

УДК 535-34

## ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ МИКРООПТИКА: ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ

© 2024 г. И. И. Лятун<sup>a,\*</sup>, П. Н. Медведская<sup>a</sup>, А. С. Коротков<sup>a</sup>, С. А. Шевырталов<sup>a</sup>,  
С. С. Лятун<sup>a</sup>, А. А. Снигирев<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Международный научно-исследовательский центр “Когерентная рентгеновская оптика  
для установок Мегасайенс”,

Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград, 236041 Россия

\*e-mail: ivanlyatun@gmail.com

Поступила в редакцию 11.02.2024 г.

После доработки 28.04.2024 г.

Принята к публикации 28.04.2024 г.

Представлены перспективы использования рентгеновских высокоразрешающих микролинз для задач корегентной визуализации. Рассмотрены современные технологии и методы микрообработки для изготовления 2D-микролинз на примере лазерных систем, ионно-лучевой литографии и аддитивных технологий. Произведены оценки эффективности разных материалов для приложений рентгеновской микрооптики и выполнена оптимизация временных затрат для изготовления микрообъектива с разрешением 100 нм с использованием систем ионно-лучевой литографии.

**Ключевые слова:** рентгеновская преломляющая микрооптика, параболические микролинзы, ионно-лучевая литография, высокоразрешающий микрообъектив, алмаз.

**DOI:** 10.31857/S1028096024120013, **EDN:** QXMLSD

### ВВЕДЕНИЕ

Синхротронное излучение активно используется для решения передовых научно-исследовательских задач в различных областях науки и техники. Синхротронные источники нового поколения активно эксплуатируют преломляющую рентгеновскую оптику, которая позволяет эффективно решать задачи управления пучками жесткого рентгеновского излучения [1, 2]. Варьирование материала, формы преломляющей поверхности и количество индивидуальных линз позволяет легко адаптировать оптику для решения задач в энергетическом диапазоне от 2 до 200 кэВ с сохранением универсальности схемы для широкого круга приложений [3]. Одной из главных характеристик составных преломляющих линз (рис. 1) (compound refractive lens) является их разрешающая способность:

$$d_{\text{lim}} = 1.22 \lambda F / A_{\text{eff}}, \quad (1)$$

$$F = \frac{R}{2N\delta} + L/6, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $F$  — фокусное расстояние толстой линзы,  $A_{\text{eff}}$  — эффективная апертура,  $R$  — радиус кривизны параболического профиля линзы,  $N$  — количество двояковогнутых линз,  $\delta$  — декремент показателя преломления ( $n=1 - \delta + i\beta$ ) материала линзы,  $\beta$  — характеристика поглощения рентгеновского излучения,  $L$  — длина составной преломляющей линзы [4]. Эффективная (рабочая) апертура рентгеновских линз определяется поглощением излучения в материале, из которого они изготовлены, поэтому для получения большей светосилы линзы используют материалы с большим коэффициентом  $\delta/\beta$  (рис. 2а). Вопрос подбора оптимальных материалов для высокоразрешающей оптики рассмотрен подробно далее. Общая длина составной линзы может быть выражена через ее физическую апертуру следующим образом:

