на фоне систематической ошибки, вызванной весом и аберрациями интерферометра. Также рассматриваются различные варианты закрепления зеркал телескопов, в частности «полукинематические» крепления, которые вносят в оптическую деталь минимальные деформации.

Вторая глава посвящена разработке полнозеркальной модификации телескопа Шмидт-Кассегрена (ШК) с зеркальным корректором (ЗК) и широкоугольного коллиматора на основе «камеры Шмидта», предназначенного для измерения разрешения телескопа на всём поле зрения. Неосесимметричная асферизация ЗК 6-го порядка по радиальной координате и второго порядка по азимутальной позволяет устранить сферическую аберрацию 4-го и 6-го порядка объектива телескопа и астигматизм и кому, вызванную наклоном ЗК относительно оптической оси телескопа. Асферизация позволяет расширить поле зрения 3 – 6 раз по сравнению с классическими схемами телескопов на основе поверхностей с осесимметричной асферизацией 2-го порядка по радиальной координате.

Также в этой главе описываются этапы измерения формы зеркал телескопа Шмидт-Кассегрена с ЗК: первичного вогнутого, плоского эталона и квази плоского асферического зеркального

корректора в автоколлимационной схеме телескопа. Автоколлимационная схема представляет собой интерферометр с дифракционной волной сравнения, соединенный с телескопом. Источник эталонной сферической волны устанавливается в центр плоскости изображения телескопа и светит расходящимся волновым фронтом в телескоп. Волновой фронт проходит телескоп в прямом направлении, отражаясь от всех зеркал и набирая aberrации, вызванные отклонением их формы от расчёта. Затем фронт отражается от плоского эталонного зеркала и проходит телескоп в обратном направлении, в итоге фокусируясь в плоскости изображения. Таким образом, из телескопа выходит рабочий расходящийся фронт, несущий в себе aberrации телескопа и второй эталонный волновой фронт от второго источника сферической волны. Эти волновые фронты образуют на камере интерференционные полосы, по которым определяются aberrации.

Затем описывается разработка и применение широкоугольного коллиматора на основе «камеры Шмидта» с ЗК, который используется для аттестации углового разрешения разработанного телескопа Шмидт-Кассегрена с ЗК одновременно на всём поле зрения $2\omega = 3^\circ$.

В третьей главе описывается разработка оптической части светосильного мягкого рентгеновского микроскопа (МРМ) на основе зеркальной оптики на длину волны 3.37 нм из «окна прозрачности воды». За счёт большой числовой апертуры $NA = 0.3$ проекционного объектива Шварцшильда (ОШ) микроскоп имеет малую глубину фокуса $DOF = \pm 37.5$ нм и позволяет эффективно реализовать z-томографию образцов, которая раньше в МРМ не применялась. Большая светосила по сравнению с МРМ на зонных пластинках Френеля (ЗПФ) уменьшает время экспозиции образцов до единиц секунд, в то время как в МРМ на ЗПФ оно составляет минуты. В главе описывается двухуровневая схема увеличения микроскопа на основе 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 14 нм с контрастом 67% на поле зрения 10 мкм, а также разрешение трёхмерных объектов до 40 нм с контрастом 50% в случае идеальной оптики без aberrаций. За счёт использования в ОШ первичного зеркала, имеющего профиль асферизации 6-го порядка, поле зрения микроскопа расширено с 10 до 100 мкм.

Также рассматриваются существующие методы угловой томографии для реконструкции изображения органических клеток в мягких рентгеновских микроскопах (МРМ) на зонных пластинках Френеля (ЗПФ). Также предлагается новый метод z-томографии. Для восстановления трёхмерной структуры образца предлагается делать серию снимков путём его сдвига вдоль оптической оси z. Такой метод подходит для светосильных МРМ с числовыми апертурами $NA \gg 0.1$, когда глубина фокуса мала ($\ll 100$ нм). Трёхмерное изображение органического образца представляет собой набор изображений срезов образца, где каждый срез

