УДК 681.787

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И АТТЕСТАЦИЯ ПРОЕКЦИОННОГО ОБЪЕКТИВА ДЛЯ ЭУФ-ЛИТОГРАФА НА ДЛИНУ ВОЛНЫ 13.5 нм

© 2014 г.

И.В. Малышев, [1,2] ***М.Н. Торопов,*** [1] ***Н.И. Чхало*** [1]

[1] Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
[2] Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

ilya-malyshev-wot@ya.ru

Поступила в редакцию 25.09.2013

Предлагаются модификация объектива литографа и методика аттестации асферических зеркал объектива без корректора волнового фронта.

Ключевые слова: объектив ЭУФ-литографа, асферические зеркала, интерферометрия.

В 2011 году в ИФМ РАН был запущен в работу стенд ЭУФ-литографа (экстремальный ультрафиолетовый диапазон длин волн, 10–100 нм) [1] на длину волны 13.5 нм с расчетным разрешением 30 нм. Уменьшенное в 5 раз изображение рисунка маски с помощью проекционного объектива формируется на пластине с фоторезистом (рис. 1). Объектив разработан по схеме Шварцшильда и состоит из двух асферических, выпуклого M1 и вогнутого M2, зеркал. Асферическая форма зеркал обеспечивает поле зрения объектива на маске 3×3 мм^2 (под полем зрения понимается область на маске, которая передаётся проекционным объективом с разрешением 30 нм).

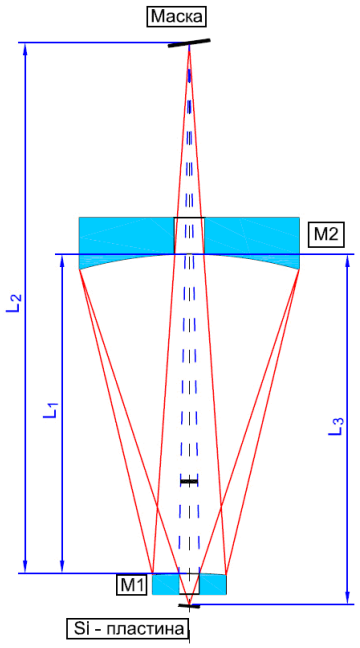

Рис. 1. Схема объектива литографа. M1 – выпуклое сферическое зеркало, M2 – вогнутое асферическое зеркало. L_1 = 308 мм, L_2 = 336 мм, L_3 = 510.477 мм

Пространственное разрешение объектива определяется как

$$\delta x = \frac{0.61\times\lambda}{NA} = \frac{0.61\times 13.5}{0.3} = 27\,\text{нм}, \qquad (1)$$

где λ – длина волны и *NA* – числовая апертура проекционного объектива. Для того чтобы получить такое разрешение, необходимо, чтобы среднеквадратическое отклонение волнового фронта от идеального сферического на выходе из объектива, согласно критерию Марешаля, было

$$rms_{ob} < \lambda/14 = 0.96\,\text{нм}. \qquad (2)$$

Для удовлетворения этого условия требуется, чтобы отклонение формы поверхностей асферических зеркал, формирующих фронт, от расчетной [2] было не более

$$0.96/\sqrt{2} \cong 0.7\,\text{нм}, \qquad (3)$$

так как ошибки, вносимые каждым зеркалом, статистически независимы. Аттестация и коррекция оптики такого качества производится в ИФМ РАН.

Ранее был предложен метод аттестации асферических зеркал с использованием корректора волнового фронта. Метод имел следующие недостатки: 1) на исследуемое зеркало падала боковая часть лепестка диаграммы направленности волоконного источника сферической волны, которая наиболее аберрирована; 2) для преобразования сферического фронта в асферический, по форме совпадающий с расчётной формой исследуемого зеркала, используется корректор волнового фронта, как правило, толстая линза из прозрачного материала, который сам вносит дополнительные ошибки измерений, связанные с неидеальностью формы поверхностей и неоднородностью коэффициента преломления материала.