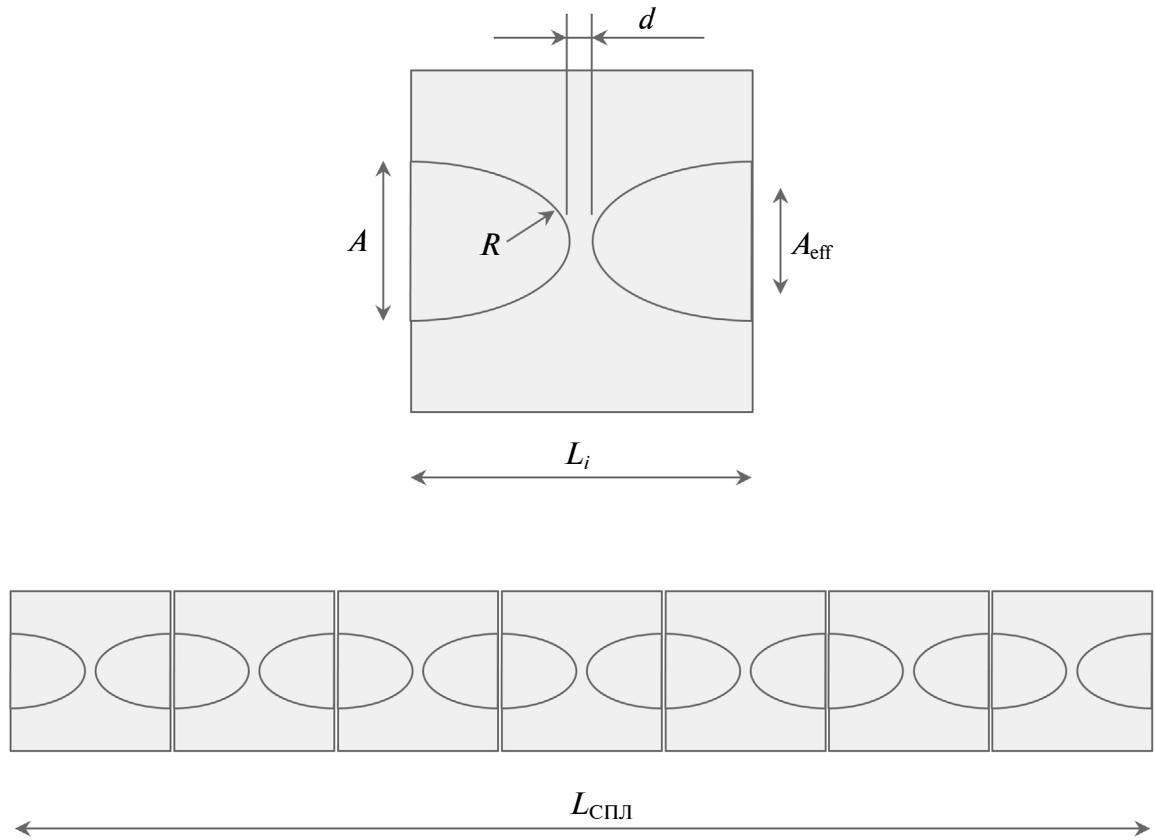


Рис. 1. Схема преломляющей и составной линз.

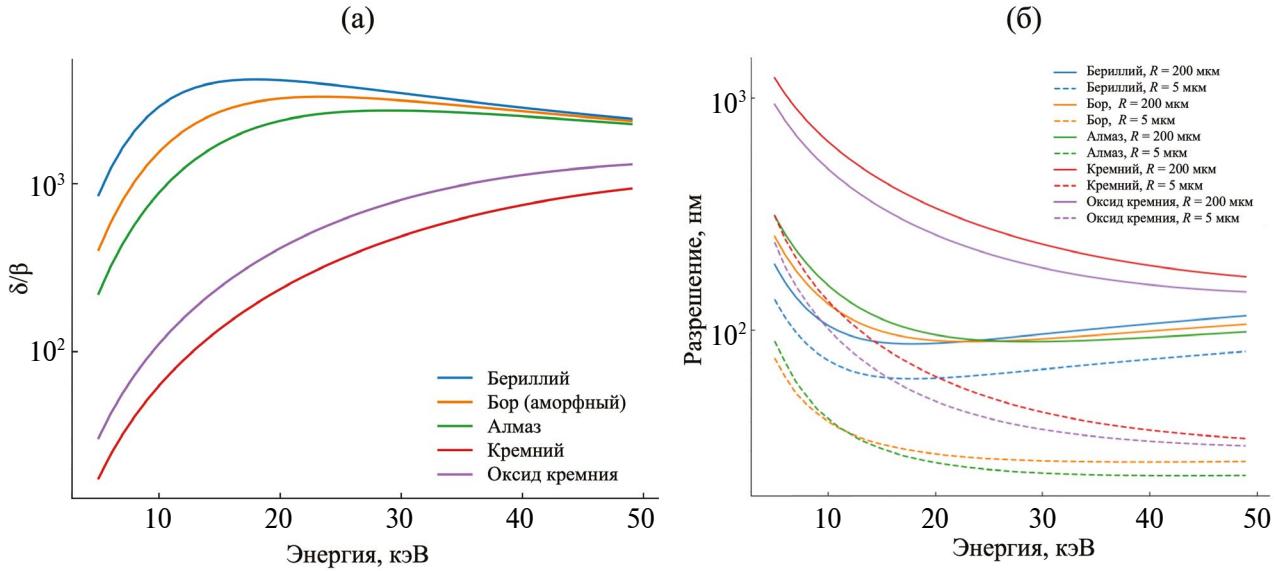


Рис. 2. Сравнение оптических характеристик материалов рентгеновской оптики (а), оптические характеристики составной преломляющей линзы в зависимости от радиуса кривизны параболического профиля (б).

$$L = \left( \frac{A^2}{4R} + d \right) N. \quad (3)$$

Очевидно, что малый радиус кривизны параболического профиля линзы обеспечивает меньшее фокусное расстояние (2), это позволяет получить большую числовую апертуру и разрешение, близкое к дифракционно-ограниченному разрешению. Однако рекордные значения разрешения требуют большого количества линз с малым фокусным расстоянием, что, с одной стороны, ведет к увеличению общей длины составной преломляющей линзы (3). С другой стороны, при увеличении числа линз эффективная апертура неизбежно уменьшается за счет фотопоглощения. Поэтому для получения предельного разрешения резонно оптимизировать размер рабочей апертуры линз  $A$ , делая ее сопоставимой с эффективной апертурой объектива  $A_{\text{eff}}$ . Для приложений нанофокусировки целесообразнее использовать преломляющие линзы с малыми радиусами. Экспериментально было показано, что применение микрооптики является многообещающим для высокоразрешающей рентгеновской микроскопии [5, 6].

