

УДК 681.7-1/-9

ПРОЕКЦИОННЫЙ ОБЪЕКТИВ ДЛЯ СТЕНДА ЭУФ-ЛИТОГРАФА

© 2020 г. А. А. Егоров^а, М. В. Зорина^а, И. В. Малышев^{а, *}, А. Е. Пестов^а, В. Н. Полковников^а, Н. Н. Салащенко^а, М. Н. Торопов^а, Н. Н. Цыбин^а, Н. И. Чхало^а

^аИнститут физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603087 Россия

*e-mail: ilya-malyshev@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 27.12.2019 г.

Принята к публикации 29.12.2019 г.

Представлен двухзеркальный проекционный объектив Шварцшильда (уменьшение $\times 5$), образованный двумя асферическими зеркалами и разработанный в рамках модернизации стенда литографа с рабочей длиной волны 13.4 нм. Подробно описана методика измерений и результаты коррекции формы асферических зеркал и aberrаций объектива в сборном варианте. В результате нескольких коррекций локальных ошибок с помощью ионного пучка было получено среднеквадратичное отклонение формы первичного зеркала 0.8 нм. Aberrации объектива составили 5.4 нм. Моделирование разрешающей способности объектива с учетом измеренных aberrаций показало, что тестовые полосы шириной 200 нм разрешаются с контрастом 32%, 100 нм – 23% и 30 нм – 15%. Коэффициенты отражения многослойных зеркал Mo/Si с антистрессовым подслоем Cr/Y составили 63–65% в зависимости от координаты на зеркале. Обсуждаются причины, по которым не удалось скорректировать aberrации объектива до уровня 1 нм, необходимого для достижения дифракционного предела разрешения.

Ключевые слова: объектив Шварцшильда, многослойные рентгеновские зеркала, ЭУФ-литография, интерферометрия с дифракционной волной сравнения.

DOI: 10.31857/S1028096020060047

ВВЕДЕНИЕ

Литографию экстремального ультрафиолетового диапазона (ЭУФ) на длине волны 13.4 нм считают литографией будущего, так как за счет короткой длины волны по сравнению с традиционной литографией на длине волны 193 нм существенно упрощается процесс литографии. Он сводится к классической процедуре: нанесение резиста–засветка–проявление [1]. В России эта технология развивается, главным образом, только в ИС РАН (Троицк) в области источников ЭУФ-излучения [2] и коллективом авторов в области оптики и литографии. Исследования в ИФМ РАН ведутся на экспериментальном стенде нанолитографа, подробно описанном в [3]. В рамках первого этапа исследований был использован объектив с зеркалами, коррекция локальных ошибок которых проведена на ионно-пучковой установке [4]. Из-за ошибочных на тот момент времени научных представлений о влиянии угла падения ионов на шероховатость оптических деталей установка была сконструирована таким образом, что позволяла проводить ионно-пучковое травление только при скользящих углах. Эксперименты на ЭУФ-литографе, проведенные с этим объективом, показали, что из-за сильных среднечастотных

шероховатостей (шероховатости с латеральными размерами в диапазоне 1–1000 мкм) края изображаемых линий размывались, а разрешение составило около 1.3 мкм.

Для повышения разрешающей способности стенда ЭУФ-литографа было принято решение о модернизации установки. Модернизация включает в себя несколько направлений. Первое – проведение цикла исследований по изучению влияния энергии, углов падения, глубины съема материала, вида ионов и материала подложки на шероховатость поверхности после ионно-пучкового травления [5–7]. Основным результатом исследований стало то, что оптимальные углы травления 90°, причем диапазон ограничен отклонением углов от нормали примерно на $\pm 40^\circ$, а энергия ионов должна лежать в диапазоне 400–1200 эВ, оптимальная в районе 800 эВ. Полученные результаты были подтверждены в работах других авторов [8–10]. С учетом этих данных была построена крупногабаритная установка [11], оснащенная источником с большой апертурой ионного пучка, предназначенного для ионной полировки и асферизации подложек, и малоразмерным ионным пучком для коррекции локальных ошибок. Обработываемый образец устанавливается на пя-

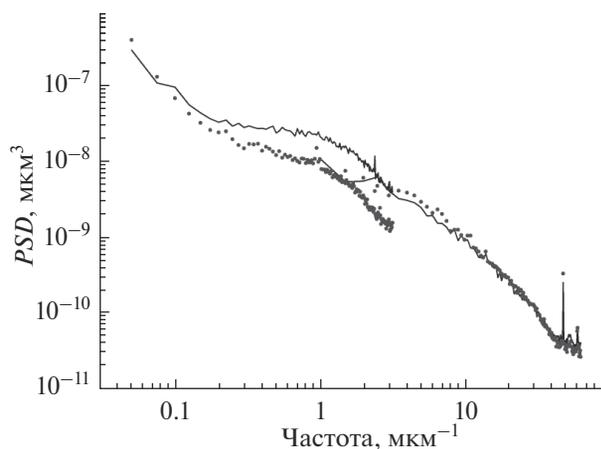


Рис. 1. Функция спектральной плотности мощности (PSD) шероховатости поверхности для первичного выпуклого зеркала $M1$ объектива. Сплошная кривая — измерения в первой точке на расстоянии $r = 0$ мм от оси зеркала ($\sigma_{\text{eff}} = 0.39$ нм). Точечная кривая — измерения во второй точке на расстоянии $r = 15$ мм от оси зеркала ($\sigma_{\text{eff}} = 0.35$ нм).

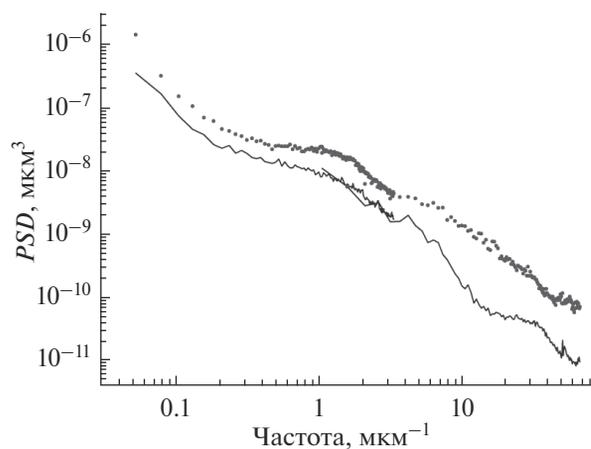


Рис. 2. Функция спектральной плотности мощности (PSD) шероховатости поверхности для вторичного вогнутого зеркала $M2$ объектива. Сплошная кривая — измерения в первой точке на расстоянии $r = 30$ мм от оси зеркала ($\sigma_{\text{eff}} = 0.28$ нм). Точечная кривая — измерения во второй точке на расстоянии $r = 50$ мм от оси зеркала ($\sigma_{\text{eff}} = 0.56$ нм).

тикоординатном столе, позволяющем проводить непрерывное сканирование. В каждой точке обеспечивается локальная нормаль к поверхности вдоль оси ионного пучка.

Второе — усовершенствование лазерно-плазменного источника ЭУФ-излучения. Третье — разработка усовершенствованной системы автофокуса, которая должна поддерживать положение пластины с резистом по отношению к проекционному объективу с точностью лучше ± 30 нм. Четвертое направление — это разработка и изготовление проекционного объектива с использованием усовершенствованных технологий ионно-пучковой коррекции локальных ошибок и метрологии формы поверхности зеркал.

