

## ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

### РЕНТГЕНОВСКОЕ АЛМАЗНОЕ ФОКУСИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО НА БАЗЕ МАССИВА ИЗ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.Г. Налимов<sup>1,2</sup>, В.В. Котляр<sup>1,2</sup>, Т.В. Кононенко<sup>3,4</sup>, В.И. Конов<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,  
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,

<sup>2</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

<sup>3</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия,

<sup>4</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

#### Аннотация

В работе численно моделируется фокусировка рентгеновского излучения с энергией 9,25 кэВ (длина волны 0,134 нм) с помощью составной преломляющей линзы, каждый из элементов которой представляет собой комбинацию центральной и двух боковых полостей в алмазной пластине. Показано, что с помощью массива из 20 таких элементов можно получить фокусное пятно шириной по поперечному размеру интенсивности  $\text{FWHM} = 57$  нм. При этом ширина такой линзы равна 30 мкм, толщина алмазной пластины 2 мкм. Моделирование показало, что, увеличивая пропорционально размеры линз по всем трем осям до ширины входной апертуры 1 мм, можно ожидать увеличения ширины фокусного пятна до 1 мкм.

**Ключевые слова:** рентгеновское излучение, цилиндрическая линза, алмаз.

**Цитирование:** Налимов, А.Г. Рентгеновское алмазное фокусирующее устройство на базе массива из трехкомпонентных элементов / А.Г. Налимов, В.В. Котляр, Т.В. Кононенко, В.И. Конов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 933-940. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-933-940.

#### Введение

Рентгеновское когерентное излучение широко применяется в различных сферах микро- и нанотехнологий: микроскопии [1–3], люминесцентной томографии [4], интерферометрии [5, 6], спектроскопии [7–13], рентгеновской метрологии и т. д. Интерес к рентгеновскому излучению обусловлен возможностью глубокого проникновения излучения без повреждений материала исследований [14]. Фокусировка рентгеновского излучения является одной из основных проблем при проектировании различных устройств. Малая длина волны и малая разница в показателе преломления вакуума и любой среды, описываемая величиной, отличной от единицы в 6-м знаке, приводит к необходимости использовать различные нетривиальные решения – массивы одинаковых линз [15], линзы Кумахова, зеркала. Например, в [16] была получена фокусировка рентгеновского излучения с помощью адаптивных зеркал, кривизна которых изменялась с помощью механических и пьезо-микрораздвижателей. При этом наилучшее фокусное пятно имело ширину по поперечному размеру интенсивности  $\text{FWHM} = 127$  нм. Известны работы в области разработки рентгеновской оптики В.П. Назьмова и его соавторов [17]. В [18] фокусировку производили с помощью скрещенных наклонных микропризм, выполненных в полимере MgX5250PXR. В [18] с помощью линзы, имеющей входную апертуру  $1,5 \times 1,5$  мм, было получено фокусное пятно шириной 46,4 мкм на фокусном расстоянии 1,7 м. Однако для изготовления таких линз необходимо использовать глубокую рентгеновскую литографию, которая дает возможность создавать

рельеф с высоким аспектным соотношением в 300 единиц и более [19]. Для создания массива рефракционных или дифракционных линз перспективным материалом является алмаз, который имеет достаточно высокое соотношение между действительной и мнимой частями коэффициента преломления  $n = 1 - \delta + i\beta$  ( $\delta/\beta = 1000$  при энергии кванта 10 кэВ), сравнимое с аналогичным параметром для бериллия ( $\delta/\beta = 4000$ ). В то же время алмаз обладает целым рядом других преимуществ, включая высокую теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения и химическую инертность, что делает его особо привлекательным для высокоинтенсивных рентгеновских пучков. Изготовление цилиндрических рефракционных линз в алмазной пластине возможно методом прецизионной лазерной резки путём создания сквозных отверстий определенной формы с вертикальными стенками [20, 21]. Таким образом можно изготавливать как обычные рефракционные цилиндрические сферические линзы, так и асферические, дифракционные френелевские структуры для когерентного рентгеновского излучения. Однако метод лазерной резки не позволяет сформировать «острые» внутренние углы с радиусом закругления менее  $\sim 10$  мкм, что соответствует типичному диаметру перетяжки сфокусированного лазерного пучка. Это накладывает определенные ограничения на дизайн френелевских структур, которые предполагается реализовывать с помощью лазерной резки. Использование же простых сферических или параболических линз приводит к максимальному затуханию излучения по краям линзы и, как следствие, к ухудшению разрешающей способности линз, так как

наибольший вклад в разрешающую способность дают края линзы. В [22] использовали массив отдельных сферических линз и, постепенно увеличивая числовую апертуру линз за счет изменения размера каждой следующей линзы, численно получили фокусное пятно шириной всего 1 нм. Однако в расчете таких линз использовалось предположение о точном выполнении ломаного профиля, что при реальном производстве невозможно, так как любой метод изготовления имеет конечное разрешение. Расчет фокусного пятна производился с помощью приближения Кирхгофа [23], при этом никакие параметры расчета не описаны, что вызывает сомнения относительно справедливости расчета для линз, которые могут быть реально изготовлены.

В данной работе моделируется дифракционная линза, состоящая из трех частей, что позволяет минимизировать количество внутренних острых углов в ее контуре. При этом линза имеет уменьшенную толщину вдоль оптической оси по сравнению со стандартной параболической или сферической линзой соответствующего фокусного расстояния. Расчет прохождения излучения через линзы производился с помощью программного пакета VeamPROP, в котором реализован метод BPM (Beam Propagation method – параксиальное решение уравнения Гельмгольца для монохроматической волны). Схема рассматриваемой задачи представлена на рис. 1.