На рис. 2б представлены оценки предельной разрешающей способности составной преломляющей линзы для основных материалов в диапазоне энергии 5–50 кэВ. Для оценок были использованы следующие параметры линзы: был выбран рабочий отрезок (расстояние от последнего элемента объектива до исследуемого образца, далее WD) 5 мм, радиус кривизны  $R = 200$  мкм (стандартный) и для микрооптики 5 мкм, рабочая

апертура  $A = 880$  мкм и для микрооптики 30 мкм. Для берилля (представлен как эталон) выбран минимальный радиус кривизны 50 мкм, поскольку большая часть технологий микрообработки металлов не применима в лабораторных условиях из-за высокой токсичности берилля. Поэтому ограничения бериллиевой оптики сегодня определены технологией изготовления металлического пуансона ( $R_{\min} = 50$  мкм), применяемого для формирования параболического углубления в металле. Анализируя полученное предельное разрешение для 12 кэВ для нескольких перспективных материалов, можно заметить, что уменьшение радиуса кривизны от 200 до 5 мкм позволяет повысить разрешение в два–пять раз.

В табл. 1 представлены оценки оптических характеристик перспективных рентгеноаморфных материалов на примере диоксида кремния и бора, выбор которых обусловлен задачей минимизации формирования спектральной структуры и дифракционных потерь в объективе. Дополнительным преимуществом рассматриваемых материалов является их более низкая стоимость и доступность по сравнению с синтетическим алмазом и бериллием. Оценка оптических характеристик составной преломляющей линзы была выполнена для рентгеновских микролинз с радиусом кривизны  $R = 5$  мкм и фиксированным фокусным расстоянием  $F = 1$  см. Компактная микрооптика с малым радиусом кривизны по сравнению с классическими линзами ( $R > 50$  мкм) имеет большую числовую апертуру объектива [2]. Расчет эффективной апертуры был выполнен с исполь-

**Таблица 1.** Предельные оптические характеристики составных преломляющих линз с радиусом кривизны  $R = 5$  мкм

Материалы	Энергия, кэВ	
	12	20
Бор (B) $\rho = 2.6$ г/см <sup>3</sup>	$A_{\text{eff}} = 45$ мкм $d_{\text{lim}} = 28$ нм $N = 85$ шт.	$A_{\text{eff}} = 40$ мкм $d_{\text{lim}} = 28$ нм $N = 290$ шт.
Алмаз (C) $\rho = 3.5$ г/см <sup>3</sup>	$A_{\text{eff}} = 35$ мкм $d_{\text{lim}} = 36$ нм $N = 51$ шт.	$A_{\text{eff}} = 36$ мкм $d_{\text{lim}} = 21$ нм $N = 155$ шт.
Оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) $\rho = 2.2$ г/см <sup>3</sup>	$A_{\text{eff}} = 12.5$ мкм $d_{\text{lim}} = 101$ нм $N = 85$ шт.	$A_{\text{eff}} = 14.3$ мкм $d_{\text{lim}} = 53$ нм $N = 280$ шт.
Кремний (Si) $\rho = 2.3$ г/см <sup>3</sup>	$A_{\text{eff}} = 9.4$ мкм $d_{\text{lim}} = 134$ нм $N = 79$ шт.	$A_{\text{eff}} = 10.9$ мкм $d_{\text{lim}} = 69$ нм $N = 260$ шт.

зованием онлайн-калькулятора [7]. Из представленных оценок видно, что микрообъектив из оксида кремния за счет меньшего среднего атомного номера по сравнению с чистым кремнием позволяет получить разрешение в ~1.3 раза лучше при практически том же количестве линз. Также стоит отметить, что малая эффективная апертура линз из  $\text{SiO}_2$  ~12–15 мкм позволяет изготавливать оптику с меньшей физической апертурой, что сокращает общее время изготовления объектива с нанометровым разрешением. Еще одним перспективным материалом для рентгеновской оптики является аморфный бор [8]: его оптические характеристики в среднем в три раза лучше, чем оксида кремния, за счет большой эффективной апертуры ~40–45 мкм в энергетическом диапазоне 12–20 кэВ.

Видно, что материал с высокой оптической плотностью (алмаз) наиболее эффективен для высокоразрешающих линз и дает выигрыш в разрешающей способности в два–три раза по сравнению с другими материалами. Для достижения разрешения 35 нм требуется 51 алмазная двояковогнутая микролинза при эффективной апертуре микрообъектива ~35 мкм. Следовательно, для преломляющей оптики высокого разрешения с дифракционным пределом в десятки нанометров не требуются объективы с большой физической апертурой, и целесообразно изготовление компактных микрообъективов с малыми радиусами кривизны из материалов с большим коэффициентом  $\delta/\beta$ . Очевидно, что для производства высокоразрешающих линз с микронным радиусом кривизны требуется специальные технологии микро- и нанообработки материалов, позволяющие изготавливать точные параболические вогнутые профили с высоким качеством рабочей поверхности.

## ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ 2D МИКРОЛИНЗ

Существует большое количество технологий микро- и нанообработки материалов, включая оптическую и электронно-лучевую литографию, которые активно используются для изготовленияnanoструктур и микро- и наноустройств, в том числе для рентгенооптических приложений [2, 9]. Однако основная часть технологий отработана только для определенных материалов, поэтому часть существующих методов не применима к широкому спектру материалов при изготовлении сложных трехмерных микро- и nanoструктур, включая элементы рентгеновской оптики для двумерной фокусировки. Очевидно, что для производства микрооптики ( $R < 5$  мкм) требу-