В настоящей работе сообщается о результатах разработки проекционного объектива. Подробно описывается методика измерений и результаты коррекции формы асферических зеркал и aberrаций объектива в сборном варианте.

МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОДЛОЖЕК

Подложки из плавленого кварца изготавливали методами глубокой шлифовки-полировки, химико-механической полировки и на финальной стадии — ионно-пучковой полировки. Методы химико-механической полировки подробно описаны в [12, 13], ионно-пучковой — например, в [6]. Шероховатость измеряли методом атомно-силовой микроскопии на специальном стенде, позволяющем изучать крупногабаритные и криволинейные поверхности [14]. На рис. 1 и 2 приведены функции спектральной плотности мощ-

ности шероховатости в зависимости от пространственной частоты шероховатости поверхностей кварцевых подложек для выпуклого и вогнутого зеркал после физико-химической и ионной полировки, рассчитанные по кадрам 2×2 и 40×40 мкм. Эффективная шероховатость $\sigma_{\text{эф}}$, полученная интегрированием функций спектральной плотности мощности в диапазоне пространственных частот 0.025 – 60 мкм $^{-1}$, составила 0.28 – 0.56 нм для различных точек поверхностей, что является достаточным для литографических применений, так как не приводит к заметному размытию изображения [15].

Форму подложек и aberrации объектива измеряли с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения на основе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой [16]. Так как в интерферометре в качестве эталонной формируется расходящаяся сферическая волна [17, 18], то напрямую для изучения асферических и выпуклых поверхностей такой интерферометр нельзя использовать, поэтому была выбрана следующая стратегия. Форма вогнутой подложки была измерена с помощью специально рассчитанного линзового корректора, который преобразовывал расходящийся сферический фронт точечного источника в асферический, совпадающий по форме с измеряемой асферической поверхностью [19]. В повторяющемся процессе “измерение формы—коррекция ионным пучком” форму зеркала доводили до субнанометрового уровня. После этого измеряли и корректировали форму поверхности выпуклого зеркала уже в составе проекционного объектива.

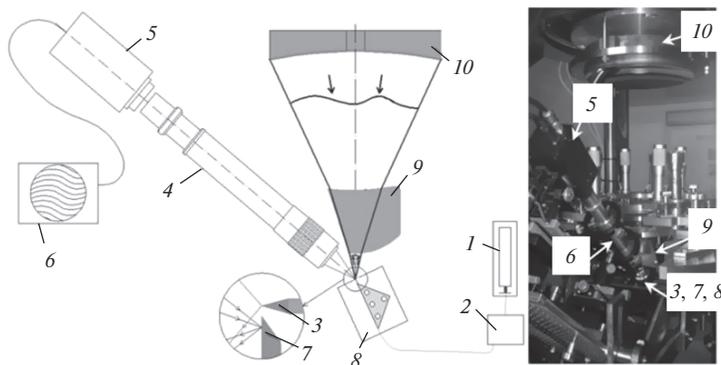


Рис. 3. Оптическая схема интерферометра для измерений ошибок формы вогнутого асферического зеркала $M2$ с помощью корректора волнового фронта: 1 – He–Ne-лазер; 2 – поляризационный контроллер; 3 – источник сферической волны; 4 – наблюдательная система; 5 – CCD-камера, 6 – компьютер; 7 – плоское зеркало с острым краем; 8 – 3D стол; 9 – корректор волнового фронта; 10 – вогнутое асферическое зеркало $M2$ диаметром 220 мм (рабочий диаметр 200 мм).

Конечно же, в измеряемой форме поверхности присутствуют ошибки, вносимые корректором, которые, как правило, сложно оценить, и в большинстве приложений ими пренебрегают. В настоящей работе для разделения aberrаций волнового фронта, связанных с линзовым корректором и с подложкой, использован метод, предложенный в [20].

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ОШИБКИ ФОРМЫ ПЕРВИЧНОГО АСФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА ОБЪЕКТИВА

Исследования проводили с использованием интерферометра с дифракционной волной сравнения [21]. Схема эксперимента приведена на рис. 3. Свет от точечного источника сферической волны проходит через корректор. Интерференционные полосы наблюдаются в режиме автоколлимации и регистрируются с помощью CCD-матрицы (CCD – charge-coupled device). Для установки в интерферометр и далее в объектив литографа к торцам зеркала $M2$ приклеены три расположенные под 120° “уха” со стальными шариками. Шарик встает на три площадки в виде кольца, плоскости и желоба. Такая конструкция позволяет однозначно устанавливать зеркало в объектив без смещений и дополнительных угловых наклонов, а также поворачивать зеркало в интерферометре на 120° и 240° относительно “нулевого” положения. Суть методики заключается в следующем. В измеренной карте aberrации волнового фронта присутствуют как ошибка формы поверхности зеркала, так и aberrации корректора. Для определения вкладов каждой ошибки необходимы как минимум два уравнения, потому что неизвестных два: ошибка формы поверхности зеркала и aberrации корректора. Это достигается поворо-

том исследуемого зеркала при неподвижном корректоре.

Для удобства расчета удобно разбить зеркало, корректор и aberrации волнового фронта на три одинаковых сектора, в этом случае можно составить систему линейных уравнений (1) для трех положений исследуемого зеркала:

$$\begin{cases} M_{i,j} + C_{i,j} = F_{i,j} \\ M_{l,m} + C_{l,m} = F_{l,m} \\ M_{r,p} + C_{r,p} = F_{r,p} \end{cases}, \begin{cases} M_{l,m} + C_{i,j} = F'_{i,j} \\ M_{r,p} + C_{l,m} = F'_{l,m} \\ M_{i,j} + C_{r,p} = F'_{r,p} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_{r,p} + C_{i,j} = F''_{i,j} \\ M_{i,j} + C_{l,m} = F''_{l,m} \\ M_{l,m} + C_{r,p} = F''_{r,p} \end{cases}$$

Неизвестное M – это ошибка формы поверхности зеркала (далее – карта зеркала), C – aberrации корректора, F – суммарные (измеряемые) aberrации волнового фронта. Индексы (i,j) , (l,m) , (r,p) соответствуют разным секторам по 120° на зеркале, корректоре и волновом фронте (рис. 4). Параметры F , F' , F'' – измеряемые aberrации для различных положений зеркала: исходного и повернутого на 120° и на 240° . Корректор C неподвижен, поэтому во всех трех системах в (1) индексы C одинаковые. Расстановка индексов при M , C и F в первой системе соответствует рис. 4. Отличие индексов M во второй и третьей системах от индексов M первой системы связано с поворотом зеркала на 120° и 240° соответственно и определяется законом матрицы поворотов для координат точек на карте M :

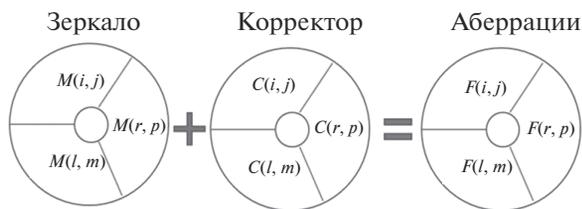


Рис. 4. Сегменты зеркала, корректора и аберраций волнового фронта, использующиеся в расчетах.

$$\begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix}_{l,m} = \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix}_{i,j} \begin{pmatrix} \cos(120^\circ) & -\sin(120^\circ) \\ \sin(120^\circ) & \cos(120^\circ) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix}_{r,p} = \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix}_{i,j} \begin{pmatrix} \cos(240^\circ) & -\sin(240^\circ) \\ \sin(240^\circ) & \cos(240^\circ) \end{pmatrix}.$$