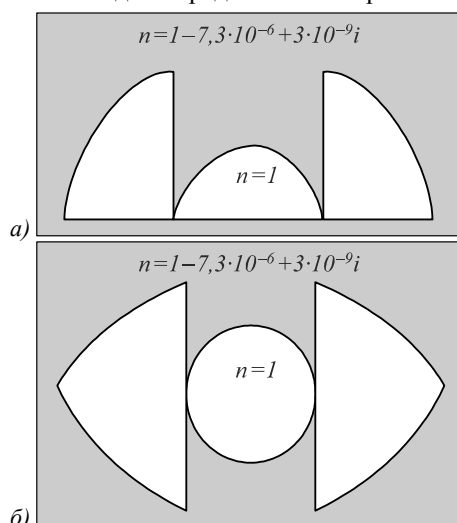


Рис. 1. Два варианта построения цилиндрической линзы

Цилиндрическая линза выполнена в пластине алмаза. Одна линза состоит из трех частей, центральной овальной части и двух боковин, по форме близких к треугольным. Задержка фазы, необходимая для фокусировки рентгеновского излучения на заданном расстоянии, соответствует таковой для линзы Френеля. Обычная линза Френеля представляет собой микро рельеф, который в местах максимальной высоты обеспечивает задержку фазы на  $\lambda$ . Для рассматриваемого случая при показателе преломления алмаза  $n = 1 - 7,3 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 10^{-9}i$  и длине волны  $\lambda = 0,134$  нм максимальная высота линзы Френеля составляет 9,6 мкм. При этом такая цилиндрическая линза, выполненная в

пленке диэлектрика, представляет собой набор отверстий сложной формы с большим количеством углов (рис. 1а). При формировании данных отверстий с помощью лазерной резки все эти углы будут неизбежно скруглены, что приведет к появлению ошибок при формировании фазы в данных областях. Тот же рельеф линзы можно сделать симметричным относительно оси X, что уменьшает число «проблемных» углов (рис. 1б). Зависимость набега фазы от радиуса в такой линзе остается прежней, однако центральная часть вообще лишается углов. Кроме того, такая линза тоньше обычной, что на краях линзы уменьшает эйконал в материале пленки и, соответственно, уменьшает потери излучения на поглощение в материале пленки. Далее приводится рассмотрение фокусировки рентгеновского излучения такой линзой вначале только центральной частью, затем линзой, состоящей из центральной и двух боковых частей.

### Фокусировка света центральной частью параболической линзы

Одним из наиболее простых в изготовлении и широко распространенных видов рентгеновских линз являются массивы цилиндрических линз. На рис. 2 представлен один из элементов такого массива линз.

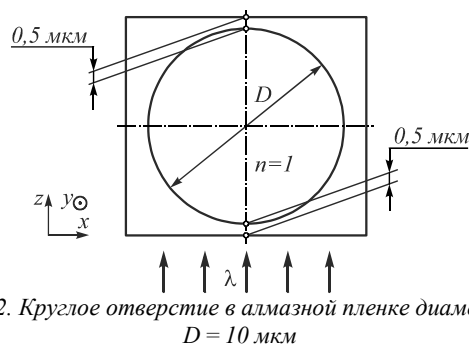


Рис. 2. Круглое отверстие в алмазной пленке диаметром  $D = 10$  мкм

В работе [24] получены результаты моделирования прохождения рентгеновского излучения через такую круглую линзу и одномерный массив из 20 линз, стоящих друг за другом вплотную вдоль оси Z. Моделирование показало, что при прохождении света через одну круглую цилиндрическую линзу диаметром  $D = 10$  мкм ширина фокального пятна по полувысоте интенсивности вдоль оси X равна  $\text{FWHM}_x = 1,53$  мкм. Толщина пленки, отсчитываемая вдоль оси Y, в которой выполнена линза, была равна  $h = 2$  мкм, а ширина фокального пятна вдоль этой оси  $\text{FWHM}_y = 8,55$  мкм. Эффективное фокусное расстояние, то есть расстояние, на котором наблюдался максимум интенсивности при моделировании распространения рентгеновского излучения через линзу, составило  $f_e = 14,4$  см, интенсивность в центре фокального пятна составила 1,1 отн. ед, то есть в 1,1 раза превышала интенсивность падающей на линзу волны. Если использовать массив из 20 таких линз, стоящих подряд, то ширина фокального пятна на оптической оси вдоль оси X составит  $\text{FWHM}_x = 0,22$  мкм, вдоль оси Y  $\text{FWHM}_y = 0,86$  мкм. Интенсивность на оптической оси в центре фокального пятна возрастёт до 44,5 отн. ед. при прочих равных условиях.

На рис. 3 представлена форма отверстия центральной части трехкомпонентной линзы. Такая линза имеет аналогичную ширину 10 мкм, расчетное фокусное расстояние  $f_0 = 28,4$  см, что дает схожее эффективное фокусное расстояние  $f_e$  с круглой цилиндрической линзой при той же толщине пленки  $h = 2$  мкм, в которой выполнена линза.

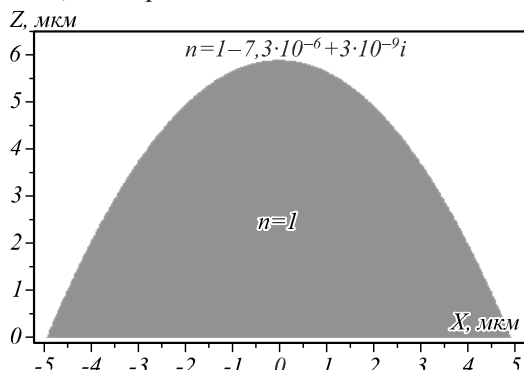


Рис. 3. Центральная часть трехсоставной параболической линзы, представляющая собой часть френелевского микрорельефа

На рис. 4 представлены результаты моделирования фокусировки рентгеновского излучения центральной частью линзы.

