

Проект рентгенооптической схемы литографа с динамической маской пропускающего типа и синхротронным источником излучения

© И.В. Малышев,¹ Н.И. Чхало,¹ С.Н. Якунин^{2,3}

¹ Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия

² Научно-исследовательский центр Курчатовский институт,
123182 Москва, Россия

³ Институт кристаллографии РАН им. А.В. Шубникова
119333 Москва, Россия

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

Поступило в Редакцию 3 мая 2023 г.

В окончательной редакции 3 мая 2023 г.

Принято к публикации 3 мая 2023 г.

Предложена рентгенооптическая схема литографа с динамической маской пропускающего типа и синхротронным источником излучения. Изображение динамической маски в виде отверстий малого диаметра с уменьшением переносится на пластину с резистом с помощью проекционного объектива Шварцшильда. Формирование топологического рисунка планируется проводить за счет согласованной работы системы сканирования пластины с резистом и микроэлектромеханической системы пропускающего типа. Рассмотрены объективы с уменьшением 10 и 20 крат для получения 10–20 нм изображений 200 нм отверстий динамической маски. Рассчитана схема засветки маски, обеспечивающая однородную засветку на поле $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Для синхротрона Сибирь-2 КИСИ на поворотном магните ожидаемая производительность литографа составит до 1/14 пластины диаметром 100 мм в h.

Ключевые слова: рентгеновая литография, рентгеновая оптика, многослойное зеркало, синхротронное излучение, абберации.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55757.111-23

Введение

Использование источников синхротронного излучения для целей рентгеновской или экстремальной ультрафиолетовой (ЭУФ) литографии, в частности на длинах волн 11.3 и 13.5 нм, рассматривается давно [1–5]. Первые экспериментальные литографические рисунки были получены именно с использованием синхротронов [1,2]. Однако по ряду причин, в том числе и из-за недостаточной мощности излучения в спектральной полосе пропускания рентгенооптической системы [3], они пока не нашли широкого применения. Недавно в работе [6] был предложен новый тип синхротронного источника с высокой мощностью для задач ЭУФ литографии. Для получения когерентного ЭУФ излучения киловаттного уровня предлагается синхротрон с диаметром накопительного кольца 160 м. Электронный пучок в нем модулируется лазером с длиной волны 257 нм с помощью метода микрогруппирования, что теоретически позволяет получить когерентное излучение на длине волны 13.5 нм со средней мощностью 2.5 kW.

В случае безмасочной ЭУФ литографии [7,8] производительность литографического процесса уходит на второй план, и эксперименты можно проводить на существующих синхротронах. В настоящей работе мы рассматриваем рентгенооптическую схему ЭУФ литографа с использованием синхротронного источника и ди-

намической маски на пропускание [9]. Расчет сделан для синхротрона КИСИ [10]. Производительность литографа может быть повышена при установке его на строящиеся российские синхротроны с ондуляторными источниками СКИФ [11,12] и СИЛА [13].

1. Расчет оптической схемы

Расчет оптической схемы литографа проводился в программе Zemax. Выходящий из синхротрона пучок, распространяющийся в горизонтальной плоскости, отражается двухзеркальной системой вниз и освещает динамическую маску (далее „маску“), работающую на пропускание и помещенную в плоскость объектов объектива (рис 1). Изображение маски 3 строится двухзеркальным объективом 4 с уменьшением $\times 10$ или $\times 20$ на пластине с резистом 7. Топологический рисунок на резисте получают за счет согласованного движения пластины с резистом на столике-сканере и управляемого открытия–закрытия отверстий маски.

Схема работы литографа такова: открытие некоторых отверстий маски, засветка резиста одновременно с его движением, чтобы получились дорожки. Далее для рисования другой топологии в другом месте резиста все отверстия маски закрываются, резист смещается, затем открывается новый набор отверстий, и засветка

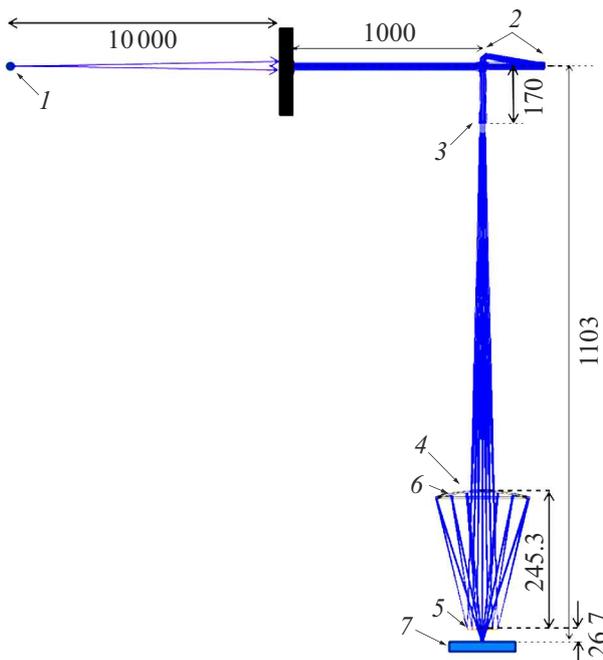


Рис. 1. Оптическая схема ЭУФ литографа на 11.2 nm на синхротроне: 1 — синхротронный источник, 2 — двухзеркальная система засветки маски, 3 — динамическая маска 10 × 10 mm² на просвет с 200-нм отверстиями, 4 — объектив 10 крат, NA= 0.3, 5 — зеркало M1, 6 — зеркало M2, 7 — пластина с резистом на сканере. Подписи в миллиметрах.

со смещением резиста продолжается. Таким способом можно будет формировать любой топологический рисунок. Открытие–закрытие отверстий маски будет происходить за счет подачи напряжения на затворы отверстий динамической маски [9].