Совместное решение систем уравнений для F и F' позволяет найти карту ошибки формы поверхности $M2$ (карту $M2$) и аберрации корректора. Совместное решение систем уравнений для F и F'' , а также F' и F''' и усреднение с результатом для F и F' позволяет повысить точность метода. Решение было реализовано в программном пакете Matlab методом наименьших квадратов. Найденную карту $M2$ использовали для коррекции подложки $M2$ из плавленного кварца на установке ионно-пучкового травления. Для этого необходимо было установить точное соответствие координат на поверхности зеркала $M2$ и на найденной карте. Задача заключается в следующем: наблюдательная система проецирует объектную плоскость, совпадающую с кромкой зеркала $M2$, на плоскость CCD-матрицы. Однако из-за наличия кривизны на исследуемой поверхности расстояние от оптической оси до точки на зеркале больше расстояния от оптической оси до соответствующей точки в плоскости объекта. Эта разность зависит от радиус-вектора и кривизны зеркала. Чем больше кривизна поверхности, тем больше эта добавка, и ее необходимо учитывать. В рассматриваемом случае максимум составляет 2.5 мм, поэтому для коррекции формы найденную в результате решения системы (1) карту ошибки формы зеркала $M2$ "растягивали" по некоторому закону, приведенному в [20].

На рис. 5 приведены результаты измерений формы поверхности $M2$ до (максимальный перепад высот $PV = 177$ нм, среднеквадратичное отклонение (Root Mean Square) $RMS = 21$ нм) и после 19 коррекций ионным пучком ($PV = 26$ нм, $RMS = 4.5$ нм). После проведения 19 коррекций зеркала и решения системы (1) были получены карта зеркала (рис. 6а), аберрации корректора (рис. 6б) и ошибка вычислений (рис. 6в), которая была найдена как разность аберраций корректора, полученных из решения систем уравнений для F и F' и для F и F'' . Параметры RMS и PV зеркала

упали с 18.7 и 111.5 нм до 0.8 и 5.3 нм соответственно. Как видно из рис. 6, ошибка определения аберраций корректора по параметрам RMS и PV практически такая же, как и ошибки формы зеркала $M2$, поэтому дальнейшие попытки скорректировать (улучшить) поверхность зеркала не привели к положительному результату. Тем не менее, точность изготовления зеркала $M2$ на субнанометровом уровне достаточна для получения дифракционного качества изображения на длине волны 13.4 нм.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ОШИБКИ ФОРМЫ ВТОРИЧНОГО АСФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА И АБЕРРАЦИЙ ОБЪЕКТИВА

В ходе дальнейшей работы асферическое зеркало $M2$ было установлено в проекционный объектив Шварцшильда (рис. 7). Данный подход позволяет измерить форму как зеркала $M1$, так и волновые аберрации объектива. Оправа объектива была изготовлена из инвара — материала с низким температурным коэффициентом линейного расширения ($\sim 10^{-6}$ К $^{-1}$). Верхняя часть оправы базовая, на ее три площадки (кольцо, плоскость и желоб), расположенные под 120° друг к другу, устанавливают зеркало $M2$ и жестко фиксируют специальными зажимами. Зеркало $M1$ диаметром 60 мм устанавливают в нижнюю часть оправы, которая имеет пять степеней свободы по отношению к верхней части, что позволяет провести настройку объектива.

На первом этапе настройку и измерение волновых аберраций проекционного объектива проводили в вакуумном интерферометре (рис. 7). Коррекцию волновых аберраций проекционного объектива осуществляли за счет коррекции локальных ошибок подложки для зеркала $M1$. Измерительная схема интерферометра работает следующим образом. Излучение He-Ne-лазера 1 после ввода в оптическое волокно в блоке с поляризационными контроллерами 2 делится на два канала. К первому каналу подключается первый источник эталонной сферической волны, который устанавливается в плоскости (внизу), перпендикулярной оси проекционного объектива. Сферическая волна после прохождения через объектив деформируется на неровностях поверхности зеркала (в большей части на зеркале $M1$). Для измерений этих аберраций ко второму каналу подключается второй источник эталонной сферической волны и устанавливается в предметной плоскости (вверху) объектива. Далее эти две волны интерферируют, а полученную интерференционную картину с помощью изображающей линзы 4 и CCD-камеры 5 регистрируют и обрабатывают на компьютере 6. Регистрацию и обработку интерферограмм проводят как в амплитудном, так и в фазовом режимах. Для максимального

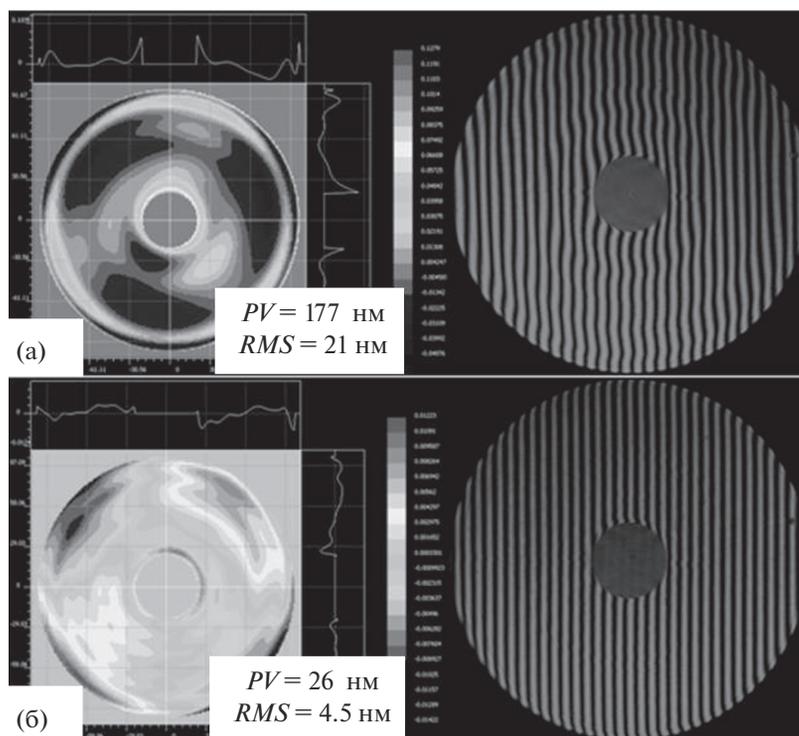


Рис. 5. Карта поверхности вогнутого асферического зеркала $M2$ проекционного объектива с абберацией корректора: а – до коррекции; б – после 16-й коррекции.