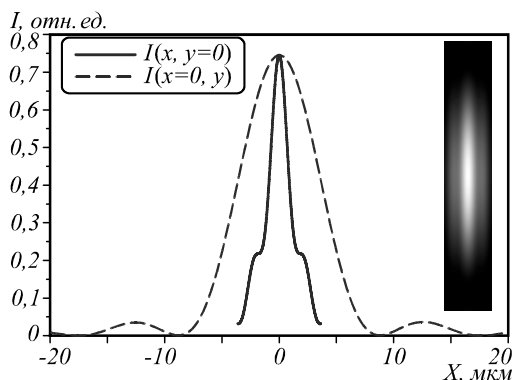


Рис. 4. Фокусное пятно, сформированное центральной частью линзы на рис. 3 (размер вставки  $7 \times 40$  мкм), и его сечения вдоль осей  $X$  и  $Y$

Линза на рис. 3 формирует фокус немного ближе (по сравнению с аналогичной по ширине круглой) – на  $f_e = 13,1$  см (против  $f_e = 14,4$  см для круглой линзы), а ширина по полуспаду интенсивности и максимальная интенсивность в фокальном пятне уступает цилиндрической линзе –  $\text{FWHM}_x = 1,95$  мкм,  $\text{FWHM}_y = 8,67$  мкм,  $I_{\text{max}} = 0,72$  отн. ед. Здесь так же, как и в работе [24], наблюдается дифракционный сдвиг фокусной плоскости, из-за которого расстояние вдоль оптической оси от линзы до точки максимума интенсивности меньше расчетного фокального расстояния  $f_e < f_0$ . Из-за слабой преломляющей способности одной линзы излучение расходится раньше, чем успевает дойти до расчетного фокусного расстояния  $f_0$ , и соответственно максимум интенсивности обнаруживается на более близком расстоянии  $f_e$ . Такой эффект известен давно [25], но именно для рентгеновского излучения с низкой числовой апертурой линзы он становится столь заметен.

Однако массив из 20 таких линз работает лучше аналогичного массива цилиндрических круглых линз. На рис. 5 представлено фокальное пятно для случая такого массива линз, представленных на рис. 3.

Из рис. 5 видно, что ширина по полувысоте интенсивности фокального пятна составляет  $\text{FWHM}_x = 0,148$  мкм,  $\text{FWHM}_y = 0,929$  мкм.

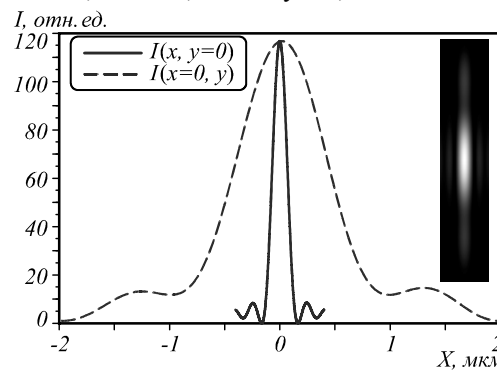


Рис. 5. Фокусное пятно (размер вставки  $0,4 \times 2$  мкм), сформированное массивом линз на рис. 3, и его сечения вдоль осей  $X$  и  $Y$

Это лучше, чем для случая использования массива круглых отверстий. Возросла и интенсивность в фокальном пятне. В этом случае она составила  $I_{\text{max}} = 116,7$  отн. ед., что лучше случая с круглыми отверстиями в 2,6 раза. Фокусное расстояние же изменилось незначительно – в случае массива из 20 параболических отверстий оно получилось  $f_e = 1,46$  см (для круглых линз оно составляло  $f_e = 1,42$  см). Таким образом, видно, что параболическая линза (рис. 3) больше подходит для использования в линзовых массивах, нежели круглая цилиндрическая линза.

#### Фокусировка света составной линзой

Можно модифицировать центральную часть линзы на рис. 3, как показано на рис. 1, и добавить две части по бокам, при этом фокусное расстояние такой линзы не изменится. Внешний вид этой линзы представлен на рис. 6.

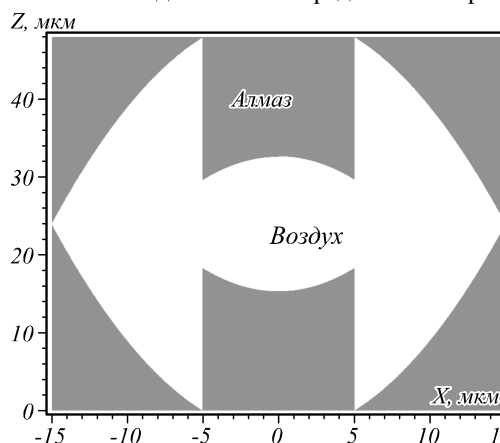


Рис. 6. Внешний вид трехсоставной цилиндрической параболической линзы, центральная часть которой эквивалентна линзе на рис. 3

Результат моделирования распространения рентгеновского излучения через линзу, приведенную на рис. 6, представлен на рис. 7.