соответствует определенному сдвигу образца вдоль оптической оси z . Т.к. глубина фокуса не равна нулю, изображение каждого среза есть сумма изображений всех срезов, в которую резкий фокальный срез даёт сто процентный вклад, а внефокальные срезы дают размытые «отпечатки». Математически этот механизм описывается свёрткой срезов с функцией рассеяния токи (ФРТ). Кроме того есть значительное поглощение, т.к. глубина проникновения выбранной длины волны 3.37 нм из «окна прозрачности воды» в белок составляет 250 нм, поэтому ближние к источнику излучения срезы будут видаться ярко, а дальние тускло. Это приводит к тому, что обычная деконволюционная обработка, позволяющая эффективно учесть ФРТ в оптической конфокальной микроскопии в МРМ не работает, поэтому в этой главе предлагается метод «восстановления интенсивности» перед деконволюцией. В идеальном случае без aberrаций за счёт малой глубины фокуса 37.5 нм используемого объектива Шварцшильда по предложенной методике z -томографии после восстановления интенсивности и деконволюции возможно получить изображение трёхмерной белковой (углеродосодержащей) клетки с разрешением 40 нм с контрастом 50%

Также рассчитываются тепловые компенсаторы ОШ, которые позволяют удержать расстояние между зеркалами объектива на уровне 30 нм при изменении температуры на 0.5 °С. Это позволяет устранить размытие изображения за время экспозиции кадров.

С учётом коэффициентов отражения многослойных зеркальных покрытий, яркости лазерно-плазменного источника и эффективности цифрового детектора рассчитано время экспозиции каждого кадра. Оно составило 3 – 72 секунд, что гораздо меньше времён экспозиции в микроскопах на зонных пластинках Френеля. Уменьшение времени экспозиции уменьшает влияние смещения образца из-за тепловых флуктуаций, вибраций и Броуновского движения.

Также описывается конструкция, результаты аттестации и коррекции aberrаций объектива Шварцшильда. На основе измеренных aberrаций объектива и цифрового детектора генерируется функция рассеяния точки микроскопом (ФРТ). Проводится реконструкция изображения модельной белковой клетки по данным z -томографии в случае без aberrаций и в случае с измеренными aberrациями.

После коррекции формы первичного зеркала были получены aberrаций с параметром СКО = 5.2 нм, которые позволяют получить трёхмерное изображение клетки с разрешением 70-90 нм с контрастом 50%.

Четвёртая глава посвящена применению интерферометра с дифракционной волной сравнения (ИДВС) для измерения асферических поверхностей. В начале главы даётся обзор интерферометрических методов контроля формы асферических поверхностей. Затем описывается принцип работы и достоинства ИДВС. 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 асферического вогнутого зеркала объектива. Данная методика позволила разделить ошибку корректора от ошибки формы зеркала с точностью 0.7 нм по СКО и скорректировать форму зеркала до уровня $СКО = 0.8$ нм.

Во второй части главы описывается методика применения ИДВС для измерения поверхности зеркал второго порядка: эллипсоидов, параболоидов и гиперболоидов, которые используются для отражения рентгеновского излучения под скользящими углами падения лучей. Описывается эксперимент измерения формы поверхности зеркала-эллипсоида на ИДВС. Приводится сравнение результатов измерений поверхности эллипсоида на ИДВС и на интерферометре белого света Zygo, которые совпали с точностью 24 мкрад, что отвечает современным требованиям на такие зеркала, используемые для фокусировки и коллимации излучения рентгеновских источников с размером до 10 мкм.

В пятой главе обсуждается разработка оправы для «бездеформационного» крепления первичного зеркала телескопа для новой космической системы «АРКА». За основу взята оправка с пластинами, расположенными по торцу зеркала. Пластины достаточно мягкие в радиальном направлении, поэтому не искажают форму поверхности зеркала при изменении температуры на орбите Земли, но жесткие вдоль оптической оси зеркала, поэтому позволяют запустить телескоп с горизонтальной ориентацией зеркал на орбиту Земли. Рассчитываются оптимальные размеры перемычек в оправе, обеспечивающие, с одной стороны, эффективное уменьшение деформации зеркала из-за механического крепления оправы к базовой плите при наличии зазоров между плитой и оправой, а с другой – достаточную прочность при запуске телескопа на орбиту Земли в условиях сильных вибраций и толчков. Приводится результат моделирования и эксперимент по установке оправы на базовую плиту с использованием слоя эпоксидного клея между ними. Использование перемычек в оправе и слоя эпоксидного клея между опорной плитой телескопа и оправой с зеркалом позволяет уменьшить деформацию зеркала из-за прижима оправы к плите с значения $СКО = 100$ нм до $СКО \ll 1$ нм, что подтверждается как в расчётах, так и в эксперименте. Проводится моделирование нагрузок на зеркало и оправку, возникающих при запуске телескопа в космос. Напряжения в перемычках выдерживают все пусковые нагрузки телескопа и даже самые сильные ударные нагрузки – с запасом прочности 2. Рассчитывается и измеряется деформация поверхности зеркала, возникающая из-за его веса. Она имеет астигматичный вид с $СКО = 4.5$ нм. Ошибка определения деформации «веса» составила 0.9 нм, что практически не ухудшит разрешение телескопа «АРКА» в 0.1". Моделируется влияние перепада температур на форму поверхности зеркала и разрешение телескопа. Из-за использования гибких пластин и клея, на который они

