

КОМБИНИРОВАННЫЕ ЗОННЫЕ ПЛАСТИНКИ В КАЧЕСТВЕ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ ОПТИКИ ДЛЯ ЖЁСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Налимов А.Г., Котляр В.В.

Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

Аннотация

С помощью интеграла Рэлея–Зоммерфельда проведено моделирование построения изображения в жёстком когерентном рентгеновском излучении (длина волны 0,229 нм) с помощью комбинированной зонной пластинки. Моделирование показало возможность улучшения разрешения по отношению к традиционной зонной пластинке Френеля почти в 10 раз (и равно 20 нм) без изменения ширины крайней зоны (205 нм). Комбинированная зонная пластинка состояла из 6 областей, работающих в 1-м, 3-м, 5-м, 7-м, 9-м и 11-м порядках дифракции. При этом энергетическая эффективность построения изображений такой комбинированной зонной пластинкой составляет 3,7%, что на 42% больше, чем эффективность традиционной зонной пластинки Френеля (2,6%), работающей в третьем порядке дифракции и улучшающей разрешение только в 3 раза.

Ключевые слова: комбинированная зонная пластинка, многопорядковая дифракция, рентгеновское излучение.

Введение

Зонные пластинки (ЗП) Френеля широко используются в рентгеновской микроскопии [1–4]. Использование ЗП Френеля в изображающей оптике обусловлено простотой изготовления, а также необходимостью применять тонкие оптические элементы из-за значительного поглощения жёсткого рентгеновского излучения в большинстве материалов. Толщина ЗП ограничена лишь необходимой толщиной материала, создающего разницу в набеге фазы на π между зонами, а также толщиной подложки, достаточной для обеспечения необходимой механической прочности ЗП. Разрешение построения изображения зонной пластинкой, работающей в первом прошедшем порядке дифракции, определяется шириной её крайней зоны. Например, авторы в [2] экспериментально смогли разрешить линии вплоть до 38 нм шириной с помощью оптической системы, состоящей из двух зонных пластинок. Ширина крайней зоны ЗП, используемой в качестве объектива, была равна 50 нм. В [5] приведены результаты экспериментального исследования фокусировки света одновременно двумя зонными пластинками, выполненными в золоте, ширина крайней зоны которых равна 200 нм, радиус их составил 37,75 мкм. С помощью таких зонных пластинок авторы смогли разрешить минимальную ширину линии, равную 160 нм. В [6] авторами была промоделирована возможность фокусировки жёсткого рентгеновского излучения зонной пластинкой с шахматным расположением зон от точечного источника. Ширина её крайней зоны была равна 350 нм, ширина фокусного пятна составила около 2 мкм. Наилучшее разрешение в рентгеновском микроскопе было экспериментально получено в [7, 8]. Зонная пластинка, имеющая ширину крайней зоны 12 нм, помогла достичь разрешения 12 нм. Из приведённых источников видно, что основной помехой к увеличению разрешения в рентгеновском изображающем микроскопе является техно-

логическая возможность создать зонную пластинку с наименьшей шириной крайней зоны. Длина волны излучения в жёстком рентгеновском диапазоне является существенно меньшей величиной (десятые доли нанометра) и не влияет на разрешающую способность ЗП. Поскольку ЗП Френеля является бинарным дифракционным оптическим элементом, наряду с фокусом в 1-м порядке дифракции, она формирует также паразитные фокусы в 3-м порядке дифракции, 5-м, 7-м и т. д. [6, 9]. Такие фокусные пятна существенно уже фокусного пятна, полученного в первом порядке дифракции [6, 8], что даёт возможность их использования для создания ЗП с большим разрешением [10]. Авторами в [10] была создана комбинированная ЗП, работающая в первом и третьем порядках дифракции, ширина крайней зоны которой была равна 50 нм, с помощью неё было получено изображение периодических линий шириной 25 нм. А в [11] авторами была изготовлена ЗП с шириной крайней зоны 100 нм. Её использование в третьем порядке дифракции в сканирующей рентгеновской микроскопии позволило разрешить отдельные линии дифракционной решётки, имеющие ширину 28,5 нм. При этом строгого моделирования построения изображения комбинированной зонной пластинкой, работающей в нескольких порядках дифракции, не проводилось.