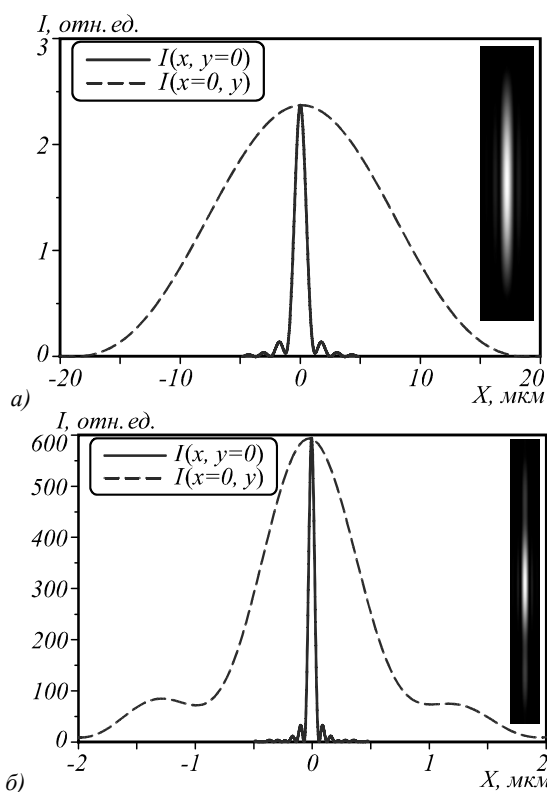


Рис. 7. Фокусные пятна, сформированные одной линзой (а), изображенной на рис. 6 (размером  $8 \times 40$  мкм), а также такими 20 линзами (б) и их сечения вдоль осей  $X$  и  $Y$

Моделирование показало, что с увеличением числовой апертуры увеличилось и расстояние, на котором обнаруживается максимум интенсивности – оно стало равно  $f_e = 27,5$  мкм. Увеличилась и ширина фокального пятна по полувысоте интенсивности вдоль оси  $Y$  до  $\text{FWHM}_y = 16,8$  мкм, при этом вдоль оси  $X$  фокусное пятно сузилось до  $\text{FWHM}_x = 1,1$  мкм.

Табл. 1. Результаты фокусировки рентгеновского излучения при пропорциональном увеличении 20 линз в массиве

$D$ , мкм	$h$ , мкм	$f_e$ , мм	$\text{FWHM}_x$ , мкм	$\text{FWHM}_y$ , мкм	$I_{\text{max}}$ , отн. ед.	$\eta$ , %
2,5	0,5	2,84	0,145	0,69	7,06	76
5	1	6,5	0,184	0,79	17,5	75
10	2	14,2	0,23	0,86	43,7	50
20	4	30,2	0,29	2,55	53,7	64
40	8	63,5	0,35	5,46	68	46
80	16	129	0,45	12,3	207	44

В табл. 1 приведены результаты моделирования распространения излучения через такой массив линз. В результате моделирования были получены фокусное расстояние  $f_e$ , ширина по полувысоте интенсивности фокального пятна на фокусном расстоянии, максимальная интенсивность в центре фокального пятна (начальная интенсивность везде одинакова и равна 1 отн. ед.), а также эффективность фокусировки рентгеновского излучения  $\eta$ . Может показаться, что следовало пропорционально увеличивать линзу только вдоль осей  $X$  и  $Z$ , не трогая толщину пленки. Однако, как мы видели при моделировании одиночных линз, эффективное фокусное расстояние, которое может быть получено при моделировании, может быть существенно меньше расчетного. Например,

Если же взять 20 таких линз подряд, то расхождение излучения вдоль оси  $Y$  становится схожим с предыдущими вариантами линз –  $\text{FWHM}_y = 0,931$  мкм.

А вдоль оси  $X$  формируется намного более узкий фокус –  $\text{FWHM}_x = 0,057$  мкм. Заметим, что такая линза короче традиционной (с непрерывным рельефом) приблизительно на 13,5%, что уменьшает потери рентгеновского излучения в алмазе по ее краям. Интенсивность в центре при этом становится равна  $I_{\text{max}} = 593$  отн. ед.

#### Пропорциональное увеличение размеров линзы

Расчет задачи дифракции рентгеновского излучения на линзах и линзовых массивах является вычислительно сложной задачей. Например, расчет прохождения рентгеновского излучения через линзу, представленную на рис. 6 с помощью метода BPM, зависит от сетки разбиения и для приемлемого расчета (когда дальнейшее увеличение разбиения не приводит к изменению результата) составляет около 30 часов (компьютер на базе 2-х CPU Xeon E5-2699 v4). Создание линз на основе тонких алмазных пластин ( $< 100$  мкм) и их дальнейшее использование затруднительно в связи с их малой механической прочностью. Размер линз в плоскости  $XZ$  также должен быть больше нескольких сотен микрон, чтобы существенно превышать диаметр перетяжки сфокусированного рентгеновского пучка. Поэтому актуальным является предсказание работоспособности линз и их характеристик для такого размера.

В табл. 1 показаны результаты моделирования линз при их пропорциональном увеличении по всем трем координатам в пространстве.

В качестве линзы для упрощения расчетов взята цилиндрическая круглая линза диаметром  $D$  (рис. 2), выполненная в алмазной пленке толщиной  $h$ , из которой составлен массив 20 шт. вдоль оптической оси.