Другая проблема, которая была выявлена в процессе эксплуатации предыдущей версии объектива – это большие шероховатости зеркал в среднечастотном диапазоне (латеральные размеры 1–1000 микрометров [3]), которые не позволили получить расчетное разрешение литографа в 30 нм [4].

Кроме того, из-за использования большого количества силиконового клея при установке зеркал в металлические оправы конструкция объектива оказалась механически не жесткой и была подвержена расстройке юстировки в процессе эксплуатации из-за теплового расширения элементов конструкции.

Данная работа направлена на решение этих проблем. В частности, предложена новая методика аттестации асферических зеркал объектива без использования корректора волнового фронта и разработана новая конструкция объектива, обладающая большей термостойкостью и механической жёсткостью.

Процесс создания объектива можно разделить на три этапа: создание металлического корпуса, аттестация подложек для зеркал с помощью интерферометрии и коррекция формы подложек методом ионно-пучкового травления по полученным интерферометрическим картам [5]. Процесс аттестации-травления является многоэтапным.

Корпус объектива сделан из инвара (температурный коэффициент линейного расширения, ТКЛР, равен 10^{-6}) и представляет собой металлические оправы, соединённые стойками. Расстояние между зеркалами и их наклон относительно друг друга можно изменять с микронной точностью с помощью микровинтов и с нанометровой точностью с помощью пьезотолкателей. Наклонное положение стоек увеличивает механическую жесткость конструкции. В новом объективе зеркала крепятся в оправу в трёх точках опоры (рис. 2).

Благодаря использованию минимального количества клея (к боковой поверхности зеркала приклеиваются только три «уха», а не всё зеркало по периметру) и эпоксидной смолы вместо силиконового клея загрязнение поверхности зеркал парами уменьшилось на несколько порядков. Это повысит рабочий вакуум в литографе и, в конечном счете, приведет к большей стабильности источника излучения и коэффи-

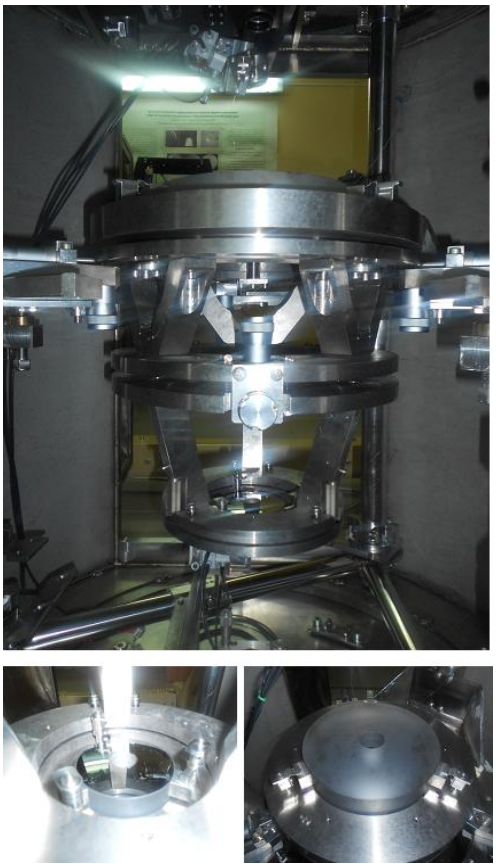

Рис. 2. Фотография объектива Шварцшильда, собранного в интерферометре со сферической волной сравнения. Внизу показаны зеркала M1 и M2 в оправах