В данной работе рассмотрена возможность использования в качестве изображающей рентгеновской оптики комбинированной зонной пластинки, работающей в нескольких порядках дифракции, для получения изображений с разрешением, существенно превышающим возможное разрешение для используемой ширины крайней зоны в первом порядке дифракции. Численное моделирование в строгом электромагнитном приближении является сложной вычислительной задачей, требующей высокопроизводительного компьютера, кластера или значительного времени для расчёта [12], и проводится редко. Моделирование

построения изображения в данной работе проводилось с помощью интеграла Рэлея–Зоммерфельда [9].

Моделирование

На рис. 1 представлена схема рассматриваемой задачи.

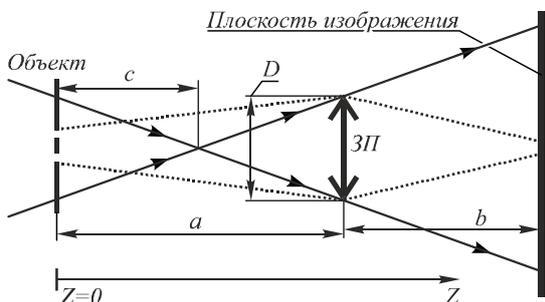


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи

Сходящийся рентгеновский пучок с длиной волны $\lambda = 0,229$ нм падает на объект, затем попадает на зонную пластинку, строящую увеличенное изображение объекта в выходной плоскости. Данная длина волны света была выбрана, так как её наиболее просто получить с помощью рентгеновской трубки с анодом из хрома. В качестве падающей на изображаемый объект волны выбрано сходящееся излучение, так как в этом случае оно успевает достаточно разойтись до плоскости изображения и наименьшим образом влияет на контрастность получаемой картинке [12]. Такой пучок рентгеновского излучения можно сформировать, например, с помощью капиллярной линзы Кумахова [13, 14], или набора сфер, стоящих на одной линии [15], или ещё одной зонной пластинкой. Параметры зонной пластинки, работающей в первом порядке дифракции, были приняты такими, чтобы ЗП можно было изготовить методом электронной литографии. Ширина крайней зоны (половина периода) была принята $\Delta r = 205$ нм. Так как рентгеновское излучение данной длины волны затухает вдвое в воздухе на расстоянии примерно 30 см, предпочтительна наименьшая длина оптической схемы и, как следствие, минимальное фокусное расстояние ЗП. При диаметре рассматриваемой ЗП $D = 200$ мкм фокусное расстояние её получается равным $f = 18$ см. В случае использования серебра в качестве материала для изготовления микрорельефа ЗП его высота должна быть равна $h = 1,7$ мкм (показатель преломления серебра на данной длине волны равен $n = 1 - 6,8 \cdot 10^{-5} + 6,8 \cdot 10^{-6}i$). В данной работе рассматривалось увеличение изображения объекта в 5 раз, таким образом, для данного фокусного расстояния параметры оптической схемы будут $a = 0,216$ м, $b = 1,08$ м. Для достаточного качества разрешения фазы падающего на ЗП поля размер отсчёта ЗП целесообразно принять 0,13 мкм, вся ЗП в этом случае будет иметь размер 1539×1539 отсчётов. Использование большего увеличения с помощью данной ЗП приведёт к удлинению всей оптической схемы, что может негативно сказаться при возможном использовании подобной оптической схемы на практике. Может показаться, что размер отсчёта 0,13 мкм

является чрезмерно большим для выполнения точных вычислений. Однако в [12] было показано, что использование отсчётов значительно больше длины волны излучения является вполне допустимым и не влияет на точность вычислений. При увеличении сетки разбиения результат расчёта не изменяется.