линза на рис. 3 формирует фокальное пятно на расстоянии в 8,9 раза ближе, чем 20 таких же линз в массиве, из-за эффекта дифракционного сдвига изображения [25]. Это из-за того, что излучение успевает начать расходиться раньше, чем сформируется фокус. Этот эффект может помешать проводить анализ при пропорциональном увеличении размеров линз, если толщину пленки оставлять без изменений. Кроме того, он не влияет на результаты при коротких фокусных расстояниях, которые достигаются использованием массива линз. Из табл. 1 можно сделать следующие выводы. Фокусное расстояние увеличивается линейно с ростом размера линз. Ширина по полувысоте интенсивности  $\text{FWHM}_x$  вдоль оси  $X$  увеличивается приблизительно в 2 раза при увеличении размера

линз в 8 раз. Это значит, что, увеличивая линзы на рис. 6 до поперечного размера вдоль оси X в 1 мкм, можно ожидать увеличения ширины фокального пятна вдоль оси X FWHMx примерно до 1 мкм. Исследуемые линзы цилиндрические, они не фокусируют излучение вдоль оси Y. Поэтому изменение интенсивности вдоль этой оси связано с волновым эффектом – многократным отражением пучка от стенок пленки. С увеличением толщины пленки данный эффект ослабевает и перестает формироваться четкий фокус вдоль этой оси, фокальное пятно распадается на отдельные максимумы и минимумы ( $D=40$  и  $80$  мкм в табл. 1), что проиллюстрировано на рис. 8. При необходимости фокусировки излучения вдоль оси Y следует использовать дополнительную оптику, например, еще одну цилиндрическую линзу. Порядок эффективности фокусировки с ростом размеров линз не изменяется, хотя и варьируется в пределах 40 %.



Рис. 8. Распределение интенсивности в фокальной плоскости для линз с диаметром  $D=40$  мкм из табл. 1.

Размер изображения  $1,6 \times 10,66$  мкм.  
(изображение повернуто вправо на 90°)

### Заключение

В работе на примере алмаза численно показано, что, используя массивы составных линз с увеличенной апертурой и модифицированным френелевским профилем, можно достичь более острой фокусировки и большей интенсивности в фокусном пятне. В сравнении с круглыми цилиндрическими линзами при том же их количестве 20 шт. рассматриваемый массив линз формирует более острое фокальное пятно (FWHMx=0,057 мкм против 0,22 мкм у круглых линз) и большую интенсивность в фокальном пятне ( $I_{\max}=593$  отн. ед против 44,5 у круглых линз). Числовая апертура такой линзы больше за счет большей ширины, однако даже её центральная часть показывает лучшие результаты при использовании в массиве (FWHMx=0,148 мкм,  $I_{\max}=116,7$  отн. ед. при одинаковой ширине линз и примерно равным фокусным расстоянием), но худшие при использовании в единственном экземпляре. В отличие от круглой линзы предлагаемые составные параболические линзы имеют острые внутренние углы, но в отличие от френелевского профиля линзы их количество сведено к минимуму. Это позволяет минимизировать искажение рельефа при формировании линзы методом лазерной абляции (круглый лазерный пучок не может точно сформировать острый угол).

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 14-22-00243).

### Литература

1. **Kimura, T.** Coherent X-ray zoom condenser lens for diffractive and scanning microscopy / T. Kimura, S. Matsuyama,

- K. Yamauchi, Y. Nishino // Optics Express. – 2013. – Vol. 21, Issue 8. – P. 9267-9276. – DOI: 10.1364/OE.21.009267.
2. **Vagovič, P.** Laboratory-based multi-modal X-ray microscopy and micro-CT with Bragg magnifiers / P. Vagovič, D. Korytár, A. Cecilia, E. Hamann, T. Baumbach, D. Pelliccia // Optics Express. – 2015. – Vol. 23, Issue 14. – P. 18391-18400. – DOI: 10.1364/OE.23.018391.
3. **Yang, Y.** Contrast transfer functions for Zernike phase contrast in full-field transmission hard X-ray microscopy / Y. Yang, Y. Cheng, R. Heine, T. Baumbach // Optics Express. – 2016. – Vol. 24, Issue 6. – P. 6063-6070. – DOI: 10.1364/OE.24.006063.
4. **Zhang, W.** Multiple pinhole collimator based X-ray luminescence computed tomography / W. Zhang, D. Zhu, M. Lun, C. Li // Biomedical Optics Express. – 2016. – Vol. 7, Issue 7. – P. 2506-2523. – DOI: 10.1364/BOE.7.002506.
5. **Vegso, K.** The dynamical structural changes in polymers induced by laser irradiation studied by spectrum-tuned 4D X-ray phase tomography based on X-ray Talbot interferometry / K. Vegso, H. Takano, Y. Wu, M. Hoshino, H. Han, Y. Sharma, A. Momose // JSAP-OSA Joint Symposia 2017 Abstracts. – 2017. – 8P\_A410\_4.
6. **Kayser, Y.** Wavefront metrology measurements at SACL by means of X-ray grating interferometry / Y. Kayser, S. Rutishauser, T. Katayama, H. Ohashi, T. Kameshima, U. Flechsig, M. Yabashi, C. David // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, Issue 8. – P. 9004-9015. – DOI: 10.1364/OE.22.009004.
7. **Burkel, E.** Phonon spectroscopy by inelastic x-ray scattering / E. Burkel // Reports on Progress in Physics. – 2000. – Vol. 63, Issue 2. – P. 171-232. – DOI: 10.1088/0034-4885/63/2/203.
8. **Sinn, H.** Spectroscopy with meV energy resolution / H. Sinn // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2001. – Vol. 13, Issue 24. – P. 7525-7537. – DOI: 10.1088/0953-8984/13/34/305.
9. **Krisch, M.** Inelastic X-ray scattering from phonons / M. Krisch, F. Sette. – In: Light scattering in Solids IX / ed. by M. Cardona, R. Merlin. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. – P. 317-370. – DOI: 10.1007/978-3-540-34436-0\_5.
10. **Gerdau, E.** Nuclear resonant scattering of synchrotron radiation / E. Gerdau, H. deWaard // Hyperfine Interactions. – 1999. – Vol. 123-124, Issues 1-4. – P. 0-0 (Preface). – DOI: 10.1023/A:1017073002352.
11. **Röhlsberger, R.** Nuclear condensed matter physics with synchrotron radiation: Basic principles, methodology and applications / R. Röhlsberger. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. – 320 p. – ISBN: 978-3-540-23244-5.
12. **Arias, C.** X-ray fluorescence analysis and self-organizing maps classification of the Etruscan gold coin collection at the Monetiére of Florence / C. Arias, S. Bani, F. Catali, G. Lorenzetti, E. Grifoni, S. Legnaioli, S. Pagnotta, V. Palleschi // Applied Spectroscopy. – 2016. – Vol. 71, Issue 5. – P. 817-822. – DOI: 10.1177/0003702816641421.
13. **Dwyer, J.R.** Through a window, brightly: A review of selected nanofabricated thin-film platforms for spectroscopy, imaging, and detection / J.R. Dwyer, M. Harb // Applied Spectroscopy. – 2017. – Vol. 71, Issue 9. – P. 2051-2075. – DOI: 10.1177/0003702817715496.
14. **Alekhin, M.S.** Stimulated scintillation emission depletion X-ray imaging / M.S. Alekhin, G. Patton, C. Dujardin, P.-A. Douissard, M. Lebugle, L. Novotny, M. Stampanoni // Optics Express. – 2017. – Vol. 25, Issue 2. – P. 654-669. – DOI: 10.1364/OE.25.000654.
15. **Polikarpov, M.** Diamond X-ray refractive lenses produced by femto-second laser ablation / M. Polikarpov, T.V. Kononenko, V.G. Ralchenko, E.E. Ashkinazi, V.I. Konov, P. Ershov, S. Kuznetsov, V. Yunkin, I. Snigireva, V.M. Polikarpov, A. Snigirev // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 9963. – 99630Q. – DOI: 10.1117/12.2238029.
16. **Goto, T.** Nearly diffraction-limited hard X-ray line focusing with hybrid adaptive X-ray mirror based on mechanical and pi-