крепятся к зеркалу, деформация из-за перепада температур на $\pm 25^{\circ}\text{C}$ возникает только в локальных местах приклеивания штырей и приводит к ухудшению разрешения всего на 10%.

В заключении сформулированы выводы по результатам работы, которые состоят в следующем.

В данной диссертационной работе были разработаны зеркальные оптические системы на основе асферических поверхностей высоких порядков. Увеличение порядка асферизации с 2-го (эллипсоиды, параболоиды, гиперболоиды) до 6-го и более позволяет существенно расширить поле зрения при сохранении разрешения.

В рамках данной работы был разработан телескоп Шмидт-Кассегрена с зеркальным асферическим корректором аберраций, форма которого описывается полиномами Цернике до 6-го порядка по радиальной координате и до 2-го порядка по азимутальной. Первичное и вторичное зеркала сферические, что существенно упрощает изготовление и юстировку телескопа. За счёт сложной асферики корректора поле зрения телескопа расширено до 3° при сохранении разрешения около $1''$.

Также была предложена схема светосильного микроскопа для «окна прозрачности воды» на длину волны 3.37 нм. За счёт использования асферического профиля 6-го порядка поле зрения разработанного объектива Шварцшильда с увеличением $\times 46$ увеличено с 10 мкм до 100 мкм при сохранении дифракционного разрешения 14 нм на поле зрения 40 мкм с контрастом 67% и около дифракционного разрешения 20 нм на поле зрения 100 мкм. Также был предложен алгоритм реконструкции трёхмерного изображения в микроскопе по данным z-томографии. За счёт учёта падения интенсивности из-за поглощения и деконволюции удаётся повысить разрешение изображения на порядок. Для объектива с числовой апертурой 0.3 на длине волны 3.37 нм разрешение трёхмерного изображения составило 40 нм с контрастом 50% в случае дифракционно ограниченной оптики и 70-90 нм с контрастом 50% для измеренных аберраций изготовленного объектива.

Личное участие автора

В исследованиях, вошедших в диссертацию, автором выполнялись следующие работы: участие в постановке научных задач, измерение аберраций 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 и от деформации, вызванной весом детали, а также в написании статей по этим тематикам вклад автора является определяющим. Работы по измерению и коррекции формы поверхности зеркал для объектива для ЭУФ-литографа 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. Зеркало-эллипсоид и результаты измерения его формы на интерферометре белого света были предоставлены А.Д. Ахсахалюном. Расчёт оптических схем телескопа на основе полнозеркальной модификации Шмидт-Кассегрена и полнозеркального коллиматора на основе «камеры Шмидта» была проведена совместно с И.Л. Струлей. В работах по сборке, юстировке, измерению aberrаций и коррекции формы зеркал прототипа ВУФ и УФ телескопа для мониторинга Земли и коллиматора для измерения его оптических характеристик автор принимал участие совместно с М.Н. Тороповым и А.Е. Пестовым. Методика измерения углового разрешения и поля зрения телескопа с помощью коллиматора была развита совместно с М.Н. Тороповым и Н.И. Чхало. Расчёт, сборка и аттестация aberrаций объектива Шварцшильда (ОШ) для МР микроскопа были сделаны автором лично; асферизация и коррекция формы его зеркал и зеркала-коллектора – совместно с А.Е. Пестовым. Разработка конструкции ОШ была сделана совместно с В.М. Артюховым. Разработка алгоритма «восстановления интенсивности» перед деконволюцией z-томографических изображений биологических клеток была проделана автором лично. Все исследования, в том числе, постановка задач, обсуждение результатов и написание статей проводились под руководством научного руководителя Н.И. Чхало.