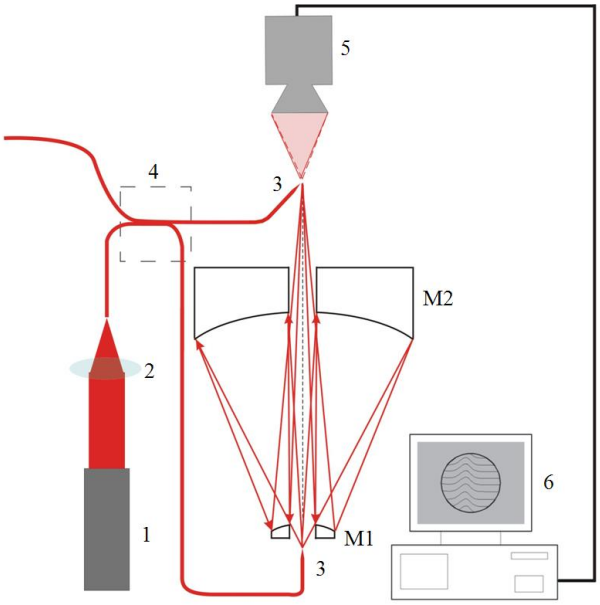

Рис. 3. Схема аттестации асферических зеркал объектива. 1 – лазер, 2 – система заводки излучения в оптоволокно, 3 – когерентные источники сферической волны, 4 – делитель пучка и поляризаторы, 5 – CCD камера, 6 – ПК

циентов отражения зеркал. Клей более подвержен термическому расширению, чем металл, поэтому новая конструкция более устойчива к изменению температуры. Дополнительно, в новой конструкции снимаются только зеркала без тяжелых металлических оправ, что упрощает процедуры коррекции подложек и напыления на них зеркал.

Новая методика аттестации зеркал объектива заключается в следующем. Объектив устанавливается в интерферометр с эталонной сферической волной сравнения (рис. 3). Нижний волоконный источник сферической волны (ВИСВ) помещается в плоскости изображений объектива под ним. Он излучает расходящийся сферический фронт. Фронт проходит через отверстие в нижнем зеркале M1 и отражается от верхнего зеркала M2 в направлении M1. После этого отражения фронт преобразуется в сходящийся асферический, который несёт в себе информацию о неровностях поверхности верхнего зеркала. Далее фронт отражается от M2 в направлении отверстия зеркала M1, преобразуясь при отражении в квазисферический сходящийся фронт, собирается в предметной плоскости объектива, где находится второй, когерентный с первым, ВИСВ. Таким образом, из точки расположения второго источника выходят два расходящихся фронта: один – квазисферический (он несёт информацию о неровностях зеркал) и второй – эталонный сферический, когерентный с первым. Они дают интерференционную картину на CCD-камере. Матрица камеры (1280×1024) преобразует поле интерференции в электрические сигналы, которые идут с пикселей камеры на ПК. Далее программа FPro в амплитудном режиме обрабатывает интерферограмму и строит по ней картину аберраций волнового фронта, прошедшего через объектив (рис. 4). Эта картина включает как аберрации верхнего зеркала, так и аберрации нижнего зеркала, поэтому возникает задача разделить их. Для этого нужно решать систему линейных уравнений, где неизвестные X и Y – это матрицы отклонений точек зеркал M1 и M2 от расчётных асферических поверхностей M1 и M2. Решаются три системы из 9 уравнений с 6 неизвестными X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3 (это части зеркал по 120 градусов каждая). Системы составлены для поворотов M1 вокруг оптической оси на 0, 120 и 240 градусов. В принципе, достаточно сделать один поворот M1, чтобы однозначно восстановить M1 и M2. Два поворота дают возможность сравнить результаты вычислений формы зеркал и убедиться, что они совпадают. После поворота зеркала объектив расстраивается, поэтому требуется его юстировка. После поворота и юстировки картина аберраций фронта изменяется.