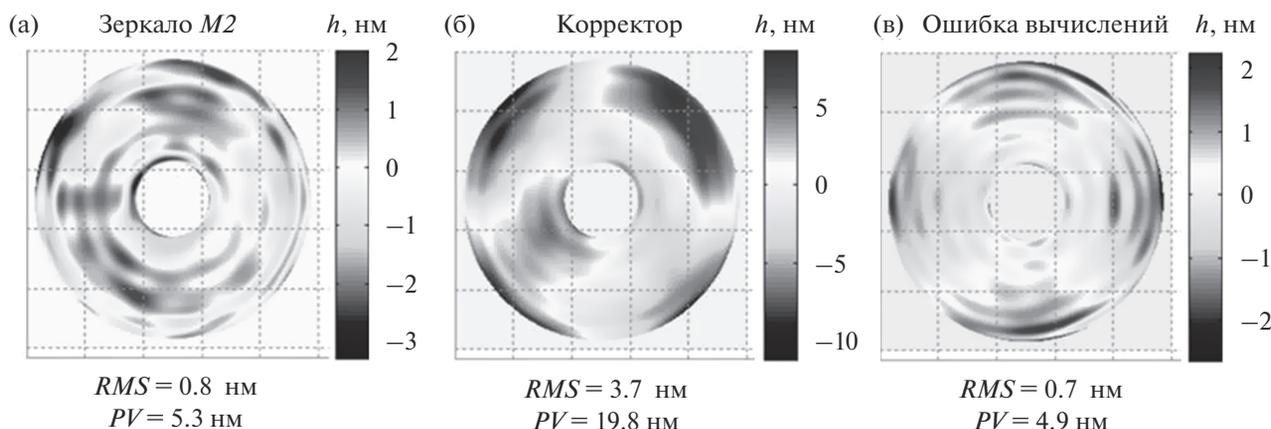


Рис. 6. Карты поверхности зеркала $M2$ после финишной 19-й коррекции: а – остаточная ошибка формы поверхности; б – абберации корректора; в – ошибка вычислений.

контраста интерференционной картины с помощью поляризационного контроллера Thorlabs на выходе обоих источников обеспечивают одинаковую поляризацию. Дополнительно, за счет механического изгиба оптоволокон в одном из каналов интенсивность интерферирующих волн одинаковая. Деление пучков и контроль их поляризационного состояния осуществляют с помощью оптоволоконных компонентов.

На рис. 8 представлены результаты измерений волновых аббераций проекционного объектива до ($PV = 534$ нм, $RMS = 49$ нм) и после шести коррекций выпуклого асферического зеркала $M1$ ($PV = 207$ нм, $RMS = 15$ нм). На заключительном этапе измерение аббераций проекционного объектива проводили с использованием стенда ЭУФ-литографа (рис. 9). Последовательность действий при измерениях аббераций объектива следую-

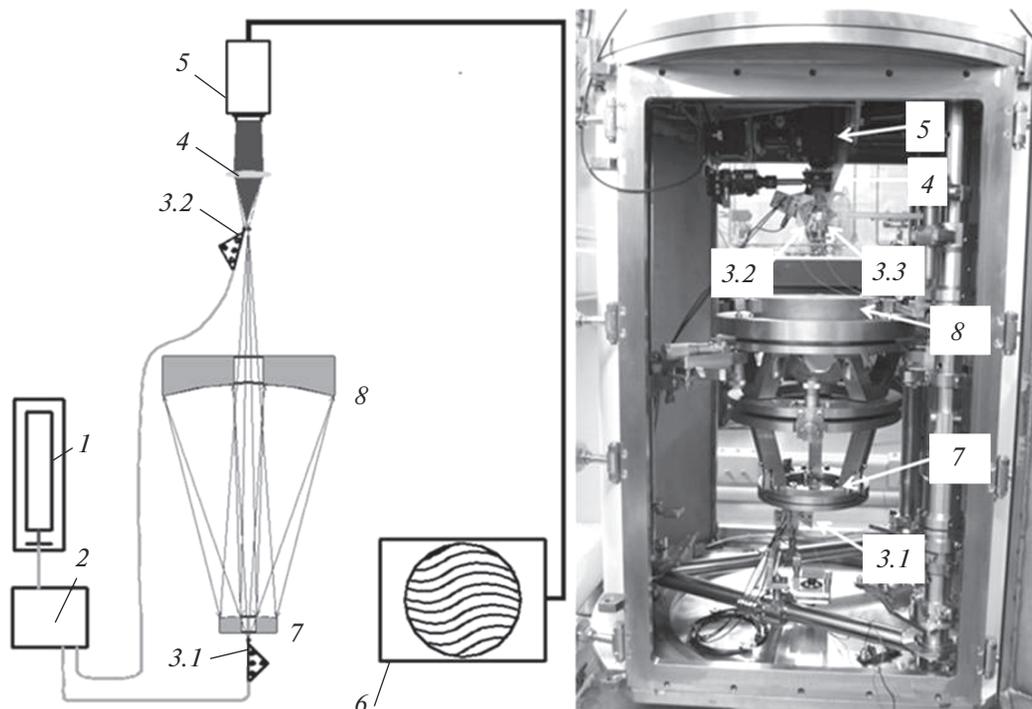


Рис. 7. Измерения ошибок формы асферического зеркала $M1$ непосредственно в схеме проекционного объектива с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения: 1 – He–Ne-лазер; 2 – поляризационный контроллер; 3.1, 3.2, 3.3 – источники и сферической волны; 4 – линза, строящая изображение поверхности зеркала $M1$ и формирующая квазипараллельный пучок; 5 – CCD-камера; 6 – компьютер; 7 – выпуклое асферическое зеркало $M1$; 8 – вогнутое асферическое зеркало $M2$.

шая. Сначала по результатам обработки интерференционной картины от источников 3.1 и 3.2 проводят настройку (юстировку) положения зеркала $M1$ и источников 3.1 и 3.2, с тем чтобы минимизировать aberrации волнового фронта объектива. Путем наклона и перемещения зеркала $M1$ в перпендикулярном оптической оси объектива направлении минимизируют aberrацию “кома”, а перемещением в направлении оси – сферическую aberrацию. К сферической aberrации приводит также смещение источника 3.1 вдоль оптической оси. Поэтому процедуру настройки положения зеркала $M1$ повторяют для различных положений источника 3.1, добиваясь минимума сферической aberrации. Симметрию области засветки на $M1$ контролируют путем установки кольцевой диафрагмы на $M2$ с внутренним диаметром меньше диаметра рабочей области на $M2$. Осесимметричная засветка поверхности $M1$ приводит к осесимметричной тени от диафрагмы, и наоборот. Положение источника 3.2 в перпендикулярном оптической оси направлении юстируют по числу наблюдаемых интерференционных полос, а вдоль оси – путем минимизации aberrации “расфокусировка”. Таким образом, юстировку объектива проводят с исполь-

зованием самого точного метода – интерференционного.

На финальных этапах коррекции aberrаций объектива необходимо учитывать вклад aberrаций изображающей линзы 4 в измеряемую карту суммарных aberrаций. Для измерения aberrаций линзы используют дополнительный источник сферической волны 3.3, который устанавливают точно в месте изображения нижнего источника 3.1 рядом с источником сферической волны 3.2. Источник сферической волны 3.1 отключают и с помощью CCD-камеры регистрируют интерферограмму от источников 3.2 и 3.3, содержащую aberrации линзы.