- ezo-driven deformation / T. Goto, S. Matsuyama, H. Hayashi, H. Yamaguchi, J. Sonoyama, K. Akiyama, H. Nakamori, Y. Sano, Y. Kohmura, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26, Issue 13. – P. 17477-17486. – DOI: 10.1364/OE.26.017477.
17. **Назьмов, В.П.** Литографическая широкоапертурная рефракционная рентгеновская оптика : дисс. ... доктора физ.-мат. наук : 01.04.01 / Назьмов Владимир Петрович. – Новосибирск, 2018.
  18. **Nazmov, V.** Large-aperture two-dimensional X-ray refractive mosaic lenses / V. Nazmov, E. Reznikova, J. Mohr, V. Saile, H. Tajiri, A. Voigt // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, Issue 25. – P. 7138-7141. – DOI: 10.1364/ao.55.007138.
  19. **Nazmov, V.** Development and characterization of ultra-high aspect ratio microstructures made by ultra-deep X-ray lithography / V. Nazmov, E. Reznikova, J. Mohr, J. Schulz, A. Voigt // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – Vol. 225. – P. 170-177. – DOI: 10.1016/j.jmatprot.2015.05.030.
  20. **Polikarpov, M.** Large-acceptance diamond planar refractive lenses manufactured by laser cutting / M. Polikarpov, I. Snigireva, J. Morse, V. Yunkin, S. Kuznetsov, A. Snigirev // *Journal of Synchrotron Radiation*. – 2015. – Vol. 22, Issue 1. – P. 23-28. – DOI: 10.1107/S1600577514021742.
  21. **Kononenko, T.V.** Fabrication of polycrystalline diamond refractive X-ray lens by femtosecond laser processing / T.V. Kononenko, V.G. Ralchenko, E.E. Ashkinazi, M. Polikarpov, P. Ershov, S. Kuznetsov, V. Yunkin, I. Snigireva, V.I. Konov // *Applied Physics A*. – 2016. – Vol. 122. – 152 (6 p.). – DOI: 10.1007/s00339-016-9683-9.
  22. **Chen, Z.** Toward one nanometer X-ray focusing: a complex refractive lens design / Z. Chen, H. Xie, B. Deng, G. Du, H. Jiang, T. Xiao // *Chinese Optics Letters*. – 2014. – Vol. 12, Issue 12. – 123401. – DOI: 10.3788/COL201412.123401.
  23. **Born, M.** Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light / M. Born, E. Wolf. – 7<sup>th</sup> ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 1999. – 952 p. – ISBN: 978-0-521-64222-4.
  24. **Налимов, А.Г.** Моделирование фокусировки жёсткого рентгеновского излучения последовательностью цилиндрических отверстий в алмазной плёнке / А.Г. Налимов, В.В. Котляр, В.И. Конов // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 796-802. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-796-802.
  25. Li, Y. A High-accuracy Formula for Fast Evaluation of the Effect of Focal Shift / Y. Li // *Journal of Modern Optics*, 1999. – V. 38, No. 9. – P. 1815–1819. doi:10.1080/09500349114551921.

### Сведения об авторах

**Налимов Антон Геннадьевич**, 1980 года рождения, окончил Самарский государственный аэрокосмический университет в феврале 2003 года по специальности «Физика». Поступил в очную аспирантуру СГАУ по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в 2003 году, окончил её по специальности 01.04.05 «Оптика» в 2006 году. Работает на кафедре технической кибернетики в Самарском университете в должности доцента, в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 130 работ и 3 патентов. E-mail: [anton@smr.ru](mailto:anton@smr.ru).

**Котляр Виктор Викторович**, 1957 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и по совместительству профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета. В 1979 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1988 году защитил кандидатскую диссертацию в Саратовском государственном университете, а в 1992 году – докторскую диссертацию в Центральном конструкторском бюро Уникального приборостроения РАН (г. Москва). Область научных интересов: нанофотоника, дифракционная компьютерная оптика. Публикации: 300 научных трудов, 5 монографий, 7 авторских свидетельств. E-mail: [kotlyar@smr.ru](mailto:kotlyar@smr.ru).