В качестве объекта в плоскости $Z=0$ был использован амплитудный элемент, состоящий из двух щелей в непрозрачном материале равной ширины, расстояние между которыми w равно ширине каждой щели (рис. 2а). Это эквивалентно использованию в качестве объекта для изображения дифракционной решётки, что широко применяется в других работах [7, 10, 11]. Длина щелей была взята $5w$. Расстояние, на котором рентгеновский пучок сходиллся после плоскости объекта, было принято $c = 6,6$ мм.

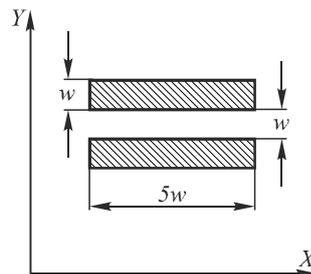


Рис. 2. Схема изображаемого объекта

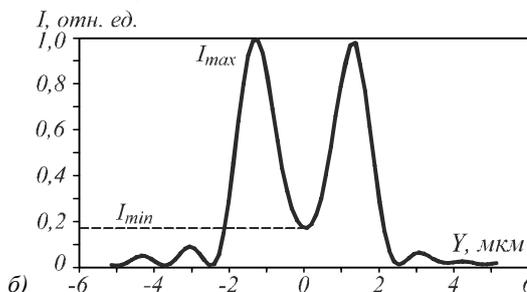
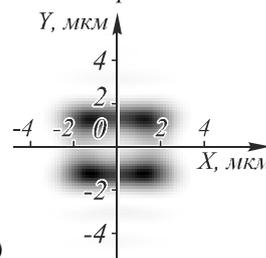


Рис. 3. Изображение объекта (интенсивность, негатив), приведённого на рис. 2, при $w = 220$ нм (а) и его сечение вдоль оси Y через центр координат (б), центр изображения совпадает с центром координат

На рис. 3 приведена интенсивность рентгеновского излучения (негатив) в плоскости изображения и его сечение через центр координат вдоль оси Y , центр координат совпадает с центром изображения. Видно, что при расстоянии между источниками излучения $w = 220$ нм они успешно разрешаются зонной пластинкой. Расстояние между пиками интенсивности на рис. 3б составляет 2,5 мкм, однако центральная часть изображения щелей, как видно из рис. 3а, имеет некоторое утонение, что в целом подтверждает увеличение ЗП в 5 раз. В качестве критерия разрешения ЗП

примем критерий Рэля, на основании которого отношение максимумов интенсивности и минимума по центру должно удовлетворять $(I_{\min}/I_{\max}) \leq 0,74$. Для рассматриваемой ЗП такой критерий выполняется при $w > 187$ нм. Эффективность построения изображения, то есть доля энергии, попавшей в изображение объекта, по отношению ко всей энергии излучения, исходящей из объекта, составляет $\eta = 23\%$. Такое высокое значение эффективности обусловлено выбранным радиусом сходимости c , при котором большая часть энергии, исходящая из объекта, попадает на апертуру зонной пластинки. В реальных экспериментах эффективность при данной схеме может быть ниже из-за дефектов при изготовлении ЗП, уменьшения высоты рельефа и т.д. Разрешение ЗП можно улучшить, если использовать её работу в более высоком порядке дифракции. Однако в фокус, формируемый ЗП в более высоком порядке, приходит существенно меньше энергии. Это негативное явление можно уменьшить, если создать ЗП, центр которой работает с большей эффективностью в первом порядке дифракции, а область, работающая в более высоком порядке дифракции и обеспечивающая большее разрешение, находится ближе к краю. Крайние зоны каждой области такой ЗП имеют равную ширину Δr . Схема ЗП, работающей в 1-м и 3-м порядках дифракции, представлена на рис. 4.