ются технологии, в которых обрабатывающий “зонд” имеет радиус кривизны, не превышающий ~1 мкм. Для коротковолнового рентгеновского излучения, в отличие от видимого диапазона длин волн, требуется более высокое качество рабочей поверхности микролинзы. Для достижения предельного разрешения необходимо не менее 50 двояковогнутых преломляющих линз при  $R = 5$  мкм (табл. 1), а общая фазовая ошибка  $\sigma_z$  составной преломляющей линзы не должна превышать фазовый сдвиг на  $\pi/2$ . Для соответствия более жесткому требованию — критерию Марешала о допустимых aberrациях волнового фронта — необходимо, чтобы верхний предел среднеквадратичного отклонения накопленных ошибок профиля для линз был  $\sigma_z < \lambda/14\delta$ . В случае алмаза для энергии 12 кэВ фазовый сдвиг на  $\pi$  составляет ~10 мкм. Для большинства материалов  $\lambda/14\delta$  будет составлять ~2–4 мкм в энергетическом диапазоне 12–20 кэВ. Соответственно, для 50 алмазных микролинз верхний предел среднеквадратичного отклонения ошибки параболического профиля должен быть менее 20–40 нм в случае двояковогнутых линз. Стоит отметить, что при сборке линз в макрообъектив предъявляют также высокие требования — необходима субмикронная точность их совмещения в ортогональном направлении к оптической оси объектива. Высокая точность сборки микрообъектива обусловлена необходимостью сохранения рабочей апертуры линз и, как следствие, разрешающей способности и эффективности микрообъектива. Требования к точности изготовления рентгеновской микрооптики в три–пять раз превышают требования к оптике видимого света. Поэтому используемые технологии для оптики видимого света не могут быть применимы для составных преломляющих линз в равной степени, как и методы метрологии.

Для получения высокоразрешающей преломляющей микрооптики стоит рассматривать только особо точные и прецизионные технологии микрообработки материалов и современные аддитивные технологии. Среди аддитивных технологий первичным требованиям удовлетворяет технология двухфотонной полимеризации с разрешением ~100 нм. Использование полимерной печати для высокоразрешающей рентгеновской оптики было продемонстрировано в [10, 11]. Все работы объединяют использование полимеров, структура которых под воздействием ионизационного рентгеновского излучения деградирует при значительных дозах [5], что приводит к неконтролируемому изменению формы микролинз и, как следствие, к накоплению aberrаций в макрообъективе. К недостаткам технологии двух-

фотонной полимеризации стоит отнести создание оптически неоднородного структурированного объема линзы в виде воксельей полимера. Такая структура неизбежно проявляется в когерентном рентгеновском излучении в виде спеклов. Среди классических методов микрообработки для задач рентгеновской оптики стоит рассматривать только “острофокусные” методы прецизионной обработки. К таким системам нельзя отнести классические лазерные системы резки, так как средний размер области взаимодействия излучения с материалом, как правило, превышает несколько микрометров, а предельное достижимое качество обработки поверхности определяется временем воздействия излучения и для рентгеновской оптики составляет  $\sigma_{rms} \sim 0.3$  мкм [12]. Альтернативой для изготовления высокоразрешающих рентгеновских микролинз является метод прямого переноса дизайна в материал — метод ионно-лучевой литографии на основе современных систем сфокусированного ионного пучка. Данный метод имеет ряд дополнительных преимуществ по сравнению с другими методами микрообработки — высокое пространственное разрешение современных ионных колонн на базе жидкокристаллического ионного источника  $\sim 2\text{--}5$  нм. Ионное распыление позволяет выполнять обработку таких особо твердых материалов, как алмаз [13]. Благодаря ионно-лучевой литографии появляется возможность создавать и корректировать сложные криволинейные 3D-поверхности с нанометровой точностью: ошибка профиля линзы менее 100 нм, шероховатость поверхности менее 30 нм. Высокое качество рабочей поверхности микролинз, выполненных с помощью ионно-лучевой литографии, обеспечивают благодаря использованию малых токов  $\sim 3\text{--}7$  нА из жидкокристаллического ионного ( $Ga^+$ ) источника. Изготовление микролинз с апертурой 20–30 мкм и радиусом кривизны 3–5 мкм составляло несколько часов, причем основная поправка времени связана с малым радиусом кривизны линзы. Оптимизация процесса травления линз за счет увеличения тока на системах ионно-лучевой литографии приводит к увеличению размера фокального пятна, снижению качества поверхности и невозможности получения линз с  $R < 3$  мкм. В рамках поиска более производительных систем ионного профилирования, а также улучшения качества поверхности и повышения скорости физико-химического травления разными газами были рассмотрены системы плазменных сфокусированных ионных пучков (plasma focused ion beam), позволяющих использовать такие газы, как O, Ar, N, Xe и другие. Однако в случае травления алмаза галлиевые источники не уступают