Заключение

Асферические поверхности высоких порядков (выше 2-го) позволяют существенно (до 1-го порядка) расширить поле зрения и улучшить разрешение оптического прибора. Разработанная и изготовленная схема Шмидт-Кассегрена с зеркальным корректором с неосесимметричной асферизацией высокого порядка имеет широкое поле зрения 3° и разрешение $1''$, не имеет хроматической aberrации и не страдает кривизной поля изображения, поэтому является перспективной в телескопах для ДЗЗ в широком диапазоне длин волн, в том числе в ВУФ и УФ диапазонах. Созданный коллиматор имеет разрешение $1.4''$ на широком поле зрения 3° и может применяться для аттестации телескопов с диаметром входного зрачка до 180 мм. Предложенный метод восстановления интенсивности перед деконволюции может использоваться для реконструкции изображений по данным z-томографии образцов и позволяет получить «объемное» разрешение в несколько десятков нанометров в изображении трёхмерных органических клеток. Разработанная методика аттестации асферических поверхностей 2-го порядка на ИДВС обладает достаточной точностью для аттестации формы поверхности зеркал скользящего угла падения, используемых для фокусировки и коллимации излучения современных рентгеновских источников. Разработанная методика определения собственной

ошибки формы асферических зеркал высокого порядка на фоне aberrаций линзового корректора, а также методика определения деформации оптической детали из-за её веса на ИДВС позволяют реализовать точность измерений на субнанометровом уровне по СКО. Предложенная «бездеформационная» оправа на основе пластин, перемычек и слоя клея минимизирует деформацию из-за установки оптической детали в телескоп до субнанометрового уровня по СКО, а также выдерживает нагрузки, возникающие при запуске ракеты в космос.

Список публикаций автора

- A1. И. В. Малышев, А. Е. Пестов, В. Н. Полковников, Н. Н. Салашченко, М. Н. Торопов, Н. И. Чхало. СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ МИКРОСКОПА НА ДЛИНУ ВОЛНЫ 3.37 нм В ИФМ РАН. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2019, № 1, с. 1–11.
- A2. Ilya V. Malyshev, Nikolay I. Chkhalo, “A method of z-tomography using high-aperture soft X-ray microscopy”, *Ultramicroscopy*, Volume 202, Pages 76-86 (2019).
- A3. 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 Plastinin, Artem A. Rizvanov, "Collimator based on a Schmidt camera mirror design and its application to the study of the wide-angle UV and VUV telescope," *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* 4(1), 014003 (2018), doi: 10.1117/1.JATIS.4.1.014003.
- A4. «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*. Vol . 64, Issue 4, pp. 413–421 (2017).
- A5. 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, “High-performance facility and techniques for high-precision machining of optical components by ion beams,” *Precision Engineering*, v.48, pp.338–346(2017).(DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.004>).
- A6. «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 10235, EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space V*, 102350B (May 31, 2017); doi:10.1117/12.2264989
- A7. «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 10235, EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space V, 102350C (May 31, 2017); doi:10.1117/12.2269433

A8. «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 Vol. 55, Issue 3, pp. 619-625 (2016).

A9. «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. Vol. 55, Issue 16, pp. 4430-4435 (2016).

A10. «Методика аттестации асферических зеркал объектива ЭУФ-литографа на длину волны 13.5нм». И. В. Малышев, М. Н. Торопов, Н. И. Чхало. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, № 7, с. 87–92.

A11. «Высококочувствительный 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, Т.78, №5, с. 77-85 (2014).

A12. 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, №1(2), с.178-184 (2014).

Материалы конференций и тезисы докладов с участием автора

T1. И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Аттестация aberrаций объектива Шварцшильда x46 для рентгеновского микроскопа в «окне прозрачности воды». Труды XXIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 11-14 марта 2019 г., т.1, с. 495-496.

T2. И.В. Малышев, А. Е. Пестов, Н. И. Чхало. Применение генетического алгоритма для коррекции высокочастотных ошибок формы поверхности. Труды XXIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 11-14 марта 2019 г., т.1, с. 497-498.

T3. Алгоритм восстановления интенсивности для реализации z-томографии в высокоапертурной микроскопии "окна прозрачности воды". И. В. Малышев, Н. И. Чхало. Труды XXIII Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 11-14 марта 2019 г., т.1, с. 499-500.