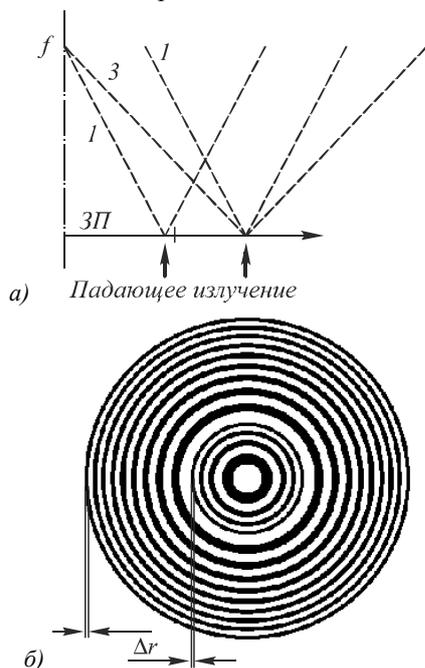


Рис. 4. Схема (а) и условный внешний вид (б) ЗП, работающей в двух порядках дифракции

Оставляя диаметр ЗП $D = 200$ мкм и ширину крайних зон $\Delta r = 205$ нм неизменными, получим фокусное расстояние двухпорядковой комбинированной ЗП $f_2 = 6$ см, соответственно $a_2 = 7,2$ см, $b_2 = 0,36$ м, $c_2 = 2,2$ мм. В этом случае выполнение критерия Рэля достигается при $w > 68$ нм, а эффективность построения изображения в этом случае составляет $\eta = 15\%$. Если использовать в третьем порядке дифракции тра-

диционную некомбинированную ЗП, то при тех же параметрах $a, b, c, D, \Delta r$ эффективность такой фокусировки составила бы $\eta = 2,6\%$. При этом было бы возможно разрешить по критерию Рэля линии с $w > 61$ нм. Эти результаты согласуются с полученными экспериментальными данными о разрешении и эффективности ЗП, используемой в третьем порядке дифракции в [11]. Авторы в [11] экспериментально продемонстрировали возможность разрешать линии в сканирующей рентгеновской микроскопии, имеющие ширину 26–28,5 нм. Они также использовали второй фокус ЗП (ширина крайней зоны – 100 нм), при этом эффективность фокусировки света у них составила 2,2%.

Как видно из результатов моделирования, добавление к ЗП области, работающей в третьем порядке дифракции, значительно (в 5,7 раз) улучшает эффективность построения изображения, не намного уступая при этом в разрешении по сравнению с использованием традиционной ЗП в третьем порядке дифракции, и почти вдвое улучшает разрешение, оставляя ширину крайней зоны Δr неизменной по сравнению с традиционной ЗП Френеля. Дальнейшее увеличение количества областей ЗП, работающих в высших порядках дифракции, приводит к ещё большему росту разрешения.

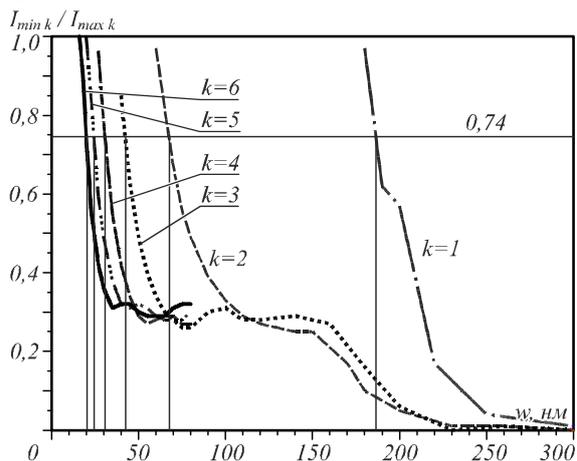


Рис. 5. Зависимость отношения интенсивностей $I_{\min k}/I_{\max k}$, характеризующие разрешение ЗП, от ширины линий w для различного количества областей ЗП k