в скорости травления кислородным [14]. Также стоит отметить, что средний размер фокального пятна в системе плазменного сфокусированного ионного пучка примерно в пять раз больше по сравнению с классическими системами  $Ga^+$ , что будет приводить к меньшей детализации профиля линзы при сохранении скорости травления [15]. Скорость травления  $Y_v$  разных материалов, в том числе и композитных, зависит от характеристик падающего иона, материала мишени и вычисляется по следующей формуле [16]:

$$Y_v = \frac{W Y}{\rho N_A N_m n e}, \quad (4)$$

где  $W$  — молекулярная масса [г/моль],  $Y$  — скорость распыления (sputtering yield) [ат./ион],  $\rho$  — плотность материала [ $\text{г}/\text{см}^3$ ],  $N_A$  — число Авогадро [ $\text{моль}^{-1}$ ],  $N_m$  — число атомов в молекуле,  $n$  — заряд падающих ионов,  $e$  — заряд электрона [Кл]. Скорость распыления  $Y$  рассчитывали при помощи моделирования методом Монте-Карло процесса травления с использованием программы The Stopping and Range Ions in Matter (SRIM) [17]. Как правило, скорость травления указывается как отношение объема удаленного материала [ $\text{мкм}^3$ ] при заряде пучка 1 нКл. Если  $Y_v$  умножить на ток ионного пучка, то размерность скорости распыления можно представить как [ $\text{мкм}^3/\text{с}$ ] либо перевести в [ $\text{мкм}^3/\text{мин}$ ], что более удобно для определения затраченного времени для изготовления линзы. Расчеты скоростей травления проводили для источника ионов  $Ga^+$  с ускоряющим напряжением 30 кВ и током 3 нА, результаты представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что интерес представляют материалы на основе кремния и бора, поскольку по сравнению с алмазом дают выигрыш в скорости травления в 6 и 1.3 раза соответственно.

При изготовлении микролинз методом ионно-лучевой литографии также стоит учитывать необходимость удаления переосажденного слоя, образующегося при получении вогнутого параболического углубления. Стоит отметить, что для таких материалов, как кремний, оксид кремния и бор, удаление переосажденного слоя без изменения профиля линзы является сложной технологической задачей [4]. Микрообработка материалов с большой шириной запрещенной зоны возможна с помощью метода ионно-лучевой литографии при использовании дополнительных токопроводящих масок, покрытий и других методов, применяемых в электронной микроскопии. Токопроводящие покрытия могут быть легко удалены вместе с переосажденным слоем. Можно заключить, что для изготовления высокоразре-

**Таблица 2.** Скорости травления материалов

Материал	Скорость травления	
	мкм <sup>3</sup> /нКл	мкм <sup>3</sup> /мин
Бор (B)	0.08	13.88
Алмаз (C)	0.06	11.04
Оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ )	0.37	66.42
Кремний (Si)	0.26	47.22

шающей микрооптики классические системы ионно-лучевой литографии с  $\text{Ga}^+$  наиболее перспективны и универсальны.

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРООПТИКИ

Выбор материалов для преломляющей оптики является сложной проблемой. Это связано с использованием линз на современных дифракционно-ограниченных когерентных источниках, в том числе для решения задач визуализации фазово-контрастных объектов. Известно, что бериллий и алмаз являются наиболее распространенными материалами для изготовления рентгеновских преломляющих линз и окон. Однако зернистые структуры бериллия и CVD-алмаза (CVD — chemical vapor deposition, химическое осаждение из газовой фазы) при освещении когерентным излучением приводят к формированию спеклов и дополнительному диффузному рассеянию в режиме рентгеновской микроскопии и фокусировки излучения [12, 18]. Высококачественный синтетический алмаз, несмотря на успешное применение для задач изготовления термо- и радиационно-нагруженных сплиттеров, окон и линз, формирует глитчи (дифракционные потери интенсивности) [19]. Поэтому для улучшения характеристик рентгеновской оптики требуются материалы, которые в когерентном рентгеновском излучении не будут формировать спеклы, глитчи и будут обладать минимальным рассеянием. Такие материалы можно назвать рентгеноаморфными — в них нарушен дальний порядок и проявляются изотропные оптические свойства на микроуровне. Однако аморфные материалы, как правило, имеют меньшую плотность в сравнении с кристаллическими, что приводит к необходимости компенсации этой разности большим количеством линз в составной преломляющей линзе [2].

Изготовление алмазной микрооптики с радиусом кривизны менее 5 мкм и апертурой 20 мкм

было впервые продемонстрировано на основе двулучевой (сфокусированный ионный пучок—растровый электронный микроскоп) системы с галлиевым источником ионов [13]. Дальнейшее развитие технологии [6] позволило изготовить полулинзу из более перспективного материала — нанополидисперсного алмаза — с радиусом кривизны 4 мкм [20]. Возможность получения микрооптики из аморфных материалов была продемонстрирована на примере борного стекла: апертура линзы  $A$  составила 15 мкм и радиус закругления  $R = 2.7$  мкм. Также была продемонстрирована возможность создания линзы из монокристаллического кремния при  $A = 15$  мкм и  $R = 2.3$  мкм, время травления полулинзы составило 1.5 ч [4]. Все микролинзы изготавливали с использованием сфокусированного ионного пучка  $\text{Ga}^+$  с энергией 30 кВ при токе 3 нА на двухлучевой установке Zeiss Crossbeam 540. Шероховатость оптических поверхностей линз и ошибка формы при данных параметрах колонны составили менее 30 и  $\sim 50$ –100 нм соответственно.