Описание схемы начнем по ходу лучей, т.е. от источника к резисту. За основу мы взяли параметры синхротронного источника от „Большого накопителя“ Курчатовского синхротрона [10]. Размер источника: $\sigma_x = 700 \mu\text{m}$, $\sigma_y = 45 \mu\text{m}$. Сечение пучка на расстоянии 11 m от источника для рабочей длины волны 11.2 nm приведено на рис. 2, a. Оно имеет распределение интен-

сивности в области 44 × 22 mm, поэтому минимальный размер первого зеркала, наклоненного под 45°, равен 44 × 32 mm.

Задача двухзеркальной системы засветки (рис. 3) — создать на динамической маске квазиравномерное распределение интенсивности размером 10 × 10 mm² (рис. 2, b) с минимальной расходимостью, т.е. сформировать максимально возможный плоскопараллельный пучок. Тогда за счет дифракции на отверстиях маски излучение выйдет из отверстий слабосходящимся и попадет во входную апертуру объектива. Зеркало-тороид 1 на рис. 3 сжимает пучок по горизонтали (вдоль X) и вытягивает по вертикали, чтобы вся область 10 × 10 mm² на маске была засвечена максимально равномерным полем интенсивности. Выпуклое зеркало 2, работая в паре с тороидом, делает пучок близким к плоскопараллельному. В итоге остаточные геометрическая расходимость по оси Y и сходимость по оси X (рис. 3) имеют числовые апертуры NA = 0.013 – 0.015, т.е. примерно в 5 раз меньше дифракционной расходимости излучения, прошедшего через 200-нанометровые отверстия динамической маски, поэтому на угловое распределение интенсивности в дифрагировавшем пучке влияние почти не оказывают. Предлагаемую схему ЭУФ литографа можно реализовать на любом синхротроне, немного поменяв параметры двухзеркальной системы засветки, чтобы создать из любого синхротронного пучка квазиколлимированный пучок с однородным полем на динамической маске.

Излучение проходит через отверстия в маске, дифрагирует на них и попадает в проекционный объектив, строящий уменьшенное изображение маски на резисте. При дифракции на круглых отверстиях тонкой маски 84% излучения содержится в центральном дифракционном пике (рис. 4). Его числовая апертура NA рассчитывается по формуле:

$$NA = 1.22 \cdot \lambda / D_{\text{hole}}, \tag{1}$$

и в нашем случае для $\lambda = 11.2 \text{ nm}$ и $D_{\text{hole}} = 200 \text{ nm}$ равна 0.068. Из каждого отверстия динамической маски за счет дифракции будет выходить расходящийся пучок

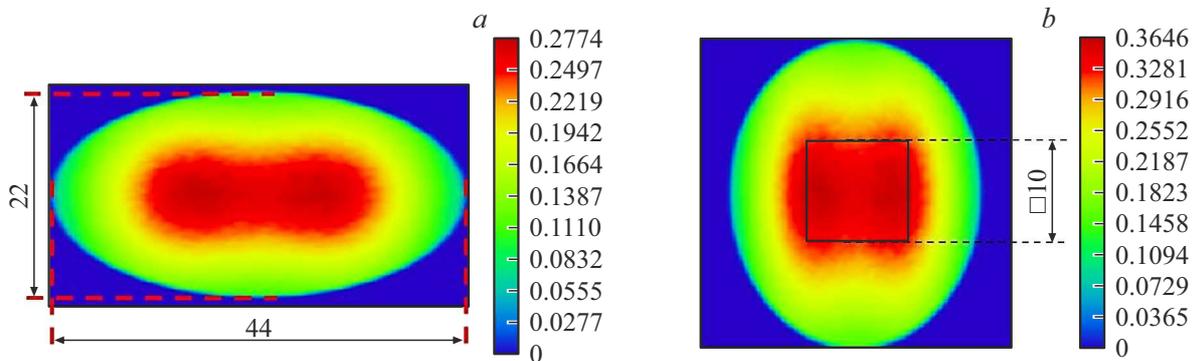


Рис. 2. a — сечение пучка на расстоянии 11 m от источника для рабочей длины волны 11.2 nm; b — пятно подсветки динамической маски синхротронным пучком, сформированное двухзеркальной системой засветки. Подписи в миллиметрах.

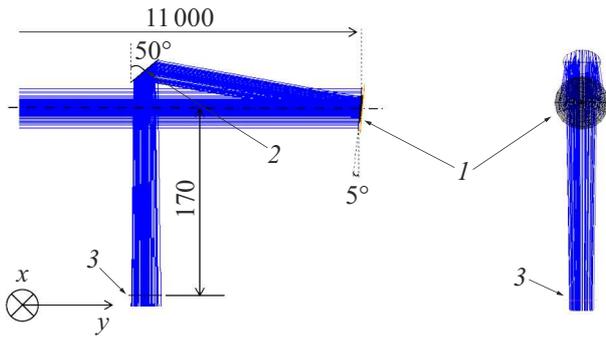


Рис. 3. Двухзеркальная система засветки: *a* — вид сбоку, *b* — вид спереди. 1 — зеркало-тороид ($R_{\text{horiz}} = -1500$ mm (вогнутый), $R_{\text{vert}} = 5000$ mm (выпуклый), $D = 46$ mm), 2 — выпуклое зеркало ($R_{\text{horiz}} = 2600$ mm, $D = 32$ mm), 3 — динамическая маска. Подписи в миллиметрах.

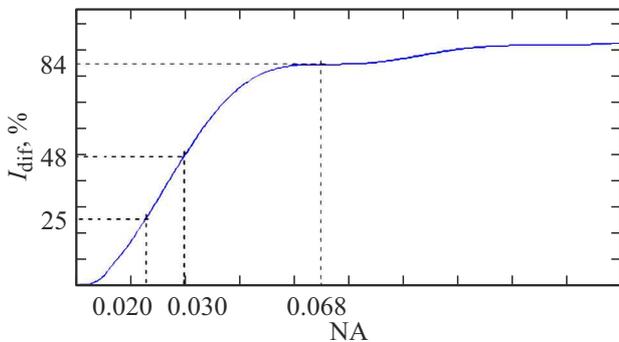


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения, дифрагировавшего на 200-нм отверстии, от числовой апертуры (зона Фраунгофера).