На рис. 5 показаны графики зависимости отношения $I_{\min k}/I_{\max k}$, характеризующие разрешение оптической схемы, от ширины линий и расстояния между ними w (рис. 2) для количества областей k от 1 до 6 (крайняя область ЗП при этом направляет излучение в фокус в 1-м, 3-м, 5-м, 7-м, 9-м, 11-м порядках дифракции). Для получения этих данных при моделировании разрешение рентгеновского поля в области ЗП было увеличено до 6667×6667 отсчётов. Значения $I_{\min k}$ и $I_{\max k}$ определяются для области k аналогично тому, как показано на рис. 3. Крайние зоны каждой области комбинированной ЗП имеют ту же ширину $\Delta r = 205$ нм. Видно, что с увеличением количества областей разрешение такой ЗП увеличивается и при 6 используемых областях становится возможным разрешить по критерию

Рэлея линии шириной $w > 20$ нм. Также из рис. 5 видно, что при использовании комбинированных ЗП микроконтраст изображений (скорость падения величины $I_{\min k}/I_{\max k}$ с увеличением w) несколько меньше, чем у однопорядковой ЗП. Отметим, что при реальном изготовлении такой ЗП средняя точность позиционирования элементов микрорельефа должна быть выше, чем для однопорядкового элемента с той же шириной крайней зоны. В частности, для ЗП, использующей на краю 11-й порядок дифракции, изменение всего радиуса ЗП на 19 нм приведёт к тому, что крайняя область будет работать в противофазе с центральной и станет бесполезна, так как если бы ЗП имела одну область, работающую в 1-м порядке дифракции, то при том же фокусном расстоянии, как для ЗП с $k=6$, ширина крайней зоны должна быть равна 19 нм. При этом локальные ошибки не так важны, и размер отсчёта в 30 нм, из которых сформирован микрорельеф рассматриваемых ЗП, вполне допустим.

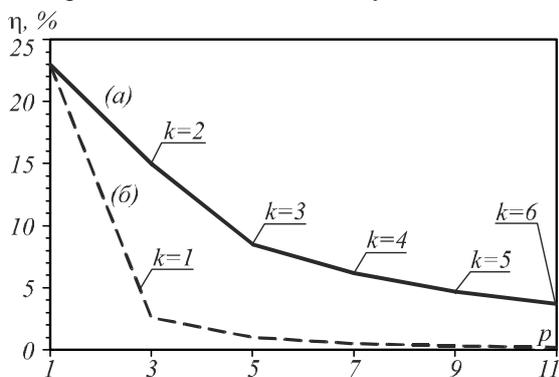


Рис. 6. Зависимость эффективности формирования изображения η от количества используемых областей (а) в комбинированной ЗП с используемым порядком дифракции в крайней области p ; и зависимость эффективности формирования изображения η от используемого порядка дифракции p в традиционной ЗП (б)

На рис. 6а приведена эффективность формирования изображения η с помощью комбинированных зонных пластинок, у которых крайняя область рассчитана на 3-й (2-я область), 5-й (3-я область), ..., 11-й (6-я область) порядок дифракции. График на рис. 6б отображает эффективность при использовании в тех же порядках дифракции традиционной ЗП, рассчитанной на работу в одном порядке. Из графиков видно, что даже при использовании некомбинированной ЗП в 3-м порядке дифракции её эффективность ($\eta = 2,6\%$) будет ниже всех рассмотренных комбинированных ЗП. ЗП, крайняя (6-я) область которой рассчитана на работу в 11-м порядке, имеет эффективность 3,7%. Изображение объекта с $w = 20$ нм с помощью такой комбинированной ЗП приведено на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что несмотря на то, что отношение $I_{\min k}/I_{\max k} = 0,74$ при $w = 0,02$ для $k = 6$ (рис. 5), изображение объекта удовлетворительно разрешается зрительно и по критерию Рэлея, и паразитных осцилляций яркости вблизи объекта не наблюдается.