Чтобы описать это изменение фронта, нужно мысленно разбить зеркала на 3 части по 120 градусов (рис. 5). В первом опыте, до поворота зеркала M2, можно составить систему уравнений для частей зеркал (левая часть уравнений) и частей волнового фронта объектива (правая часть уравнений):

$$\begin{cases} X1[i,j]+Y1[i,j]=C1[i,j] \\ X2[l,m]+Y2[l,m]=C2[l,m] \\ X3[r,p]+Y3[r,p]=C3[r,p] \end{cases}. \qquad (4)$$

Число таких систем равно числу различных комбинаций индексов [i, j]. Индексы [i, j], [l, m], [r, p] выражаются друг через друга с помощью преобразования поворота системы координат вокруг центра карт. В точке верхнего фокуса

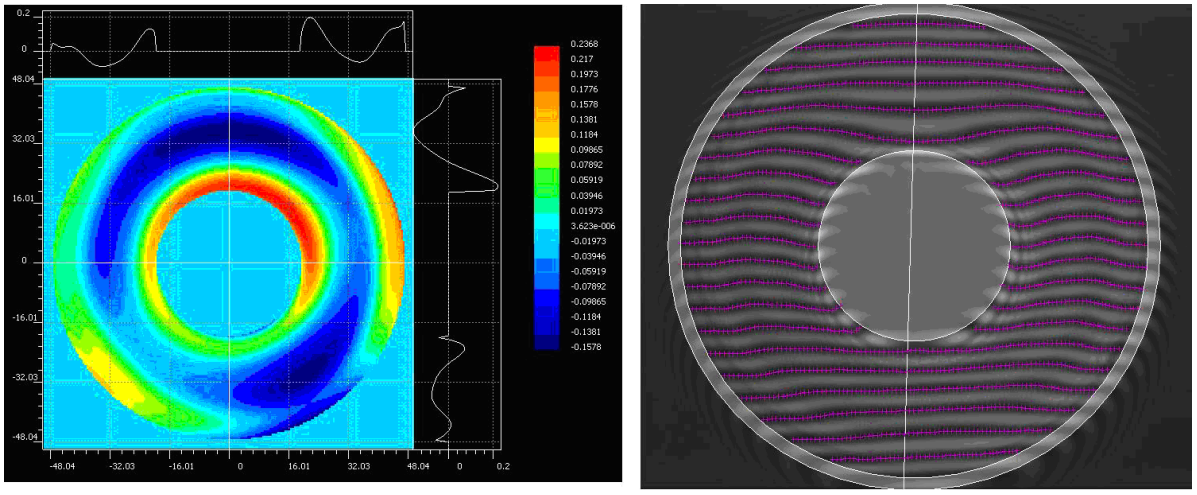

Рис. 4. Типичная интерференционная картина на CCD камере и карта восстановленных аберраций волнового фронта, прошедшего через объектив

объектива изображение переворачивается, поэтому части фронта C1, C2, C3 находятся не над частями X1, X2, X3 и Y1, Y2, Y3, а напротив них, т.е. отражены относительно центра карты фронта объектива (рис. 6). В программе матрица фронта объектива C вначале отражается относительно центра карты, и для неё уже решается система уравнений

$$\begin{cases} X1[i,j]+Y1[i,j]=C1'[i,j] \\ X2[l,m]+Y2[l,m]=C2'[l,m] \\ X3[r,p]+Y3[r,p]=C3'[r,p] \end{cases}. \quad (5)$$

Дальше индексы 1, 2, 3 опускаются, и вводится индекс номера опыта:

$$\begin{cases} X[i,j]+Y[i,j]=C1'[i,j] \\ X[l,m]+Y[l,m]=C1'[l,m] \\ X[r,p]+Y[r,p]=C1'[r,p] \end{cases}. \quad (6)$$

Индекс «1» означает, что это фронт, полученный в первом опыте, когда M1 ещё не было повёрнуто. Еще 3 уравнения появляются после поворота нижнего зеркала на 120 градусов по часовой стрелке:

$$\begin{cases} X[l,m]+Y[i,j]=C2'[i,j] \\ X[r,p]+Y[l,m]=C2'[l,m] \\ X[i,j]+Y[r,p]=C2'[r,p] \end{cases}. \quad (7)$$