**Кононенко Тарас Викторович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела светоиндуцированных поверхностных явлений Центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Область научных интересов: лазерное взаимодействие с веществом; физика плазмы; лазерная обработка материалов. E-mail: [kononen@nsc.gpi.ru](mailto:kononen@nsc.gpi.ru).

**Конов Виталий Иванович**, 1945 года рождения, академик РАН, руководитель Центра естественно-научных исследований Института общей физики РАН, профессор кафедры общей физики МГУ, специалист в области лазерной физики, автор более 400 научных работ, 3 монографий и 12 изобретений. Область научных интересов: создание и исследование оптических компонент на основе поликристаллических алмазных пленок. E-mail: [vik@nsc.gpi.ru](mailto:vik@nsc.gpi.ru).

ГРНТИ: 29.31.15.

Поступила в редакцию 25 октября 2018 г. Окончательный вариант – 21 ноября 2018 г.

## AN X-RAY DIAMOND FOCUSER BASED ON AN ARRAY OF THREE-COMPONENT ELEMENTS

A.G. Nalimov<sup>1,2</sup>, V.V. Kotlyar<sup>1,2</sup>, T.V. Kononenko<sup>3,4</sup>, V.I. Konov<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University, 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse 34,

<sup>2</sup> IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

<sup>3</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,

<sup>4</sup> National Research Nuclear University „MEPhI“, Moscow, Russia

### Abstract

The use of a compound refractive lens fabricated of a thin diamond plate is considered for focusing hard 9.25 keV X-rays. Each element of the diamond lens consists of a central cavity and two side cavities in the diamond plate. It is shown numerically that an array of 20 such elements is

able to produce a focal spot of width FWHM = 57 nm. The lens aperture size is 30  $\mu\text{m}$  and the diamond plate thickness is 2  $\mu\text{m}$ . The simulation shows that by proportionally increasing the dimensions of the lenses on all three axes, bringing the input pupil size to 1  $\mu\text{m}$ , the X-ray focal spot width can be increased to 1  $\mu\text{m}$  using the same lens array.

**Keywords:** X-ray radiation, cylindrical lens, diamond.

**Citation:** Nalimov AG, Kotlyar VV, Kononenko TV, Konov VI. An X-ray diamond focuser based on an array of three-component elements. *Computer Optics* 2018; 42(6): 933-940. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-933-940.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 14-22-00243).