Поскольку использование в работе 11-го порядка дифракции существенно увеличивает апертуру ЗП, может показаться, что наклон лучей, исходящих из зон на краю элемента, может приводить к значительному перекрытию этих лучей стенками колец ЗП. При использовании ЗП, крайняя зона которой работает в 11-м порядке дифракции, параметры оптической схемы $a = 19$ мм, $b = 90$ мм (рис. 1). При неизменном диаметре $D = 200$ мкм угол наклона к нормали лучей, падающих на крайние зоны (для расстояния a), равен приблизительно $\vartheta = 0,3^\circ$. При данных параметрах ЗП это влечёт перекрытие зон приблизительно на 9 нм. Размер пикселя, из которых составляется рельеф ЗП при этих параметрах, равен 30 нм, то есть точность задания колец ЗП намного ниже изначально.

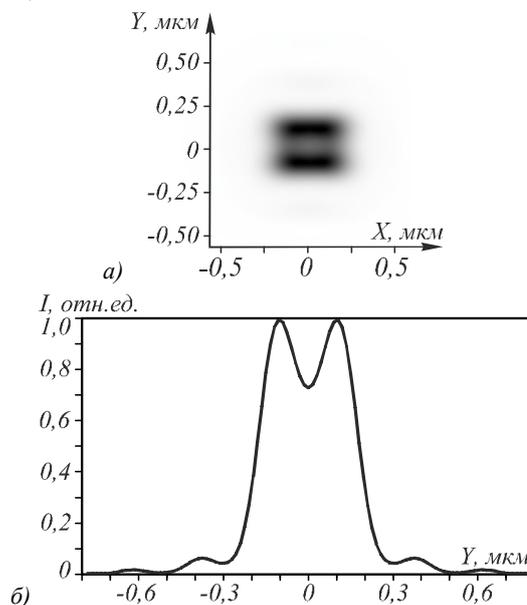


Рис. 7. Изображение объекта (интенсивность, негатив) при $w = 20$ нм, полученное при моделировании построения изображения с помощью комбинированной ЗП, состоящей из $k = 6$ областей (а), и его сечение вдоль оси Y через центр (б). Остальные параметры: $a = 19$ мм, $b = 90$ мм, $c = 2,2$ мм, $D = 200$ мкм, $\Delta r = 205$ нм

Отметим, что в данной работе был рассмотрен случай идеальной пропускающей излучение зонной пластинки. В действительности как материал зонной пластинки (серебро), так и подложка, обеспечивающая механическую прочность ЗП, поглощают рентгеновское излучение. Если предположить, что ЗП будет нанесена на подложку из кремния толщиной 10 мкм, микрорельеф ЗП, выполненный в серебре, имеет расчётную высоту 1,7 мкм, а между подложкой и структурой ЗП находится слой хрома толщиной 100 нм, обеспечивающий адгезию серебра к кремнию, то коэффициент пропускания излучения рассматриваемой длины волны через такую ЗП будет равен $\eta = 68\%$. Если же несущим элементом в механической конструкции ЗП будет являться только слой хрома толщиной 2 мкм, то пропускание такой ЗП составит $\eta = 81\%$.