Для поворота M2 на 240 градусов по часовой стрелке получим

$$\begin{cases} X[r,p]+Y[i,j]=C3'[i,j] \\ X[i,j]+Y[l,m]=C3'[l,m] \\ X[l,m]+Y[r,p]=C3'[r,p] \end{cases}. \quad (8)$$

Решаем системы (6) и (7), (6) и (8), (7) и (8), получаем три карты для нижнего зеркала M1 и три для верхнего M2 и усредняем их. Решение производится в пакете MATLAB с помощью функции lsqr (A,B, «погрешность метода», «максимальное число итераций»). Она находит решение X линейной системы уравнений AX = B по методу наименьших квадратов с заданной точностью. Итерации начинаются от начальной оценки, по умолчанию представляющей собой вектор размера *n*, состоящий из нулей. Итерации производятся либо до сходимости метода, либо до появления ошибки, либо до достижения максимального числа итераций. Сходимость метода достигается, когда относительный остаток norm(B – AX)/norm(B) меньше или равен погрешности метода или когда ите-

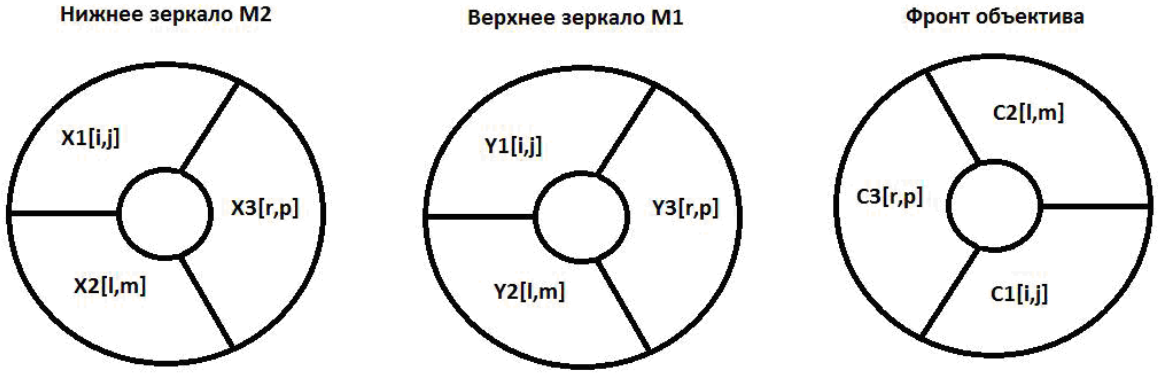

Рис. 5. Сегменты зеркал M1 (X1, X2, X3), M2 (Y1, Y2, Y3) и сегменты фронта на выходе из объектива (C1, C2, C3)

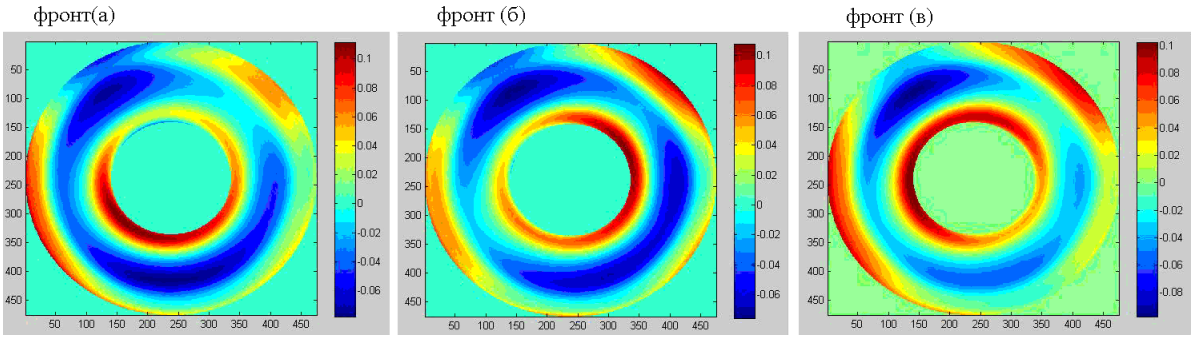

Рис. 6. Фронты на выходе из объектива для трёх ориентаций нижнего зеркала M1: (а) M1 не повёрнуто вокруг оптической оси системы; (б) M1 повёрнуто на 120 градусов по часовой стрелке; (в) M1 повёрнуто на 240 градусов по часовой стрелке. Цветовая шкала в микронах