На рис. 10 приведены результаты измерений волновых aberrаций проекционного объектива без вычитания aberrаций, вносимых изображающей линзой 4, после финишной 20-й коррекции поверхности зеркала $M1$ ($PV = 54$ нм, $RMS = 6$ нм). На рис. 11 показаны результаты измерений волновых aberrаций изображающей линзы 4 ($PV = 26$ нм, $RMS = 2.4$ нм). После вычитания aberrаций линзы из карты волновых aberrаций проекционного объектива получаем истинную карту волновых aberrаций проекционного объектива (рис. 12), параметры которой составили $PV = 50$ нм, $RMS = 5.4$ нм. Дальнейшие коррекции формы $M1$ не

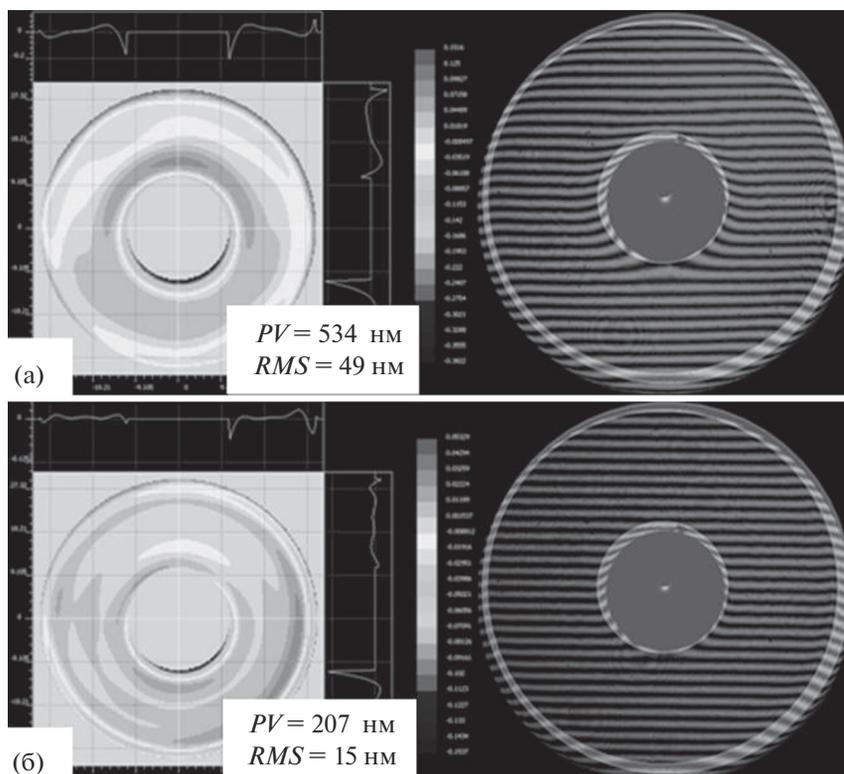


Рис. 8. Результаты измерения волновых aberrаций проекционного объектива с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения: а – до коррекции $M1$; б – после шести коррекций $M1$.

привели к заметному улучшению поверхности. Основная причина в том, что латеральные размеры неровностей на поверхности $M1$ составили ~ 2 мм и стали сравнимы с размером ионного пучка, профиль которого имеет приближенный вид гауссиана с шириной 2.3 мм на полувысоте. В [22] показано, что частотный диапазон неровностей, которые могут быть “стравлены” ионным пучком, ограничен сверху размером ионного пучка.

НАПЫЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛ Mo/Si С ГРАДИЕНТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПЕРИОДА И АНТИСТРЕССОВОГО ПОКРЫТИЯ Cr/Y

Многослойные зеркала Mo/Si осаждали методом магнетронного напыления. Процесс синтеза проводили на установке магнетронного напыления, описанной в [23]. Установка включает четыре магнетрона планарного типа. Такое количество магнетронов позволяет осаждать последовательно на одну подложку две различные двухкомпонентные структуры без разгерметизации вакуумного объема. Это может потребоваться, во-первых, для нанесения селективно стравливаемого подслоя, во-вторых, для компенсации упругих деформаций подложки, вызываемых осаждением многослойного зеркала. Как правило, материалы

многослойной структуры подслоя выбирают так, чтобы одновременно выполнялись обе функции. В качестве подслоя в данном случае использована двухкомпонентная структура Cr/Y. Распыление мишеней проводили в среде высокочистого (99.998%) аргона. Рабочее давление газа в технологическом процессе составляло 0.2 Па. Давление остаточной атмосферы перед напылением около 10^{-4} Па. Скорость роста пленок ~ 0.2 нм/с.

Технологический маршрут создания многослойного зеркала включает процедуру обеспечения необходимого распределения по площади подложки толщины слоев напыляемых материалов. Период структуры отражающего многослойного покрытия должен иметь некоторое распределение, зависящее от расстояния между точкой отражения луча от поверхности и оптической осью, которое обеспечивает выполнение условия Вульфа–Брэгга в каждой точке зеркала:

$$2nd\sin\theta \approx \lambda, \tag{3}$$

где n – средний показатель преломления в структуре, d – ее период, θ – угол скольжения излучения, λ – длина волны излучения (13.4 нм). Условие записано для первого порядка отражения. Резонансная длина волны должна сохраняться, поэтому изменение угла скольжения (за счет кривизны подложки) компенсируется соответствующим

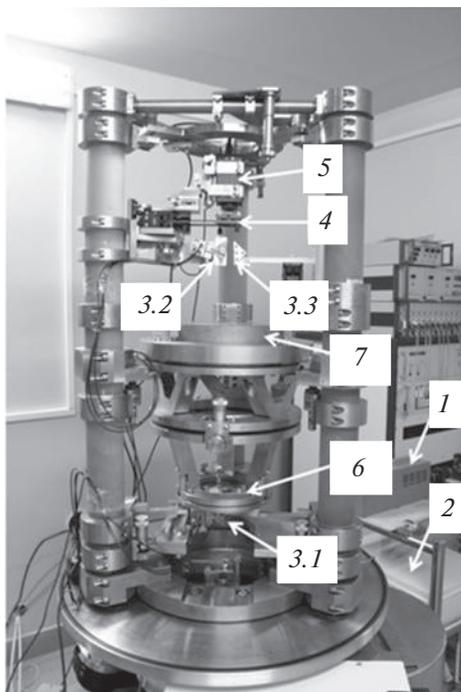


Рис. 9. Фотография проекционного объектива после установки в стенд ЭУФ-наноитографа со снятой вакуумной камерой: 1 – He–Ne-лазер; 2 – поляризационный контроллер; 3.1, 3.2, 3.3 – источники сферической волны; 4 – изображающая линза; 5 – CCD-камера; 6 – выпуклое асферическое зеркало *M1*; 7 – вогнутое асферическое зеркало *M2*.

шей коррекцией периода зеркала. Коррекцию периода по площади подложки проводят с помощью фигурных прецизионных диафрагм, расположенных между магнетронами с распыляемыми материалами и подложкой. Изменяя форму этих диафрагм, можно управлять распределением по-

тока вещества, приходящего на подложку. Точность управления распределением периода по площади зеркала составила 0.5% от величины периода. Процедура создания заданного распределения толщины материалов носит итерационный характер. На первом этапе происходит напыление структуры на кремниевые сверхгладкие пластины, закрепленные на металлической поверхности с радиусом кривизны, приближенным к кривизне рабочей подложки. После напыления проводят измерения методом малоугловой рентгеновской дифракции на дифрактометре PANalytical X'Pert PRO. Измерения и последующая обработка результатов малоугловой рентгеновской дифракции позволяют определить большинство параметров многослойного зеркала (период, индивидуальные толщины материалов в периоде, шероховатость и другие). Полученное реальное распределение толщин по площади подложки сравнивают с расчетным. При необходимости проводят коррекцию формы прецизионных диафрагм и повторное напыление с последующими измерениями.

Финальный этап изготовления объектива связан с напылением многослойных зеркал Mo/Si на скорректированные кварцевые подложки. При аттестации зеркала под углами скольжения излучения, соответствующими расчетным, снимают спектральную зависимость коэффициента отражения. Измерения в окрестности длины волны 13.4 нм проводили на рефлектометре со спектрометром-монохроматором РСМ-500. Подробную информацию об измерениях можно найти в [24].