Для технологии изготовления высокоразрешающего микрообъектива методом ионно-лучевой литографии представляет интерес оценка скорости травления линз. Для расчетов использованы лучшие достигнутые параметры:  $A = 30$  мкм,  $R = 3$  мкм,  $d = 2$  мкм. В качестве целевого значения разрешения микрообъектива было выбрано значение  $d_{\text{lim}} = 100$  нм для энергии 12 кэВ. Для оценки разрешающей способности объектива была использована физическая апертура  $A = 30$  мкм для алмаза и бора, так как эффективная апертура превышает 50 мкм, а для  $\text{SiO}_2$  и Si апертура линзы была равна  $A_{\text{eff}}$ . Объем материала составной преломляющей линзы, который нужно удалить методом ионно-лучевой литографии, для  $N$  микролинз можно рассчитать по формуле:

$$V_{\text{СПЛ}} = \pi \frac{A^4}{32R} N. \quad (5)$$

Используя формулу (1) и данные о скорости распыления материалов из табл. 3, оценили пара-

**Таблица 3.** Параметры составных преломляющих линз и оценка времени изготовления

Материал	$d_{\text{lim}}$ , нм	$N$ , шт.	$A_{\text{eff}}$ , мкм	WD, мм	Объем материала, мкм <sup>3</sup>	Время травления, ч
Бор (B)	97	21	71	22	$5.6 \times 10^5$	668
Алмаз (C)	96	13	54	23	$3.4 \times 10^5$	520
Оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ )	97	55	12	7	$3.7 \times 10^4$	9
Кремний (Si)	111	100	6	2	$5.8 \times 10^3$	2

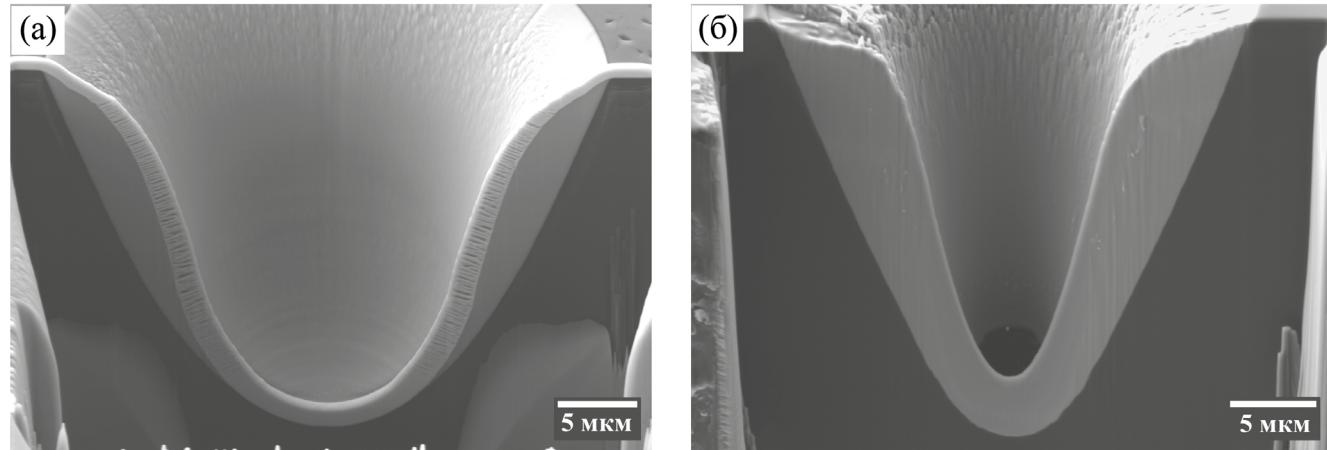
WD — расстояние от последнего элемента объектива до исследуемого образца.

метры составных преломляющих линз из разных материалов, а также время их изготовления.

Принимая во внимание воспроизведимую ошибку профиля изготовления линзы методом ионно-лучевой литографии на уровне  $\sim 50$ – $100$  нм, можно оценить максимальное количество двояковогнутых линз  $\sim 15$ – $50$  шт. (для алмаза 15–30 шт.). Стоит также обратить внимание на то, что сборка микрообъектива с использованием двулучевых систем происходит в ручном режиме с использованием микроманипуляторов, поэтому выбор материала в пользу алмаза и бора оправдан, так как это сокращает количество линз для сборки. Малая эффективная апертура для  $\text{SiO}_2$  и Si и больше количество линз будет приводить к меньшей светосиле

объектива, что ограничивает применение объектива в области энергии менее 20 кэВ.

Для оптимизации производительности ионно-лучевой литографии была применена система газовой химии (gas assisted etching), которая позволяет повысить качество и скорость травления [21]. Экспериментальное исследование было выполнено при изготовлении алмазных полулинз с током пучка 3 нА, в качестве прекурсора была использована вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Полученные линзы с апертурой 35.8 и 27.9 мкм и радиусами 5.9 и 3.3 мкм соответственно показаны на рис. 3. В табл. 4 представлены основные параметры полученных линз.



**Рис. 3.** Изготовление алмазной микролинзы методом ионно-лучевой литографии с применением газовой химии (светлые участки — переосажденный материал), радиус кривизны линзы: а — $-5.9$ ; б — $3.3$  мкм.