рации перестают сходиться, т.е. относительный остаток с каждой новой итерацией не падает, а растёт. Погрешность метода задаётся из требований к качеству зеркал. На данном этапе она была выбрана на уровне 1 нм, или 0.001 мкм, поэтому «погрешность метода» = 0.001.

В ходе экспериментов относительный остаток (программа выдаёт его значение на каждом шаге) для каждой точки матрицы X[i,j] и Y[i,j] находится в интервале [1;80] нм, а в среднем составляет 30 нм. С учетом наблюдаемого на практике максимального размаха в 190 нм между минимумом и максимумом отклонений фронта от идеального этот разброс объясняется относительной ошибкой измерений ±15%, что является типичной для интерферометрического метода и удовлетворительной погрешностью для отработки методики аттестации.

Среднее квадратичное отклонение (RMS) карт аберраций фронта для различных поворотов M1 по данным FPro составило 41, 40 и 41 нм. Параметр максимального перепада высот (PV) составил 189, 182 и 200 нм.

Рассчитанные карты зеркал M1 и M2 для поворотов M1 на 0, 120 и 240 градусов по часовой стрелке представлены на рисунке 7 и рисунке 8 соответственно. PV(M1) = 95 нм, PV(M2) = = 105 нм, RMS(M1) = 23.6 нм, RMS(M2) = = 17.5 нм. M1 и M2 похожи как визуально, так и по параметрам PV и RMS.

По усреднённым картам зеркал (рис. 9) производится их коррекция методом ионно-пучкового травления, и дальше процесс аттестации-травления повторяется, пока субнанометровые параметры RMS не будут получены.

Для коррекции поверхности зеркал по восстановленным картам необходимо знать размер

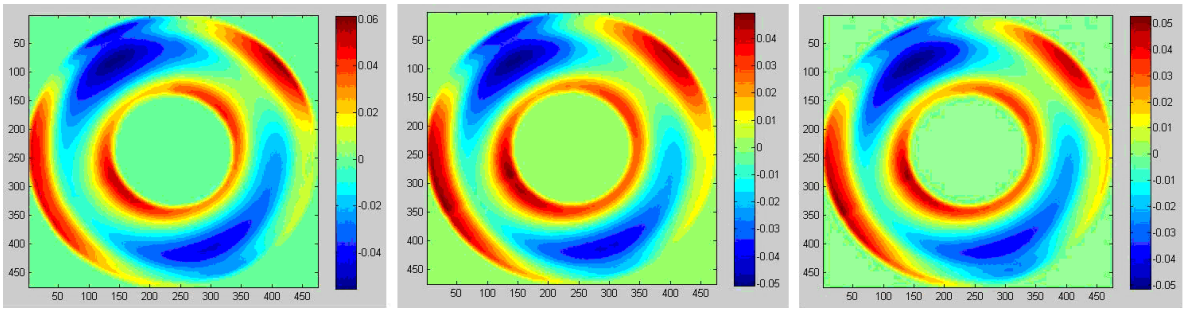

Рис. 7. Восстановленные карты верхнего зеркала M2 по данным фронтов (а) и (б), (а) и (в), (б) и (в)