### References

- [1] Kimura T, Matsuyama S, Yamauchi K, Nishino Y. Coherent X-ray zoom condenser lens for diffractive and scanning microscopy. *Opt Express* 2013; 21(8): 9267-9276. DOI: 10.1364/OE.21.009267.
- [2] Vagovič P, Korytár D, Cecilia A, Hamann E, Baumbach T, Pelliccia D. Laboratory-based multi-modal X-ray microscopy and micro-CT with Bragg magnifiers. *Opt Express* 2015; 23(14): 18391-18400.
- [3] Yang Y, Cheng Y, Heine R, Baumbach T. Contrast transfer functions for Zernike phase contrast in full-field transmission hard X-ray microscopy. *Opt Express* 2016; 24(6): 6063-6070. DOI: 10.1364/OE.24.006063.
- [4] Zhang W, Zhu D, Lun M, Li C. Multiple pinhole collimator based X-ray luminescence computed tomography. *Biomed Opt Express* 2016; 7(7): 2506-2523. DOI: 10.1364/BOE.7.002506.
- [5] Vegso K, Takano H, Wu Y, Hoshino M, Han H, Sharma Y, Momose A. The dynamical structural changes in polymers induced by laser irradiation studied by spectrum-tuned 4D X-ray phase tomography based on X-ray Talbot interferometry. *JSAP-OSA Joint Symposia Abstracts* 2017: 8P\_A410\_4.
- [6] Kayser Y, Rutishauser S, Katayama T, Ohashi H, Kameshima T, Flechsig U, Yabashi M, David C. Wavefront metrology measurements at SACLA by means of X-ray grating interferometry. *Opt Express* 2014; 22(8): 9004-9015. DOI: 10.1364/OE.22.009004.
- [7] Burkel E. Phonon spectroscopy by inelastic x-ray scattering. *Rep Prog Phys* 2000; 63(2): 171-232. DOI: 10.1088/0034-4885/63/2/203.
- [8] Sinn H. Spectroscopy with meV energy resolution. *J Phys Condens Matter* 2001; 13(24): 7525-7537. DOI: 10.1088/0953-8984/13/34/305.
- [9] Krisch M, Sette F. Inelastic X-Ray Scattering from Phonons. In Book: Cardona M, Merlin R, eds. *Light scattering in Solids IX*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2007: 317-370. DOI: 10.1007/978-3-540-34436-0\_5.
- [10] Gerdaud E, deWaard H. Nuclear resonant scattering of synchrotron radiation. *Hyperfine Interactions* 1999; 123-124(1-4): Preface. DOI: 10.1023/A:1017073002352.
- [11] Röhlberger R. Nuclear condensed matter physics with synchrotron radiation: Basic principles, methodology and applications. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2004. ISBN: 978-3-540-23244-5.
- [12] Arias C, Bani S, Catalli F, Lorenzetti G, Grifoni E, Legnaioli S, Pagnotta S, Palleschi V. X-ray fluorescence analysis and self-organizing maps classification of the Etruscan gold coin collection at the Monetiere of Florence. *Appl Spectrosc* 2016; 71(5): 817-822. DOI: 10.1177/0003702816641421.
- [13] Dwyer JR, Harb M. Through a window, brightly: A review of selected nanofabricated thin-film platforms for spectroscopy, imaging, and detection. *Appl Spectrosc* 2017; 71(9): 2051-2075. DOI: 10.1177/0003702817715496.
- [14] Alekhin MS, Patton G, Dujardin C, Douissard P-A, Lebugle M, Novotny L, Stampanoni M. Stimulated scintillation emission depletion X-ray imaging. *Opt Express* 2017; 25(2): 654-669. DOI: 10.1364/OE.25.000654.
- [15] Polikarpov M, Kononenko TV, Ralchenko VG, Ashkinazi EE, Konov VI, Ershov P., Kuznetsov S, Yunkin V, Snigireva I, Polikarpov VM, Snigirev A. Diamond X-ray refractive lenses produced by femto-second laser ablation. *Proc SPIE* 2016; 9963: 99630Q. DOI: 10.1117/12.2238029.
- [16] Goto T, Matsuyama S, Hayashi H, Yamaguchi H, Sonoyama J, Akiyama K, Nakamori H, Sano Y, Kohmura Y, Yabashi M, Ishikawa T, Yamauchi K. Nearly diffraction-limited hard X-ray line focusing with hybrid adaptive X-ray mirror based on mechanical and piezo-driven deformation. *Opt Express* 2018; 26(13): 17477-17486. DOI: 10.1364/OE.26.017477.
- [17] Nazmov VP. *Lithographic wide-aperture X-ray optics*. PhD Thesis. Novosibirsk: 2018.
- [18] Nazmov V, Reznikova E, Mohr J, Saile V, Tajiri H, Voigt A. Large-aperture two-dimensional X-ray refractive mosaic lenses. *Appl Opt* 2016; 55(25): 7138-7141. DOI: 10.1364/ao.55.007138.
- [19] Nazmov V, Reznikova E, Mohr J, Schulz J, Voigt A. Development and characterization of ultra-high aspect ratio microstructures made by ultra-deep X-ray lithography. *J Mater Process Technol* 2015; 225: 170-177. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.05.030.
- [20] Polikarpov M, Snigireva I, Morse J, Yunkin V, Kuznetsov S, Snigirev A. Large-acceptance diamond planar refractive lenses manufactured by laser cutting. *J Synchrotron Radiat* 2015; 22(1): 23-28. DOI: 10.1107/S1600577514021742.
- [21] Kononenko TV, Ralchenko VG, Ashkinazi EE, Polikarpov M, Ershov P, Kuznetsov S, Yunkin V, Snigireva I, Konov VI. Fabrication of polycrystalline diamond refractive X-ray lens by femtosecond laser processing. *Appl Phys A* 2016; 122: 152. DOI: 10.1007/s00339-016-9683-9.
- [22] Chen Z, Xie H, Deng B, Du G, Jiang H, Xiao T. Toward one nanometer X-ray focusing: a complex refractive lens design. *Chinese Optics Letters* 2014; 12(12): 123401.
- [23] Born M, Wolf E. *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 7<sup>th</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press; 1999. ISBN: 978-0-521-64222-4.
- [24] Nalimov AG, Kotlyar VV, Konov VI. Simulation of hard x-ray focusing using an array of cylindrical micro-holes in a diamond film [In Russian]. *Computer Optics* 2017; 41(6): 796-802. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-796-802.
- [25] Li Y. A High-accuracy Formula for Fast Evaluation of the Effect of Focal Shift. *Journal of Modern Optics* 1999; 38(9): 1815-9.

**Authors' information**

**Anton Gennadyevich Nalimov** (b. 1980), graduated from Samara State Aerospace University in February, 2003. Entered in postgraduate study in 2003 on speciality 05.13.18 “Mathematical Modeling and Program Complexes”, finished it in 2006 with speciality 01.04.05 “Optics”. A.G. Nalimov works on Technical Cybernetics department in Samara National Research University as an associate professor, works as a scientist in the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Candidate in Physics and Mathematics, coauthor of 130 papers and 3 inventions. Email: [anton@smr.ru](mailto:anton@smr.ru).

**Victor Victorovich Kotlyar** is a head of Laboratory at the Image Processing Systems Institute (Samara) of the Russian Academy of Sciences – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS and professor of Computer Science department at Samara National Research University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in Physics and Mathematics from Samara State University (1979), Saratov State University (1988) and Moscow Central Design Institute of Unique Instrumentation, the Russian Academy of Sciences (1992). He is SPIE- and OSA-member. He is coauthor of 300 scientific papers, 5 books and 7 inventions. His current interests are diffractive optics, gradient optics, nanophotonics, and optical vortices. E-mail: [kotlyar@smr.ru](mailto:kotlyar@smr.ru).

**Taras Viktorovich Kononenko**, Doctor of Philosophy, senior research scientist of Laser Induced Surface Phenomena department, Natural Sciences Center of General Physics Institute, Moscow, Russia. Research interests: laser interaction with matter; plasma physics; laser materials processing. E-mail: [kononen@nsc.gpi.ru](mailto:kononen@nsc.gpi.ru).

**Vitaly Ivanovich Konov** ( b. 1945), academician of the Russian Academy of Sciences, the head of the Natural Sciences Studies Center of the Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences, Professor of the General Physics department of the Moscow State University, an expert in laser physics, the author of more than 400 scientific papers, 3 monographs and 12 inventions. Research interests: creation and investigation of optical components based on polycrystalline diamond films. E-mail: [vik@nsc.gpi.ru](mailto:vik@nsc.gpi.ru).

---

*Received October 25, 2018. The final version – November 21, 2018.*

---