с распределением интенсивности от числовой апертуры, приведенным на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что в числовой апертуре $NA = 0.03$ и 0.02 пучков, выходящих из отверстий маски, содержится 48 и 25% излучения соответственно. Рассматриваемые в настоящей работе объективы, расположенные по ходу лучей после динамической маски (рис. 1), имеют входную числовую апертуру $NA_{\text{in}} = 0.03$ (для объектива $\times 10$ с $NA_{\text{out}} = 0.3$) и $NA_{\text{in}} = 0.02$ (для объектива $\times 20$ с $NA_{\text{out}} = 0.4$), поэтому они захватят 48 и 25% излучения соответственно. Эти значения нам понадобятся при оценке производительности литографа.

Перейдем к расчету проекционного объектива. Для получения 20- и 10-нм разрешения объектив должен иметь уменьшение $\times 10$ и $\times 20$ соответственно. На рис. 5 приведена рентгенооптическая схема объектива и основные размеры. При разработке объектива учитывались толщина зеркал, возможность размещения между зеркалом M1 и пластиной с резистом системы „автофокуса“ для контроля положения пластины относительно проекционного объектива. Длина объектива от диафрагмы до резиста равна 933 мм, поэтому вакуумная камера литографа получается относительно компактной.

Поле зрения проекционного объектива довольно большое, 10×10 мм², поэтому для обеспечения дифракционного качества изображения на всем поле оба зеркала имеют асферическую форму отражающей поверхности. Профили асферизации зеркал M1 и M2 описываются формулой

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_2r^2 + \alpha_4r^4 + \alpha_6r^6 + \alpha_8r^8 + \alpha_{10}r^{10} + \alpha_{12}r^{12}, \quad (2)$$

где поверхность зеркала M1 задается параметрами:

$$k = -0.36032, \quad c = 1/R_{\text{vertex sphere}} = 1/56 \text{ (mm}^{-1}\text{)},$$

$$\alpha_2 = -0.000716, \quad \alpha_4 = -4.125 \cdot 10^{-7},$$

$$\alpha_6 = -4.485 \cdot 10^{-11}, \quad \alpha_8 = -5.393 \cdot 10^{-15},$$

$$\alpha_{10} = -1.175 \cdot 10^{-18}, \quad \alpha_{12} = -4.997 \cdot 10^{-23},$$

r меняется от 0 до 22.5 мм; поверхность зеркала M2 задается параметрами:

$$k = -0.01276, \quad c = 1/R_{\text{vertex sphere}} = 1/294.4 \text{ (mm}^{-1}\text{)},$$

$$\alpha_2 = -1.0 \cdot 10^{-4}, \quad \alpha_4 = -2.762 \cdot 10^{-10},$$

$$\alpha_6 = -1.303 \cdot 10^{-15}, \quad \alpha_8 = 7.161 \cdot 10^{-20},$$

$$\alpha_{10} = -7.599 \cdot 10^{-24}, \quad \alpha_{12} = -3.077 \cdot 10^{-28},$$

r меняется от 0 до 83.5 мм.

Объектив обеспечивает дифракционно-ограниченное качество изображения на всем поле зрения (рис. 6, 7). Для некогерентного излучения диаметр изображений

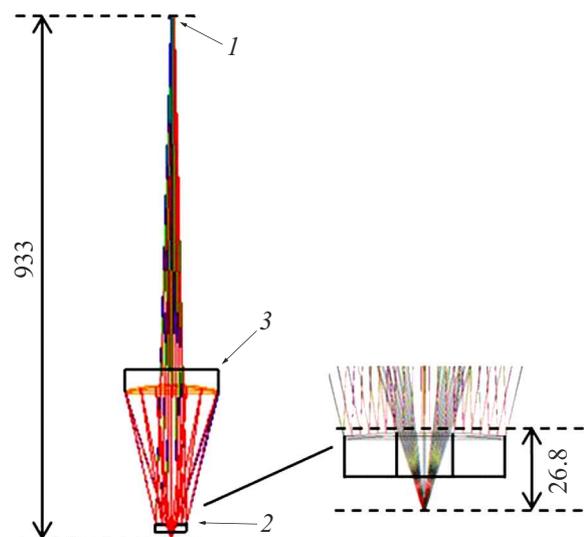


Рис. 5. Объектив $\times 10$, $NA = 0.3$. 1 — динамическая маска, 2 — зеркало M1 ($D_{\text{optical}} = 55$ mm, $R_{\text{nearest sphere}} = 279$ mm, $PV_{\text{aspheric}} = 5.36$ μm), 3 — зеркало M2 ($D_{\text{optical}} = 167$ mm, $R_{\text{nearest sphere}} = 312.2$ mm, $PV_{\text{aspheric}} = 6.37$ μm).

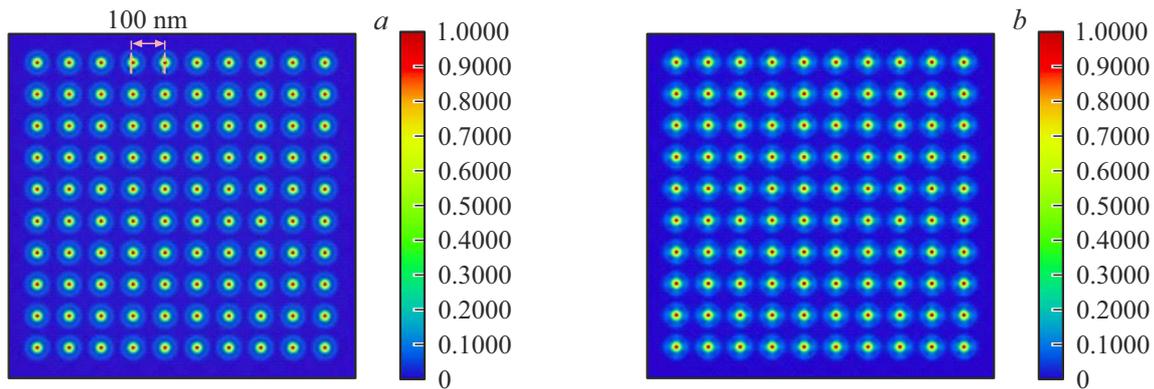


Рис. 6. Изображение 200-нм отверстий динамической маски на резисте в центре (а) и на краю (b) поля зрения $10 \times 10 \text{ nm}^2$. Объектив $\times 10$, $NA=0.3$, $\lambda = 11.2 \text{ nm}$. Излучение синхротрона задавалось некогерентным.