На рис. 13 представлены расчетные значения углов падения (отсчитываются от нормали) излучения на первичное и вторичное зеркала объектива. Пиковое значение коэффициента отражения для первичного и вторичного зеркал в раз-

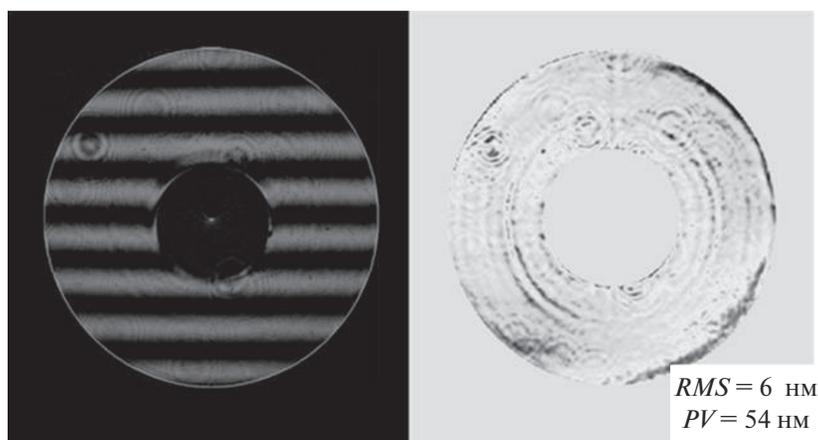


Рис. 10. Интерферограмма и суммарные волновые aberrации объектива, измеренные с помощью интерферометра с дифракционной волной сравнения, после финальной коррекции поверхности зеркала *M1* и напыления отражающего многослойного Mo/Si и антистрессового Cr/Y покрытий.

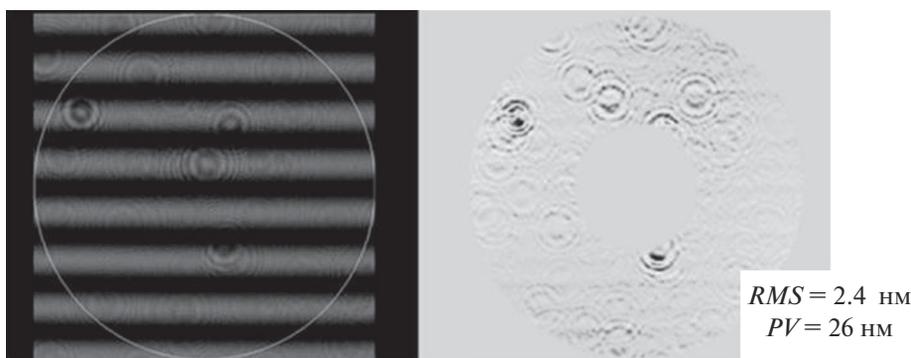


Рис. 11. Интерферограмма и волновые aberrации изображающей линзы.

ных точках поверхности изменялось в пределах $R = 63\text{--}65\%$ при ширине пика на половине высоты $\Delta\lambda = 0.51$ нм. На рис. 14 приведена спектральная зависимость коэффициента отражения после отражения от обоих зеркал. Максимум отражения результирующей кривой приходится на 13.4 нм и составляет 38%. Спектральная ширина на половине высоты около 0.3 нм. Некоторое уменьшение коэффициента отражения и сужение кривой отражения связаны с небольшим, на уровне 1%, несовпадением положений максимумов резонансных кривых отражения зеркал $M1$ и $M2$.

Наличие внутренних напряжений в тонких пленках приводит к деформациям подложек, на которые наносятся пленки, что может отрицательно сказаться на изображающих свойствах оптической системы. Внутренние напряжения многослойных зеркал Mo/Si изучали, например, в [25, 26]. Показано, что внутренние напряжения в оптимизированном на максимум отражения в окрестности 13.4 нм многослойном зеркале Mo/Si около -400 МПа. Знак “минус” указывает на сжимающий характер напряжений (изначально плоская подложка становится выпуклой). Методика компенсации внутренних напряжений в многослойном зеркале базируется на подходе, изложенном в [25, 26]. Основная идея заключается в нанесении на подложку многослойной антистрессовой структуры, вызывающей противоположную по знаку и такую же по величине деформацию подложки, к которой приводит напыление многослойного зеркала. Таким образом, осаждение на компенсирующую структуру многослойного зеркала возвращает систему “подложка + многослойная антистрессовая структура + многослойное зеркало” к исходной форме поверхности. В [27] в качестве такой компенсирующей структуры предложено использовать двухкомпонентную структуру Cr/Y. Ее выбор определяется также и тем фактом, что для Cr/Y существуют селективные химические травители, не взаимодействующие с самыми распространенными материалами подложек (кварцем, зеродуром, крем-

нием). Поэтому структура Cr/Y сочетает в себе свойства стресс-компенсирующих пленок и подслоев для реставрации подложек.

Для компенсации упругих деформаций подложек $M1$ и $M2$ отражательные покрытия Mo/Si наносили поверх стресс-компенсирующей структуры Cr/Y, в которой число периодов определялось соотношением:

$$S_{Cr/Y}d_{Cr/Y}N_{Cr/Y} = -S_{Mo/Si}d_{Mo/Si}N_{Mo/Si}. \quad (4)$$

Здесь S , d , N – внутренние напряжения, период и число периодов антистрессовой структуры Cr/Y или многослойного зеркала Mo/Si. Величина SdN является силой, действующей в поперечном сечении пленки толщиной dN при единичной ширине. Таким образом, условие (4) можно трактовать как равенство упругих сил, действующих в многослойной антистрессовой структуре и многослойном зеркале.

Для структуры Mo/Si были выбраны параметры, обеспечивающие максимальный пиковый коэффициент отражения при заданном угле падения и длине волны излучения. Параметры многослой-

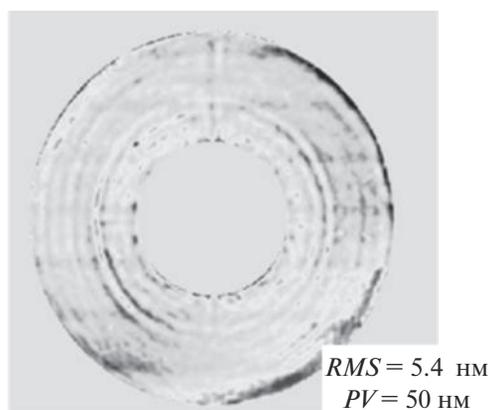


Рис. 12. Финальные волновые aberrации проекционного объектива после вычитания aberrаций изображающей линзы.

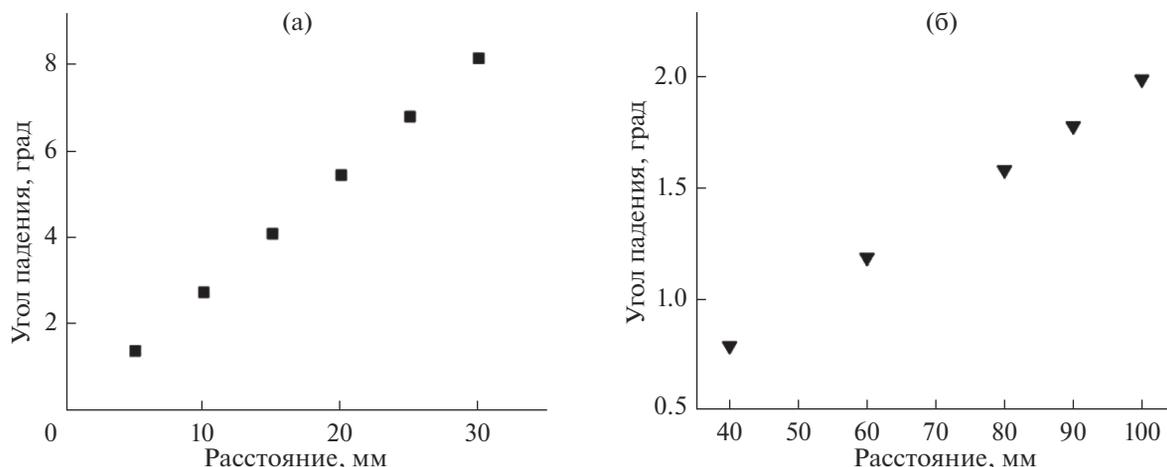


Рис. 13. Расчетные углы падения (отсчитываются от нормали) излучения ($\lambda = 13.4$ нм) на первичное M1 (а) и вторичное M2 (б) зеркала объектива в зависимости от расстояния от центров подложек.