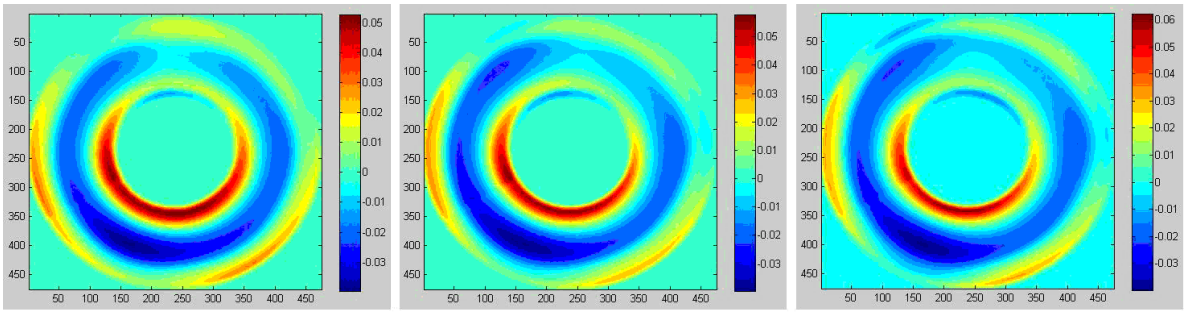

Рис. 8. Восстановленные карты нижнего зеркала M1 по данным фронтов (а) и (б), (а) и (в), (б) и (в)

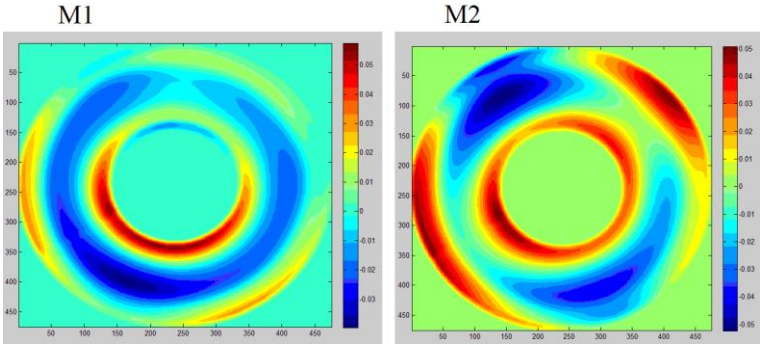

Рис. 9. Усреднённые карты зеркал объектива M1 и M2

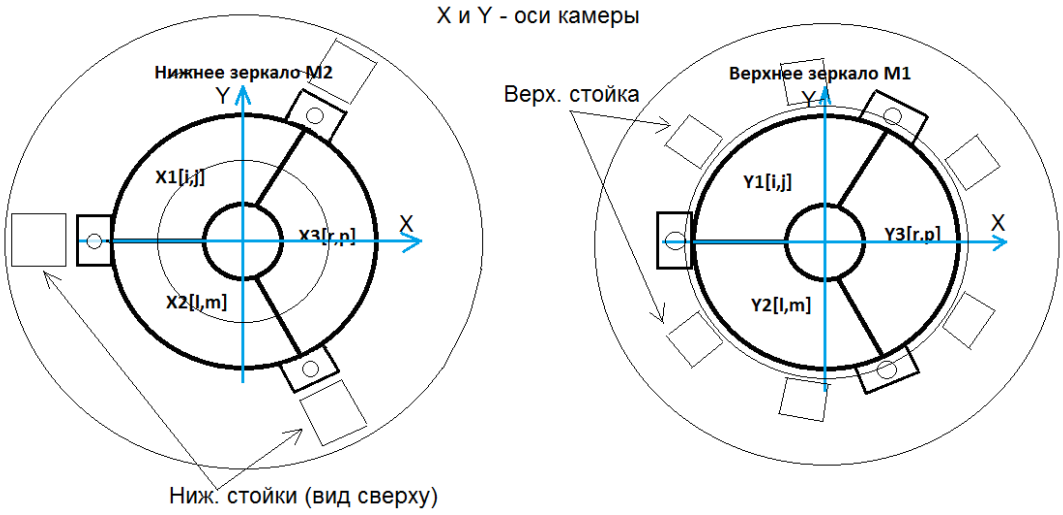

Рис. 10. Взаимное расположение осей камеры, то есть осей восстановленных карт M1 и M2, и самих зеркал в интерферометре