**Таблица 4.** Параметры линз и оценка времени изготовления с применением газовой химии

$R$ , мкм	$A$ , мкм	Глубина ( $H$ ), мкм	Отношение размеров	Время <sub>теор</sub> , ч	Время <sub>эксп</sub> , ч	Время <sub>теор</sub> /Время <sub>эксп</sub>
5.9	35.8	27.3	1.3	20.7	9	2.3
3.3	27.9	29.5	0.9	13.6	6	2.2

**Таблица 5.** Параметры алмазного микрообъектива и оценка времени изготовления

$A$ , мкм	$A_{\text{eff}}$ , мкм	$N$ , шт.	$d_{\text{lim}}$ , нм	$F$ , мм	Время, ч
10	32	38	99	7.9	19
15	39	25	100	11.9	63
20	45	19	99	15.7	150
25	50	15	100	20.0	289
30	54	13	96	23.0	520
35	59	11	98	27.1	815

Применение газовой химии для изготовления алмазной микрооптики позволяет сократить время в 2.2 раза. Однако стоит отметить, что штатная система газовой химии не позволяет поддерживать стабильное рабочее давление на протяжении всего времени травления линз на уровне  $\sim 2 \times 10^{-5}$  мбар. По окончании травления каждой линзы давление в рабочей камере составляло  $\sim 5 \times 10^{-6}$  мбар, и восстановление рабочего давления происходило только через несколько часов и носило непостоянный характер. Это приводит к нестабильной скорости травления линзы на разных этапах, что достаточно сложно учесть при создании набора линз с минимальными отклонениями от идеального параболического профиля.

Снижать временные затраты нужно за счет уменьшения физической апертуры линзы, так как она определяет общий объем и время травления. В табл. 5 представлены оценки количества микролинз и временные оценки их изготовления для решения задачи получения микрообъектива с дифракционным разрешением 100 нм. В качестве разумного предела стоит принять ограничение по количеству линз до 30 шт., как было отмечено выше. Соответственно, более оптимальным по временными затратам будет травление микролинз с апертурой 20–25 мкм в количестве  $\sim 20$  шт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход на новое поколение микрооптики представляет перспективу для современных дифракционно-ограниченных синхротронных источников, особенно в контексте приложений высокоразрешающей когерентной рентгеновской визуализации и микроскопии. В работе рассмотрены современные технологии, применимые

для изготовления высокоразрешающих рентгеновских микрообъективов с разрешением около 30–100 нм.

Из рассмотренных методов изготовления микрооптики особо выделяется метод ионно-лучевой литографии, реализованный на современных двулучевых системах. Он позволяет не только проводить микрообработку материалов любой твердости, но и обеспечивать контроль качества и формы профиля линз с нанометровой точностью. С использованием систем микроманипуляторов появляется возможность собирать микрообъективы с необходимой точностью на двулучевых установках. Метод ионно-лучевой литографии на базе колонны  $\text{Ga}^+$  в сочетании с системой газовой химии позволяет изготовить набор алмазных микролинз с предельным разрешением около 100 нм за 100–300 ч.

В работе также рассмотрены и обсуждены возможности использования аморфных материалов для рентгеновской микрооптики на примере бора и оксида кремния. Эти материалы позволяют решить проблемы формирования спеклов и дифракционных потерь. Для повышения оптических свойств и скорости травления методом ионно-лучевой литографии наибольший интерес представляет аморфный бор. Однако для макрообъектива с разрешающей способностью 100 нм требуется в 1.6 раза больше линз, что приводит к увеличению времени изготовления в 1.3 раза из-за более высокого коэффициента распыления бора. Скорость травления бора равна скорости травления алмаза. Следует отметить, что нерешенной проблемой для аморфных материалов остается удаление переосажденного слоя.

Отличной альтернативой для рентгеновской высокоразрешающей микрооптики являются нанополидисперсный и монокристаллический