ного зеркала Mo/Si следующие: $d_{\text{Mo/Si}} = 6.95$ нм, $N = 50$, $s = -400$ МПа. В соответствии с данными [27], в многослойной антистрессовой структуре Cr/Y при $d_{\text{Cr/Y}} = 5$ нм (толщина слоя иттрия 2 нм) величина внутренних напряжений составляет $S_{\text{Cr/Y}} = +500$ МПа. Знак “плюс” соответствует растягивающему напряжению. Из (4) следует, что в структуре Cr/Y количество слоев $N_{\text{Cr/Y}} \approx 56$. При синтезе зеркал объектива напыляли 56 периодов многослойной антистрессовой структуры Cr/Y. Измерения показали, что без применения антистрессового покрытия поверхность первичного зеркала объектива астигматично искажается: RMS ухудшается на 4 нм, а PV – на 20 нм. При использовании покрытия Cr/Y поверхность как первичного, так и вторичного зеркала не деформируется под воздействием напряжений.

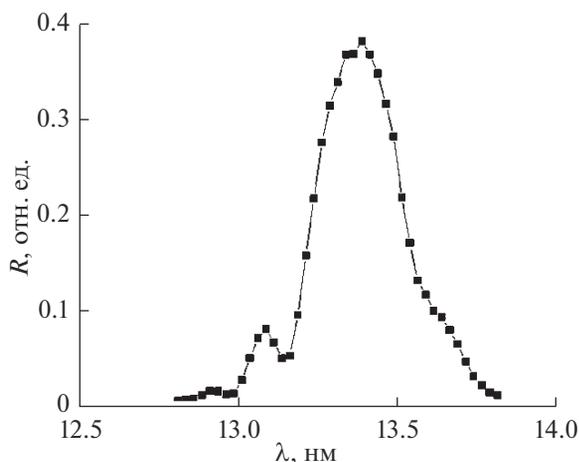


Рис. 14. Спектральная зависимость коэффициента отражения R после отражения от обоих зеркал.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В СТЕНДЕ ЭУФ-ЛИТОГРАФА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕННЫХ АБЕРРАЦИЙ

Финальные волновые aberrации проекционного объектива (рис. 12) были загружены в оптическую программу трассировки лучей Zemax в виде карты ошибки формы зеркала M1. Расчеты были проведены для центральной и крайней точек поля зрения на пластине (отклонения от оптической оси 0 и 0.35 мм соответственно). Как показывают расчеты, разрешение остается неизменным по полю зрения. На рис. 15 приведены рассчитанные изображения тестовых полос шириной 200, 100 и 30 нм. Как видно из рисунка, контраст изображения падает от 0.32 для полос шириной 200 нм до 0.15 для 30 нм. Полученный контраст сильно, более чем в два раза, уступает дифракционному пределу, однако позволяет начать эксперименты по ЭУФ-нанолиитографии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан двухзеркальный проекционный объектив Шварцшильда, образованный двумя асферическими зеркалами и разработанный в рамках модернизации стенда литографа с рабочей длиной волны 13.4 нм. Объектив обеспечивает уменьшение $\times 5$. Подробно описана методика измерений и результаты коррекции формы асферических зеркал и aberrаций объектива в сборном варианте. В результате коррекции локальных ошибок формы первичного зеркала были получены следующие отклонения формы поверхности от расчетной: $RMS = 0.8$ нм, $PV = 53$ нм. Aberrации объектива в целом составили: $RMS = 5.4$ нм, $PV = 54$ нм. Ошибка по параметру RMS , выраженная в рабочей длине волны, составила около $\lambda/2.5$, что существенно хуже, чем требуемые $\lambda/14$. При-

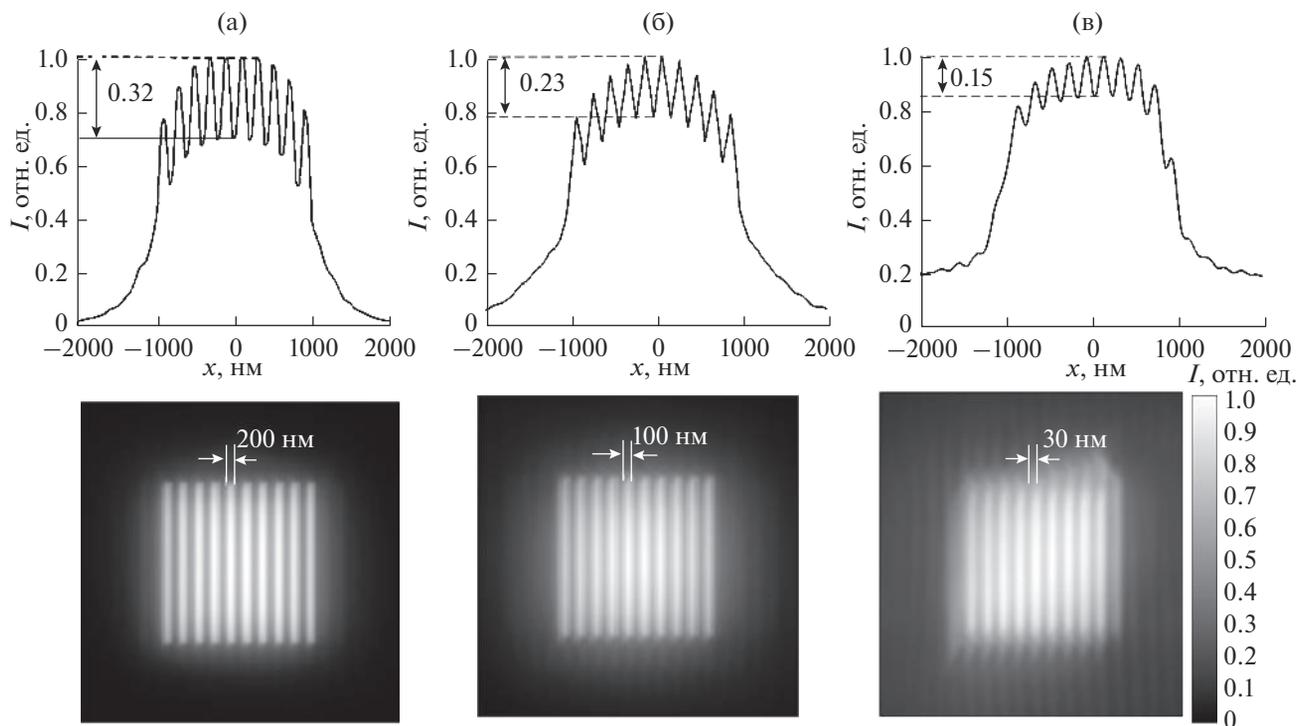


Рис. 15. Смоделированное изображение тестовых полос в центре поля зрения проекционного объектива Шварцшильда при их ширине: а – 200; б – 100; в – 30 нм. Стрелками обозначен контраст изображения.