рабочих областей зеркал. Размер восстановленных карт составляет 475×475 точек. Рабочая поверхность M2, которая участвует в формировании фронта, ограничена окружностями с диаметрами 76 мм и 190 мм, они были найдены в программе Zemax. Внутренний и внешний контуры рабочей области нижнего зеркала соответственно 22.9 мм и 57.4 мм. Ориентация осей восстановленных карт поверхности зеркал относительно самих зеркал представлена на рисунке 10.

Заключение

В данной работе представлены новый объектив для нанолитографии на длине волны 13.5 нм и методика восстановления формы поверхностей асферических зеркал объектива по суммарным аберрациям волнового фронта, прошедшего через объектив, которая не требует использования корректоров волнового фронта. В настоящее время начата работа по коррекции формы подложек для зеркал объектива.

Работа поддержана грантами РФФИ и Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

1. Волгунов Д.Г., Забродин И.Г., Закалов А.Б. и др. Стенд проекционного ЭУФ-нанолитографа-мультипликатора с расчетным разрешением 30 нм // Известия РАН. Серия физическая. 2011. Том 75. № 1. С. 54–56.
2. Зуев С.Ю., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н. и др. Двухзеркальный проекционный объектив нанолитографа на λ = 13.5 нм // Известия РАН. Серия физическая. 2011. Том 75. № 1. С. 61–64.
3. Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А. и др. Развитие шероховатости сверхгладких поверхностей при ионно-пучковом травлении // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Том 76. № 2. С. 190–195.
4. Волгунов Д.Г., Пестов А.Е., Салащенко Н.Н. и др. Формирование наноструктур на стенде ЭУФ-литографа-мультипликатора. Первые результаты // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Том 77. № 1. С. 4–8.
5. Клюенков Е.Б., Пестов А.Е., Полковников В.Н. и др. Измерение и коррекция формы оптических элементов с субнанометровой точностью // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. № 9–10.

FABRICATION AND CERTIFICATION FOR EUV LITHOGRAPHY PROJECTION LENS AT A WAVELENGTH OF 13.5 nm

I.V. Malyshev, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo

In this paper, we discuss the modification of a lithography lens and the certification of aspheric mirrors without the wavefront correction.

Keywords: EUV lithography lens, aspheric mirrors, interferometry.

References

1. Volgunov D.G., Zabrodin I.G., Zakalov A.B. i dr. Stend proekcionnogo JeUF-nanolitografa-mul'tiplikatora s raschetnym razresheniem 30 nm // Izvestija RAN. Serija fizicheskaja. 2011. Tom 75. № 1. S. 54–56.

2. Zuev S.Ju., Pestov A.E., Salashhenko N.N. i dr. Dvuhzerkal'nyj proekcionnyj ob"ektiv nanolitografa na λ = 13.5 nm // Izvestija RAN. Serija fizicheskaja. 2011. Tom 75. № 1. S. 61–64.

3. Barysheva M.M., Vajner Ju.A., Gribkov B.A. i dr. Razvitie sherohovatosti sverhgladkih poverhnostej pri ionno-puchkovom travlenii // Izvestija RAN. Serija fizicheskaja. 2012. Tom 76. № 2. S. 190–195.

4. Volgunov D.G., Pestov A.E., Salashhenko N.N. i dr. Formirovanie nanostruktur na stende JeUF-litografa-mul'tiplikatora. Pervye rezul'taty // Izvestija RAN. Serija fizicheskaja. 2013. Tom 77. № 1. S. 4–8.

5. Kljuenkov E.B., Pestov A.E., Polkovnikov V.N. i dr. Izmerenie i korrekcija formy opticheskih jelementov s subnanometrovoj tochnost'ju // Rossijskie nanotehnologii. 2008. T. 3. № 9–10.