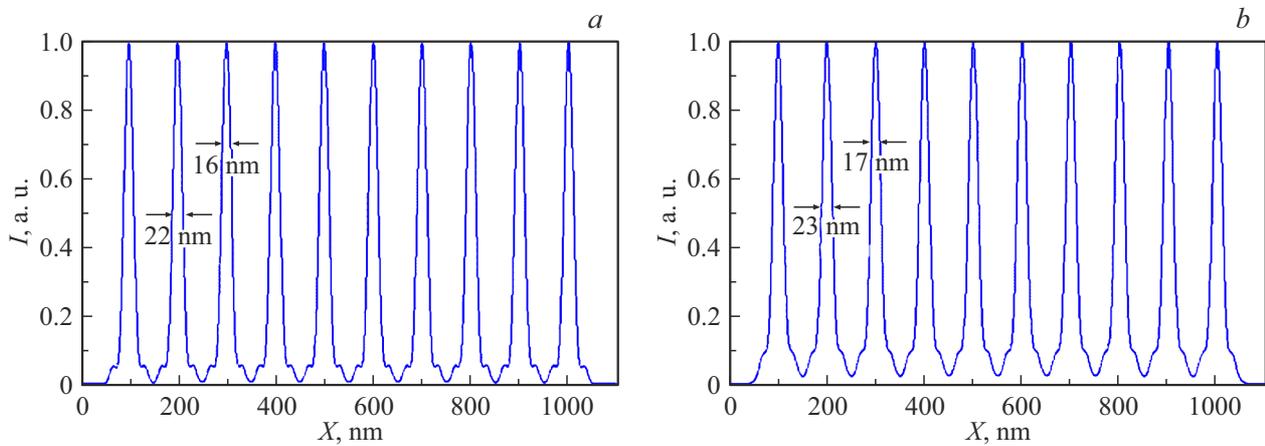


Рис. 7. Сечения изображений 200-нм отверстий динамической маски. Объектив $\times 10$, $NA=0.3$, $\lambda = 11.2 \text{ nm}$. Некогерентное излучение: а — в центре поля зрения, b — на краю поля зрения $10 \times 10 \text{ nm}^2$.

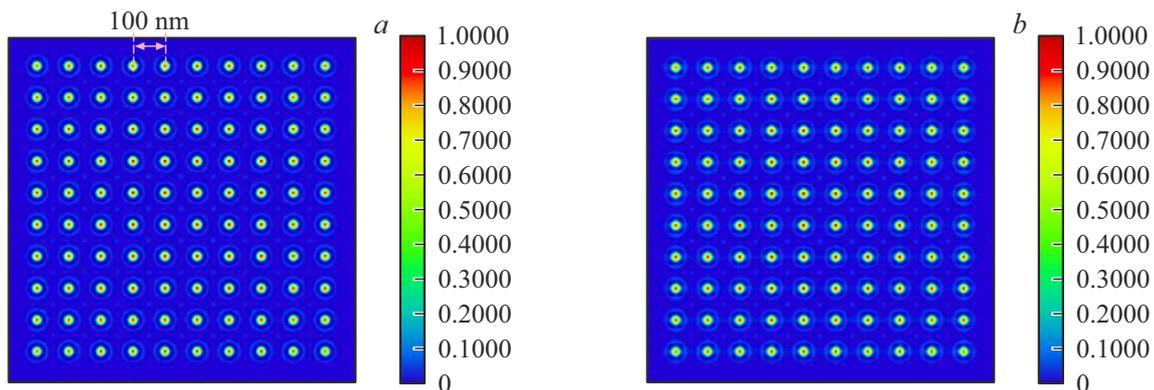


Рис. 8. Изображение 200-нм отверстий динамической маски на резисте: в центре (а) и на краю (b) поля зрения $10 \times 10 \text{ nm}^2$. Объектив $\times 10$, $NA=0.3$, $\lambda = 11.2 \text{ nm}$. Излучение синхротрона задавалось когерентным.

отверстий составил 16 нм по уровню 0.7 и 22 нм по уровню 0.5.

Для когерентного света, который может быть получен при использовании синхротронов с ондуляторными источниками, изображения отверстий сужаются до

19 нм по уровню 0.5 и 14 нм по уровню 0.7 (рис. 8), т.е. происходит интерференция сферических расходящихся из отверстий волн, которая приводит в данном случае к сужению пиков интенсивности на изображении.