- T4. Моделирование процесса коррекции локальных ошибок. А.К. Чернышев, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, Н.И. Чхало. Труды XXIII Международного симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 11-14 марта 2019 г., т.1, с. 529-530.
- T5. Малышев И.В., Пестов А.Е., Салашенко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И. Состояние дел по микроскопии в «водном окне прозрачности» в ИФМ РАН. Труды XXII Международного симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 12-15 марта 2018 г., т.1, с. 456.
- T6. Малышев И.В., Чхало Н.И. Деконволюция изображений в микроскопе для «водного окна прозрачности». Труды XXII Международного симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 12-15 марта 2018 г., т.1, с. 458.
- T7. Chkhalo, N.I. Manufacturing and characterization of substrates for imaging multilayer X-ray optics / N.I. Chkhalo, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, Zorina M.V., F. Delmotte, E. Meltchakov // Physics of X-Ray and Neutron Multilayer Structures, Palaiseau (France). - 7-9 Nov. 2018. - P.22.
- T8. «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 10235, EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space V, 102350B (May 31, 2017); doi:10.1117/12.2264989
- T9. «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 10235, EUV and X-ray Optics: Synergy between Laboratory and Space V, 102350C (May 31, 2017); doi:10.1117/12.2269433
- T10. «Методика измерений формы поверхности подложек для зеркал с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения». И.В. Малышев, Н.Н. Салашенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Труды XXI Международного симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 13-16 марта 2017 г., т.1, с. 410-411.
- T11. «Высокоточное первичное зеркало с коррекцией аберрации «веса» для телескопа космического базирования». И.В. Малышев, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало, Н.Н. Салашенко, В.Н. Полковников, А.Е. Пестов, С.В. Кузин. Труды XXI Международного симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника», г. Нижний Новгород, 13-16 марта 2017 г., т.1, с. 412-413.
- T12. Зорина, М.В. Новые методы и подходы при изготовлении проекционного объектива для стенда ЭУФ литографа / М.В. Зорина, С.Ю. Зуев, И.В. Малышев, В.Н. Полковников, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, А.А. Кочетков, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало // Материалы XXI

Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород. – 2017. – Т.1. – С. 393.

T13. «Измерение формы поверхности эллипсоида вращения с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения». А.Д. Ахсахалян, И.В. Малышев, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Труды XX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 14-18 марта 2016 г., т.1, с. 352-353.

T14. «Двухзеркальный асферический объектив Шварцшильда для стенда ЭУФ нанолитографа» М.В. Зорина, С.Ю. Зуев, И.В. Малышев, В.Н. Полковников, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, Д.С. Сидоров, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Труды XX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 14-18 марта 2016 г., т.1, с. 375-376.

T15. «Анализ деформаций высокоточных зеркал в оправках». И.В. Малышев, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Труды XX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 14-18 марта 2016 г., т.1, с. 384-385.

T16. «Анализ деформаций высокоточных зеркал в оправках». И.В. Малышев, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Труды конференции «Рентгеновая оптика – 2016», г. Черногловка, 26-29 сентября 2016, с. 46 – 48.

T17. М.В. Зорина, С.Ю. Зуев, И.В. Малышев, В.Н. Полковников, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, Д.С. Сидоров, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Проекционный объектив для стенда ЭУФ нанолитографа на 13,5 нм. Материалы совещания «Рентгеновая оптика – 2016», г. Черногловка, 6-9 октября 2016 г., с. 97-99.

T18. «Измерение аберраций длиннофокусных систем с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения» И. В. Малышев, Н. Н. Салашенко, М. Н. Торопов, Н. И. Чхало. Труды XVIII Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 10-14 марта 2014 г., т.1, с. 341-342.

T19. «Оптика для светосильных телескопов». И.В. Малышев, Д.Е. Парьев, В.Н. Полковников, А.Е. Пестов, И.Л. Струля, Н.Н. Салашенко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. Труды XIX Международного симпозиума «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 10-14 марта 2015 г., т.1, с. 380-381.

T20. «Применение детектора Хартмана для аттестации асферического зеркала объектива» И.В. Малышев. XIX Международный симпозиум «Нанопфизика и нанопэлектроника», г. Нижний Новгород, 10-14 марта 2015 г.