чиной этого являются ограничения метода коррекции локальных ошибок формы зеркал, связанные с достаточно большим, около 2.3 мм, размером ионного пучка, который не позволяет корректировать неровности с латеральными размерами менее 2 мм.

Тем не менее моделирование разрешающей способности объектива с учетом измеренных aberrаций показало, что тестовые полосы шириной 200 нм разрешаются с контрастом 32%, 100 нм – 23% и 30 нм – 15%. Иными словами, этот объектив позволяет проводить исследования по проекционной ЭУФ-наноитографии, что является несомненным успехом, если принять во внимание сильное отставание российских исследований от мирового уровня в этом направлении. С учетом полученного опыта при разработке объектива будет повышена точность измерений формы поверхности за счет разработки новой регистрирующей системы, вклад aberrаций которой в результаты измерений не превышает 0.6 нм, и фазового режима регистрации и обработки интерферограмм [28].

Также будет усовершенствована методика коррекции локальных ошибок формы подложек для зеркал. Методика будет включать два аспекта. Во-первых, следует уделять большее внимание высоким пространственным частотам неоднородностей на зеркале M2, с тем чтобы уменьшить их

вклад в общую aberrацию объектива. Для этого необходимо завершать коррекцию локальных ошибок M2 пучком минимального размера, а не 4 мм, как было сделано в настоящей работе. Во-вторых, в дальнейшем нужно использовать ионный источник, описанный в [29]. Большая, почти на порядок, плотность тока ионного пучка этого источника позволит на финальной стадии коррекции уменьшить в несколько раз диаметр ионного пучка и продвинуться в область больших частот пространственных неоднородностей поверхности, которые могут быть “стравлены”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 19-02-00081, № 18-02-00588, № 18-02-00173, № 17-02-00640, № 18-32-00149, № 18-07-00633) и РАН (программа 0035-2018-0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu B., Kumar A. // Appl. Phys. Rev. 2014. V. 1. P. 011104.
2. Кошелев К.Н., Салащенко Н.Н., Банин В.Е. // УФН. 2007. Т. 177. Вып. 7. С. 777.
3. Волгунов Д.Г., Забродин И.Г., Закалов А.Б. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 54.

4. Chkhalo N.I., Kluev E.V., Pestov A.E. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 603. 2009. Iss. 1–2. P. 62.
5. Барышева М.М., Вайнер Ю.А., Грибков Б.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 2. С. 190.
6. Chkhalo N.I., Churin S.A., Pestov A.E. et al. // Opt. Express. 2014. V. 22. Iss. 17. P. 20094.
7. Chkhalo N.I., Churin S.A., Mikhaylenko M.S. et al. // Appl. Optics. 2016. V. 55. № 6. P. 1249.
8. Keller A., Facsko S., Moller W. // J. Phys. 2009. V. 21. P. 495305.
9. Liao W., Dai Y., Xie X., Zhou L. // Opt. Express. 2014. V. 22. P. 377.
10. Teo E.J., Toyoda N., Yang C. et al. // Appl. Phys. A. 2014. V. 117. P. 719.
11. Chkhalo N.I., Kaskov I.A., Malyshev I.V. et al. // Precision Engin. 2017. V. 48. P. 338.
12. Bo D., Jianwei Z., Yuling L. et al. // J. Semicond. 2014. V. 35. P. 116001.
13. Вайнер Ю.А., Зорина М.В., Пестов А.Е. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр., и нейтрон. исслед. 2015. № 8. С. 5.
14. Chkhalo N.I., Salashchenko N.N., Zorina M.V. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 016102.
15. Dinger U., Bisert F., Lasser H. et al. // Proc. SPIE. 2000. V. 4146. P. 35.
16. Chkhalo N.I., Klimov A.Yu., Rogov V.V. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79. P. 033107.
17. Naulleau P.P., Goldberg K.A., Lee S.H. et al. // Appl. Opt. 1999. V. 38. № 35. P. 7252.
18. Otaki K., Ota K., Nishiyama I. et al. // J. Vacuum Sci. Technol. B. 2002. V. 20. № 6. P. 2449.
19. Вознесенский Н.Б., Гаврилов Е.В., Жевлаков А.П. и др. // Ж. техн. физики. 2007. Т. 77. Вып. 2. С. 126.
20. Малышев И.В., Торопов М.Н., Чхало Н.И. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 7. С. 87.
21. Chkhalo N.I., Malyshev I.V., Pestov A.E. et al. // Appl. Optics. 2016. V. 55. Iss. 3. P. 619.
22. Чернышев А.К., Малышев И.В., Пестов А.Е., Чхало Н.И. Моделирование процесса коррекции локальных ошибок формы поверхности малоразмерным ионным пучком // Матер. XXIII Междунар. симп. “Нанотехнологии и нанотехнология”. Т. 1. Нижний Новгород, 2019. С. 529.
23. Забродин И.Г., Закалов Б.А., Касьяков И.А. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 7. С. 1.
24. Bibishkin M.S., Chekhonadskih D.P., Chkhalo N.I. et al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5401. P. 8.
25. Mirkarimi P.B. // Opt. Eng. 1999. V. 38. № 7. P. 1246.
26. Andreev S.S., Salashchenko N.N., Suslov L.A. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2001. V. 470. № 1–2. P. 162.
27. Bogachev S.A., Chkhalo N.I., Kuzin S.V. et al. // Appl. Optics. 2016. V. 55. № 9. P. 2126.
28. Ахсаханян А.А., Малышев И.В., Салащенко Н.Н. и др. Интерферометр с дифракционной волной сравнения с перестраиваемой числовой апертурой // Матер. XXIII Междунар. симп. “Нанотехнологии и нанотехнология”. Т. 1. Нижний Новгород, 2019. С. 430.
29. Михайленко М.С., Пестов А.Е., Чхало Н.И., Гончаров Л.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 3. С. 19.

Projection Lens for EUV Lithograph

A. A. Egorov¹, M. V. Zorina¹, I. V. Malyshev^{1, *}, A. E. Pestov¹, V. N. Polkovnikov¹, N. N. Salashchenko¹, M. N. Toropov¹, N. N. Tsybin¹, N. I. Chkhalo¹

¹Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, 603087 Russia

*e-mail: ilya-malyshev@ipm.sci-nnov.ru

A two-mirror Schwarzschild projection lens ($\times 5$ reduction) is presented, formed by two aspherical mirrors and developed as part of the modernization of a lithographer setup with a working wavelength of 13.4 nm. The measurement technique and the results of the correction of the shape of aspherical mirrors and lens aberrations in a combined version are described in detail. As a result of several corrections of local errors using the ion beam, a root-mean-square deviation of the primary mirror shape of 0.8 nm has been obtained. The lens aberration is 5.4 nm. Simulation of the resolution of the lens taking into account the measured aberrations has shown that the test bands with a width of 200 nm are resolved with a contrast of 32%, 100 nm bands with 23% and 30 nm bands with 15%. The reflection coefficients of Mo/Si multilayer mirrors with an anti-stress Cr/Y sublayer are 63–65%, depending on the coordinate on the mirror. The reasons why it is not possible to correct the aberrations of the lens to the level of 1 nm necessary to achieve a diffraction-limited resolution are discussed.

Keywords: Schwarzschild lens, multilayer X-ray mirrors, EUV-lithography, point diffraction.