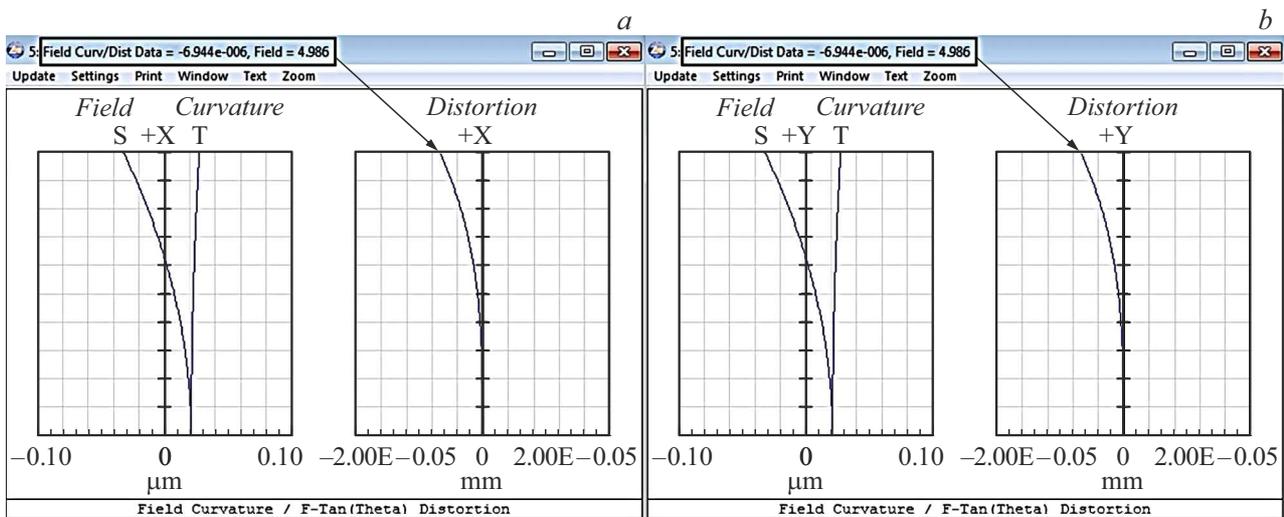


Рис. 9. *a* — X-дисторсия, *b* — Y-дисторсия. Объектив $\times 10$, NA= 0.3.

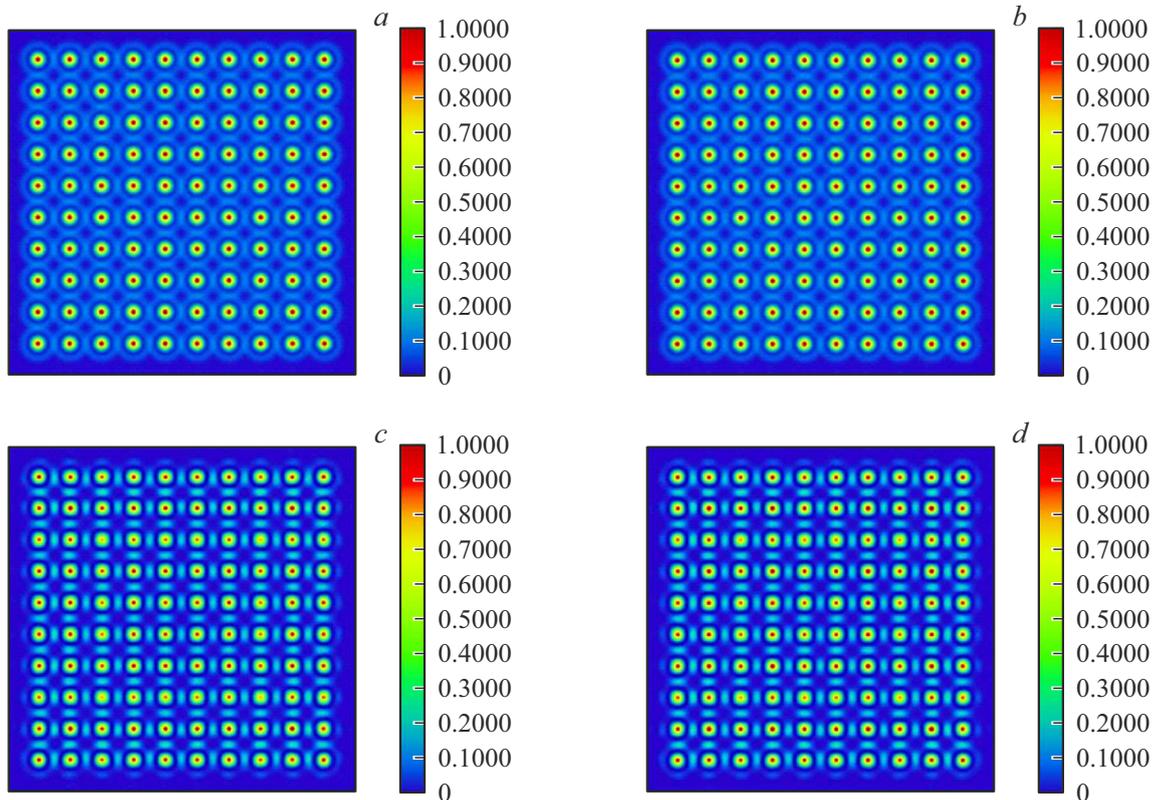


Рис. 10. Изображение маски с 200-нм отверстиями в центре и на краю поля зрения. Объектив $\times 20$, NA= 0.4, $\lambda = 11.2$ нм. Некогерентное излучение: *a* — в центре поля зрения объектива, *b* — на краю поля зрения 10×10 мм². Когерентное излучение: *c* — в центре поля зрения объектива, *d* — на краю поля зрения 10×10 мм².

Дисторсия объектива $\times 10$ на краю 10-мм поля зрения составила в плоскости изображения 7 нм (рис. 9), что может быть скомпенсировано движением столика с резистом по дуге при сканировании.

На рис. 10 и 11 приведены изображения с объективом $\times 20$, NA= 0.4. Из рис. 11 следует, что размер

изображений 200-нм отверстий по уровню 0.7 составил 10 нм. Когерентность излучения приводит к слабоинтенсивным артефактам, которые могут быть устранены подбором чувствительности резиста.