Список литературы

1. Пономарев, Д.Н. Астрономические обсерватории Советского Союза / Д.Н. Пономарев. - 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. Middleton, Elizabeth M. The Earth Observing One (EO-1) Satellite Mission: Over a Decade in Space / Elizabeth M. Middleton, Stephen G. Ungar, Daniel J. Mandl, Lawrence Ong, Stuart W. Frye, Petya E. Campbell, David R. Landis, Joseph P. Young, and Nathan H. Pollack // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. - 2013. - V.6, No.2, P.243-256.
6. L. G. Cook. Three mirror anastigmatic optical system // U.S. patent 4265510. - 1981.
7. Korsch, D. Reflective Schmidt corrector / D. Korsch // Appl. Opt. - 1974. V.13, P.2005-2006.
8. <http://seso.com/new-services/space-optics/>
9. Legall, H. Compact x-ray microscope for the water window based on a high brightness laser plasma source / H. Legall, G. Blobel, H. Stiel, W. Sandner, C. Seim, P. Takman, D.H. Martz, M. Selin, U. Vogt, H.M. Hertz, D. Esser, H. Sipma, J. Luttmann, M. Hofer, H.D. Hoffmann, S. Yulin, T. Feigl, S. Rehbein, P. Guttman, G. Schneider, U. Wiesemann, M. Wirtz, W. Diete // Opt. Express. - 2012. V.20. No.16, P.18362-18369.
10. Wachulak, Przemyslaw W. A 50nm spatial resolution EUV imaging-resolution dependence on object thickness and illumination bandwidth / Przemyslaw W. Wachulak, Andrzej Bartnik, Henryk Fiedorowicz, and Jerzy Kostecki // Optics Express. - 2011. V.19. No.10, P. 9541-9550.
11. 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.
12. 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.
13. Bertilson, Michael. High-resolution computed tomography with a compact soft x-ray microscope / M Bertilson, O.von Hofsten, U. Vogt, A. Holmberg, H.M. Hertz // Opt. Express. - 2009. V.17. No.13, P.11057-11065.
14. 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.

15. Jensen G.J. Defocus-gradient corrected back-projection / G.J. Jensen, R.D. Kornberg // *Ultramicroscopy*. - 2000. V.84, P.57-64.
16. Selin, Marten. Tomographic reconstruction in soft x-ray microscopy using focus-stack back-projection / Marten Selin, Emelie Fogelqvist, Stephan Werner, Hans M. Hertz // *Optic Lett.* - 2015. V.40. No.10, P.2201-2204.
17. Dehlinger, A. 3D nanoscale imaging of biological samples with laboratory-based soft Xray sources / A. Dehlinger, A. Blechschmidta, R.Junga D.Grotzschc, B. Kanngieber, C. Seim, H. Stiela // *Proc. of SPIE*. - 2015. V. 9589, P.95890M1-95890M9.
18. Crowther, R. A. Reconstruction of 3 dimensional structure from projections and its application to electron microscopy / R. A. Crowther, D. J Derosier and A. Klug // *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical and Physical Sciences*. - 1970. V.317, No.1530, P.319.
19. Hanssen, Eric. Soft X-ray microscopy analysis of cell volume and hemoglobin content in erythrocytes infected with asexual and sexual stages of Plasmodium falciparum / Eric Hanssen, Christian Knoechel, Megan Dearnley, Matthew W.A. Dixon, Mark Le Gros , Carolyn Larabell, Leann Tilley // *Journal of Structural Biology*. - 2012. V.177, P. 224-232.
20. Пуряев, Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей / М.: Машиностроение, 1976.
21. Bloemhof, Eric E. Extracting the zero-gravity surface figure of a mirror through multiple clockings in a lightlike hexapod mount / Eric E. Bloemhof, Jonathan C. Lam, V. Alfonso Feria, and Zensheu Chang // *Applied Optics*. - 2009. V.48, No.21, P.4239 - 4245.
22. Rhee, Hyug-Gyo. Pixel-based Absolute Test of a 1-m Lightweight Mirror for a Space Telescope / Hyug-Gyo Rhee, Hagyoung Kihm, Ho-Soon Yang, Young-Sik Ghim and Yun-Woo Lee, Joohyung Lee. *Journal of the Korean Physical Society*. - 2014. V.65, No. 9, P. 1385-1389.
23. Kihm, Hagyoung. Adjustable bipod flexures for mounting mirrors in a space telescope / Hagyoung Kihm, Ho-Soon Yang, Il Kweon Moon, Jeong-Heum Yeon, Seung-Hoon Lee, and Yun-Woo Lee // *Applied Optics*. - 2012. V.51. No.32, 7776-7783.
24. 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.
25. Vishnyakov, Eugene 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. V. 10235, P. 102350B.