алмаз. Эти материалы обладают высокой оптической плотностью и легко обрабатываются методом ионно-лучевой литографии, что позволяет получать линзы с максимальной ошибкой профиля около 50–100 нм [20]. Алмазная микрооптика обещает быть перспективной, поскольку ее дифракционный предел разрешения составляет менее 50 нм. Компактные размеры микролинз позволяют создавать ультракомпактные высокоразрешающие оптические схемы, в которых образец и объектив могут быть расположены на одной подложке.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-22-00422, <https://rscf.ru/project/23-22-00422/>). Экспериментальная работа по созданию микролинз выполнена на двулучевой системе Zeiss CrossBeam 540, которая входит в состав уникальной научной установки “Научно-образовательный многофункциональный комплекс подготовки и проведения синхротронных исследований” (SynchrotronLike).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Snigirev A., Snigireva I., Lengeler B., Kohn V. // Nature. 1996. V. 384. № 6604. P. 49.  
<https://doi.org/10.1038/384049a0>
2. Roth T., Alianelli L., Lengeler D., Snigirev A., Seiboth F. // MRS Bull. 2017. V. 42. № 6. P. 430.  
<https://doi.org/10.1557/mrs.2017.117>
3. Snigirev A., Snigireva I. // Comptes Rendus Physique. 2008. V. 9. № 5–6. P. 507.  
<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2008.02.003>
4. Medvedskaya P., Lyatun I., Golubenko K., Yunkin V., Snigireva I., Snigirev A. // Proc. SPIE. EUV and X-ray Optics, Sources, Instrumentation. 2021. V. 117760I. P. 84.  
<https://doi.org/10.1117/12.2589310>
5. Barannikov A., Polikarpov M., Ershov P., Bessonov V., Abrashitova K., Snigireva I., Yunkin V., Bourenkov G., Schneider T., Fedyanin A.A., Snigirev A. // J. Synchr. Radiat. 2019. V. 26. № 3. P. 714–719.  
<https://doi.org/10.1107/S1600577519001656>
6. Medvedskaya P., Lyatun I., Shevyrtalov S., Korotkov A., Polikarpov M., Snigireva I., Yunkin V., Snigirev A. // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. P. 060011.  
<https://doi.org/10.1063/5.0030736>
7. X-Ray Optics Calculator IMT RAS. Chernogolovka, 2010. [http://nano.iptm.ru/xcalc/xcalc\\_mysql/crl\\_par.php](http://nano.iptm.ru/xcalc/xcalc_mysql/crl_par.php). Cited 07 December 2023
8. Kobayashi V. // J. Mater. Sci. 1988. V. 23. P. 4392.  
<https://doi.org/10.1007/BF00551937>
9. Snigireva I., Polikarpov M., Snigirev A. // Synchr. Radiat. News. 2021. V. 34. № 6. P. 12.  
<https://doi.org/10.1080/08940886.2021.2022387>
10. Sanli U.T., Rodgers G., Zdora M.-C., Qi P., Garrevoet J., Falch K. V., Müller B., David C., Vila-Comamala J. // Light: Sci. Applications. 2023. V. 12. № 1. P. 107.  
<https://doi.org/10.1038/s41377-023-01157-8>
11. Petrov A., Bessonov V., Abrashitova K., Kokareva N., Safronov K., Barannikov A., Ershov P., Klimova N., Lyatun I., Yunkin V., Polikarpov M., Snigireva I., Fedyanin A., Snigirev A. // Opt. Express. 2017. V. 25. № 13. P. 14173.  
<https://doi.org/10.1364/OE.25.014173>
12. Polikarpov M., Kononenko T., Ralchenko V., Ashkinazi E., Konov V., Ershov P., Kuznetsov S., Yunkin V., Snigireva I., Polikarpov V., Snigirev A. // Proc. SPIE. Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XI. 2016. P. 99630Q.  
<https://doi.org/10.1117/12.2238029>
13. Medvedskaya P., Lyatun I., Shevyrtalov S., Polikarpov M., Snigireva I., Yunkin V., Snigirev A. // Opt. Express. 2020. V. 28. № 4. P. 4773.  
<https://doi.org/10.1364/OE.384647>
14. Brogden V., Johnson C., Rue C., Graham J., Langworthy K., Golledge J., McMorran B. // Adv. Mater. Sci. Engin. 2021. V. 2021. P. 8842777.  
<https://doi.org/10.1155/2021/8842777>
15. Burnett T., Kelley R., Winiarski B., Contreras L., Daly M., Gholinia A., Burke M.G., Withers P.J. // Ultramicroscopy. 2016. V. 161. P. 119.  
<https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2015.11.001>
16. Fu J., Joshi S. B., Catchmark J.M. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2008. V. 26. № 3. P. 422.  
<https://doi.org/10.1116/1.2902962>
17. Ziegler J.F. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2004. V. 219. P. 1027.  
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.208>
18. Lyatun I., Ershov P., Snigireva I., Snigirev A. // J. Synchr. Radiat. 2020. V. 27. № 1. P. 44.  
<https://doi.org/10.1107/S1600577519015625>
19. Polikarpov M., Emerich H., Klimova N., Snigireva I., Savin V., Snigirev A. // Phys. Stat. Sol. B. 2018. V. 255. № 1. P. 1700229.  
<https://doi.org/10.1002/pssb.201700229>
20. Snigireva I., Irifune T., Shinmei T., Medvedskaya P., Shevyrtalov S., Bourenkov G., Polikarpov M., Rashchenko S., Snigirev A., Lyatun I. // Proc. SPIE. Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XVI. 2021. V. 11837. P. 8.  
<https://doi.org/10.1117/12.2594675>
21. Adams D.P., Vasile M.J., Mayer T.M., Hodges V.C. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2003. V. 21. № 6. P. 2334.  
<https://doi.org/10.1116/1.1619421>

## HIGH-RESOLUTION X-RAY MICRO-OPTICS: TECHNOLOGIES AND MATERIALS

I. Lyatun<sup>1,\*</sup>, P. Medvedskaya<sup>1</sup>, A. Korotkov<sup>1</sup>, S. Shevyrtalov<sup>1</sup>, S. Lyatun<sup>1</sup>, A. Snigirev<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>International Research Center “Coherent X-ray Optics for Megascience Facilities”,  
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041 Russia*

\*e-mail: ivanlyatun@gmail.com

The prospects for using high-resolution X-ray micro-lenses for coherent visualization tasks are discussed. Modern technologies and methods of micro-processing for the manufacture of 2D microlenses are considered using laser systems, ion-beam lithography and additive technologies as an example. The efficiency of various materials for X-ray micro-optics applications is evaluated and the time spent on manufacturing 100 nm resolution micro objectives using ion-beam lithography system is optimized.

**Keywords:** X-ray refractive micro-optics, parabolic micro-lenses, ion-beam lithography, high-resolution imaging, diamond.