Оптическая схема объектива $\times 20$, NA= 0.4 приведена на рис. 12. Длина схемы — 1658 мм. Максимальные

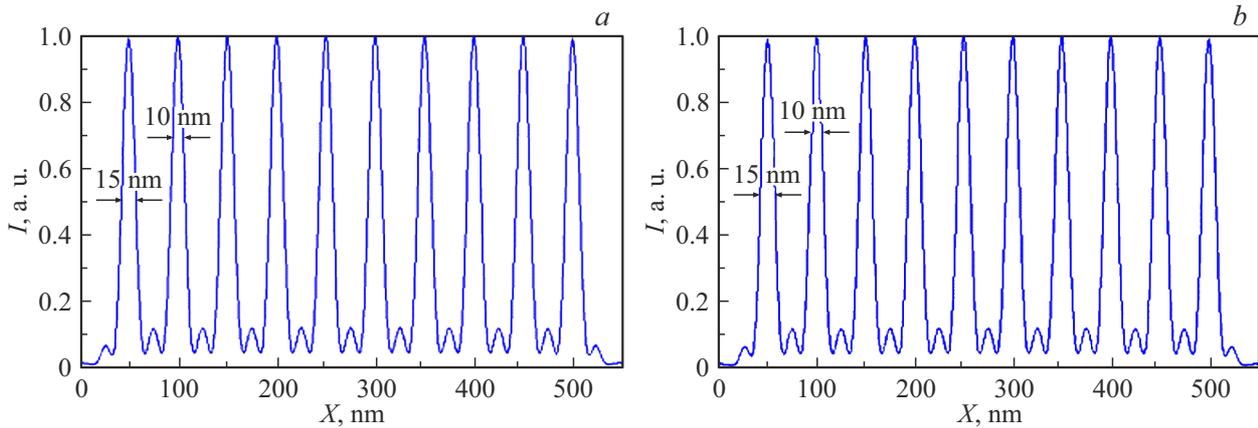


Рис. 11. Сечения изображений отверстий диафрагмы. Объектив $\times 20$, $NA=0.4$, $\lambda = 11.2$ nm. некогерентный свет: *a* — в центре поля зрения, *b* — на краю поля зрения 10×10 μm^2 .

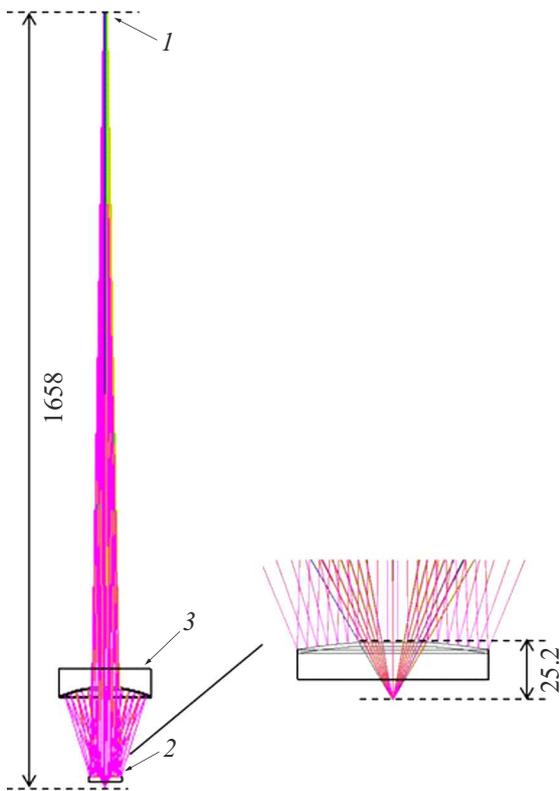


Рис. 12. Объектив $\times 20$, $NA=0.4$. *1* — динамическая маска, *2* — зеркало M1 ($D_{optical} = 66$ mm, $R_{nearestsphere} = 244$ mm, $PV_{aspheric} = 17.6$ μm), *3* — зеркало M2 ($D_{optical} = 174$ mm, $R_{nearestsphere} = 249.5$ mm, $PV_{aspheric} = 19.4$ μm).

съемы материала для асферизации зеркал составили 17.6 и 19.4 μm для M1 и M2 соответственно. Такие съемы доступны для асферизации на установках ионно-пучкового травления [14]. Диаметры зеркал составили 174 и 66 mm.

Дисторсия объектива $\times 20$, $NA=0.4$ мала — всего 1.1 nm на краю поля зрения, что много меньше диамет-

ров изображений отверстий, поэтому почти не влияет на изображение (рис. 13).

2. Оценка производительности литографической схемы с объективом $\times 20$, $NA=0.4$

Мощность излучения на выходе из оптической системы можно представить в виде

$$P = E_{ph} \cdot \int_{E_1}^{E_2} S(E) \cdot R_1(E) \cdot R_2(E) \cdot R_3(E) \cdot R_4(E) \cdot T(E) dE, \quad (3)$$

где $S(E)$ — поток фотонов с энергией в единичной полосе энергий E , E_{ph} — энергия фотона с длиной волны 11.2 nm и равна 108 eV, $R_i(E)$ — коэффициенты отражения зеркал системы засветки маски и объектива с учетом реальной шероховатости, $T(E)$ — коэффициент пропускания фильтра для подавления длинноволнового излучения.

Функции $S(E)$ и $T(E)$ слабо меняются на масштабе ширины брэгговских пиков, поэтому могут быть вынесены за знак интеграла. В спектральной полосе пропускания оптической системы ΔE_{os} , выраженной в процентах по отношению к центральной энергии $E = 108$ eV, число фотонов на выходе из системы в секунду $N_{ph out}$ может быть представлено в виде

$$N_{ph out} = s(108\text{eV}) (\Delta E_{os}/0.1) \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot T, \quad (4)$$

где R — максимумы коэффициентов отражения, T — пропускание фильтра при энергии фотонов 108 eV.

Подставив в (4) численное значение $s(108\text{eV}) = 6.2 \cdot 10^{12}$ [photon/(s·(0.1% bw))] (bw — bandwidth — ширина полосы), взятое из рис. 14, $R_i = 0.7$, взятые из [15,16], $T = 0.7$ — типичное

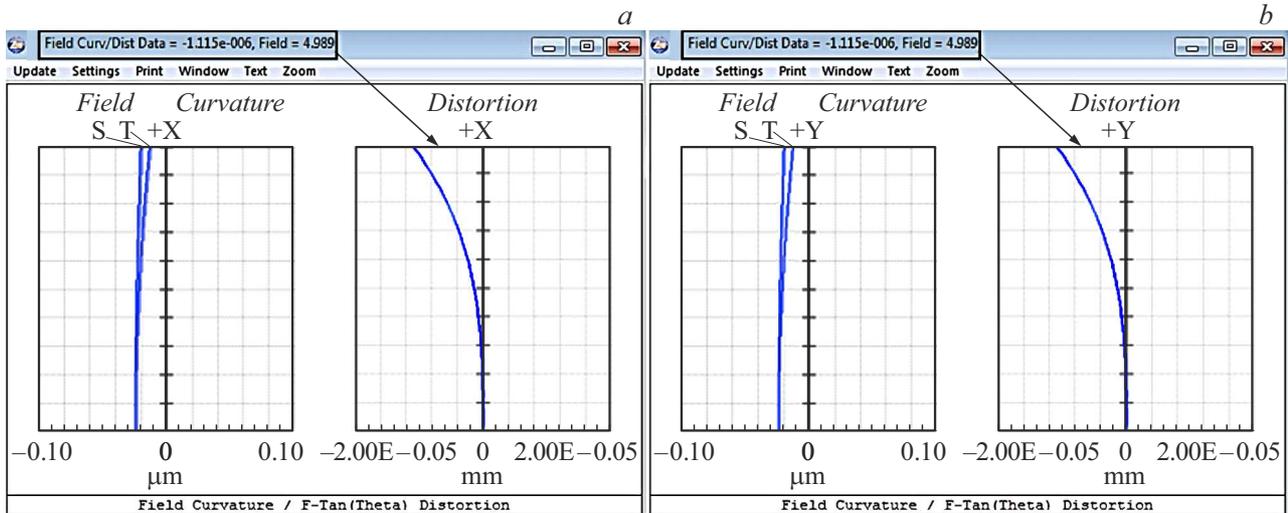


Рис. 13. *a* — X-дисторсия, *b* — Y-дисторсия. Объектив $\times 20$, NA= 0.4.

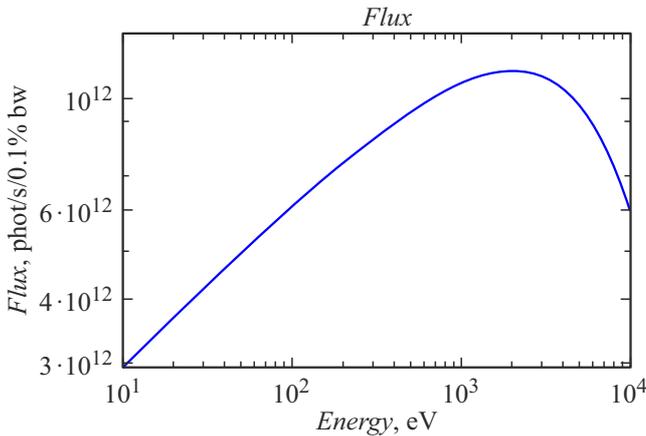


Рис. 14. Поток фотонов в „Большом накопителе“ Курчатова синхротрона, взятый для оценки производительности ЭУФ литографа (рассчитан в программе ОАЗИС [18]).

значение пропускания для бериллийсодержащих фильтров [17] и $\Delta E_{os} = 2.5\%$, найдем число фотонов, прошедших через оптическую систему:

$$N_{ph\ out} = 6.2 \cdot 10^{12} \times 25 \times 0.7^4 3.7 \cdot 10^{13} [\text{photon/s}], \quad (5)$$

Мощность рентгеновского излучения на пластину PW:

$$P_W = 1.6 \cdot 10^{-19} \times 106 \times 3.7 \cdot 10^{13} = 6.4 \cdot 10^{-4} W, \quad (6)$$

Производительность литографического процесса $W[\text{cm}^2/\text{s}]$ при чувствительности резиста $S_{pr} = 10 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ можно выразить в виде

$$W = P_W/S = 6.4 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s} = 230 [\text{cm}^2/\text{h}], \quad (7)$$

В формуле (7) не учтены следующие факторы:

1) согласно рис. 2, b, примерно 50% энергии лежит вне области динамической маски;

2) не учтены дифракционные потери излучения на отверстиях, поэтому выражение (7) можно переписать в виде

$$W = P_W/S \times DP = 230 \cdot DP [\text{cm}^2/\text{h}], \quad (8)$$

где DP — доля дифрагированного на отверстиях излучения, захваченная объективом. Для рассмотренных нами схем: NA= 0.3, $\times 10$, $DP_1 = 0.48$; NA= 0.4, $\times 20$ $DP_2 = 0.25$;

3) потери, связанные с тем, что экспонирующую дозу должны получить не только центры полос, но и их края, исходя из рис. 7, можно оценить как $\sim 50\%$.

С учетом этих факторов наиболее производительной и реалистичной с точки зрения дальнейших разработок на данном этапе исследований является схема NA = 0.3, $\times 10$. Для нее производительность составит $27.5 \text{ cm}^2/\text{h}$, примерно 0.35 пластины диаметром 100 mm в h. Это вполне достаточная производительность для исследовательских задач.

Потери интенсивности рентгеновского излучения при прохождении канала диаметром 200 nm и длиной 200–1000 nm в поликремнии незначительны [19], поэтому могут не учитываться.

Однако наибольших потерь интенсивности можно ожидать из-за конечной прозрачности динамической маски — доли в площади, занимаемой отверстиями. В зависимости от отношения ширины требуемых литографических дорожек к ~ 20 -nm диаметру изображений отверстий производительность уменьшается от 5 до 5^2 раз, где 5 — это отношение $1 \mu\text{m}$ периода отверстий к их 200-nm диаметру. Коэффициент 5, если делаются 20-nm дорожки, 5^2 — если делается сплошная засветка резиста. Таким образом, расчетная производительность с учетом всех факторов составляет от 1/14 до 1/70 пластины диаметром 100 mm в h.

Выводы

1. Рассчитана рентгенооптическая схема рентгеновского безмасочного литографа на длину волны 11.2 nm. Проанализированы ее основные параметры: разрешение и производительность литографического процесса. Показано, что схема с $NA=0.3$ и уменьшением $\times 10$ обладает наибольшей производительностью при обеспечении пространственного разрешения до 17 nm по уровню интенсивности 0.7. Для достижения 10-nm разрешения необходимо использовать объектив с $NA=0.4$ и уменьшением $\times 20$.

2. С использованием синхротронного излучения Курчатовского синхротрона можно экспонировать от 1/70 до 1/14 пластины диаметром 100 mm в h , что достаточно для лабораторных задач.

3. Для увеличения производительности необходимо использовать ондуляторные источники синхротронного излучения, яркость которых на выбранной длине волны будет выше на 2–3 порядка. Однако в этом случае кратно возрастут тепловые нагрузки на маску, что потребует дополнительных исследований и выбора материалов.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-15-2021-1350 от 5 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0004).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii, Y. Torii. *J. Vac. Sci. Technol. B: Microelectron. Processing and Phenomena*, **7** (6), 1648 (1989). DOI: 10.1116/1.584507
- [2] J.E. Bjorkholm, J. Bokor, L. Eichner, R.R. Freeman, J. Gregus, T.E. Jewell, W.M. Mansfield, A.A. Mac Dowell, E.L. Raab, W.T. Silfvast, L.H. Szeto, D.M. Tennant, W.K. Waskiewicz, D.L. White, D.L. Windt, O.R. Wood, J.H. Bruning. *J. Vac. Sci. Technol. B: Microelectron. Processing and Phenomena*, **8**, 1509 (1990). DOI: 10.1116/1.585106
- [3] G. Dattoli, A. Doria, G.P. Gallerano, L. Giannessi, K. Hesch, H.O. Moser, P.L. Ottaviani, E. Pellegrin, R. Rossmannith, R. Steininger, V. Saile, J. Wüst. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **474** (3), 259 (2001).
- [4] А.Н. Генцелев, Б.Г. Гольденберг, В.Ф. Пиндюрин. *Способ проведения трафаретной сканирующей синхротронной рентгеновской литографии* (Институт ядерной физики СО РАН, Патент RU 2344454 C1, 2009.01.20)
- [5] K. Hesch, E. Pellegrin, R. Rossmannith, R. Steininger, V. Saile, J. Wüst, G. Dattoli, A. Doria, G.P. Gallerano, L. Giannessi, P.L. Ottaviani, H.O. Moser. *Conf.: Particle Accelerator Conference* (Chicago, PAC, **1**, 654, 2001), DOI: 10.1109/PAC.2001.987596
- [6] B. Jiang, Ch. Feng, Ch. Li, Z. Bai, W. Wan, D. Xiang, Q. Gu, K. Wang, Q. Zhang, D. Huang, S. Chen. *Scientific Reports*, **12**, 3325 (2022).
- [7] N. Choksi, D.S. Pickard, M. McCord, R.F.W. Pease, Y. Shroff, Y. Chen, W. Oldham, D. Markle. *J. Vac. Sci. Technol.*, **17**, 3047 (1999). DOI: 10.1116/1.590952
- [8] N.I. Chkhalo, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov. *Proc. SPIE*, **10224**, 102241O-1-O8 (2016).
- [9] Г.Д. Демин, П.П. Ким, Н.А. Дюжев. *Матер. XXVI Международного Международного симпозиума „Нанозлектроника и нанозлектроника“*, **1**, 544 (2022).
- [10] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://kcsni.nrcki.ru/pages/main/sync/source/index.shtml>
- [11] А.Д. Николенко, А.В. Бухтияров, О.Е. Терещенко, К.В. Золотарев. *Матер. XXVI Международного Международного симпозиума „Нанозлектроника и нанозлектроника“*, **1**, 572 (2022).
- [12] И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Д.Г. Рунцов, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало, Я.В. Ракшун, Ю.В. Хомяков, В.А. Чернов, И.А. Щелоков. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **5**, 3 (2023).
- [13] Электронный ресурс. Режим доступа: http://kcsni.nrcki.ru/files/pdf/otchet_2020.pdf
- [14] N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, I.V. Malyshev, M.S. Mikhaylenko, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, I.G. Zabrodin. *Precision Engineer.*, **48**, 338 (2017). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.004
- [15] M.V. Svechnikov, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.N. Nechay, D.E. Pariev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.A. Tatarskiy, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, M.G. Sertsu, A. Sokolov, Y.A. Vainer, M.V. Zorina. *Opt. Expr.*, **26** (26), 33718 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.033718
- [16] R.M. Smertin, N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, S.A. Garakhin, S.Yu. Zuev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, P.A. Yunin. *Opt. Expr.*, **30** (26), 46749 (2022).
- [17] N. Chkhalo, A. Lopatin, A. Nechay, D. Pariev, A. Pestov, V. Polkovnikov, N. Salashchenko, F. Schäfers, M. Sertsu, A. Sokolov, M. Svechnikov, N. Tsybin, S. Zuev. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **19**, 546 (2019). DOI: 10.1166/jnn.2019.16474
- [18] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.aps.anl.gov/Science/Scientific-Software/OASYS>
- [19] П.Ю. Глаголев, Н.А. Дюжев, В.И. Корнеев, Г.Д. Демин. *Матер. XXVII Международного Международного симпозиума „Нанозлектроника и нанозлектроника“*, **2**, 843 (2023).