Заключение

В работе показано, что, используя в качестве изображающей оптики для рентгеновского излучения с длиной волны 0,229 нм комбинированную ЗП, состоящую из нескольких областей, работающих в 1-м, 3-м, 5-м, ... порядках дифракции, можно существенно улучшить разрешение и эффективность построения изображения. В частности, для комбинированной ЗП с 6 областями, работающими в 1-м, 3-м, 5-м, 7-м, 9-м и 11-м порядках дифракции, с шириной крайней зоны $\Delta r = 205$ нм моделирование показало возможность разрешить линии шириной $w > 20$ нм, проиграв в энергетической эффективности в 6,2 раза (эффективность снижается с 23% до 3,7%). Если же использовать традиционную ЗП в 3-м порядке дифракции, уменьшение энергетической эффективности составит уже 8,8 раз (вместо 23% всего 2,6%), и при этом она сможет при той же ширине крайней зоны $\Delta r = 205$ нм разрешить линии шириной $w > 61$ нм. Полученные результаты показывают, что если чувствительности прибора, регистрирующего излучение в плоскости изображения, достаточно для использования зонной пластинки в 3-м, 5-м и более высоких порядках дифракции, то целесообразно использовать комбинированные зонные пластинки. В этом случае при существенно большей эффективности и неизменной ширине крайней зоны Δr можно получить разрешение в 9 раз лучше традиционной ЗП Френеля.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3970.2014.9), а также грантов РФФИ 15-07-01174, 13-07-97008, 14-29-07133 и 14-07-31092.

Литература

1. **Attwood, D.** Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications / D. Attwood. – Cambridge University Press, 1999.
2. **Vaschenko, G.** Sub-38 nm resolution tabletop microscopy with 13 nm wavelength laser light / G. Vaschenko, C. Brewer, F. Brizuela, Y. Wang [et al.] // Optics Letters – 2006. – Vol. 31. – P. 1214-1216.
3. **Vaschenko, G.** Nano-imaging with a compact extreme ultraviolet laser / G. Vaschenko, F. Brizuela, C. Brewer, M. Grisham [et al.] // Optics Letters. – 2005. – Vol. 30. – P. 2095-2097.
4. **Kuyumchyan, M.** High efficiency and low absorption Fresnel compound zone plates for hard X-ray focusing / M. Kuyumchyan, A. Isoyan, A. Shulakov [et al.]. – Cornell University, 2005. – <http://arxiv.org/pdf/cs.OH/0503005>.
5. **Kaulich, B.** Differential interference contrast x-ray microscopy with twin zone plates / B. Kaulich, T. Wilhein, E.D. Fabrizio [et al.] // Journal of the Optical Society of America A. – 2002. – Vol. 19 (4). – P. 797-806.
6. **Chen, X.** Single-focus x-ray zone plate by stagger arrangement of zones / X. Chen, X. Wang // Optics Express. – 2013. – Vol. 21(17). – P. 20005-20014.
7. **Chao, W.** Hydrogen silsesquioxane double patterning process for 12nm resolution x-ray zone plates / W. Chao, J. Kim, S. Rekawa, P. Fischer, E. Anderson // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2009. – Vol. 27. – P. 2606. – doi: 10.1116/1.3242694.
8. **Chao, W.** Demonstration of 12 nm resolution Fresnel zone plate lens based soft X-ray microscopy / W. Chao, J. Kim, S. Rekawa, P. Fischer, E.H. Anderson // Optics Express. – 2009. – Vol. 17 (20). – P. 17669.
9. **Налимов, А.Г.** Сравнение методов расчёта распространения рентгеновского излучения через ДОО в паракиальной области / А.Г. Налимов, С.Н. Хонина // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12(4). – С. 26-31.
10. **Hofsten, O.** Sub-25-nm laboratory X-ray microscopy using a compound Fresnel zone plate / O. Hofsten, M. Bertilson, J. Reinspach [et al.] // Optics Letters. – 2009. – Vol. 34(17). – P. 2631-2633.
11. **Keskinbora, K.** Ion beam lithography for Fresnel zone plates in X-ray microscopy / K. Keskinbora, C. Grevent, M. Bechtel [et al.] // Optics Express. – 2013. – Vol. 21(10). – P. 11747-11756.
12. **Котляр, В.В.** Зонная пластинка на мембране для жёсткого рентгеновского излучения / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, М.И. Шанина, В.А. Соيفер, Л. О'Фаолан // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35(1). – С. 36-41.
13. **Аркадьев, В.А.** Капиллярная рентгеновская линза / В.А. Аркадьев, А.И. Коломийцев, М.А. Кумахов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14. – С. 97.
14. **Романов, А.Ю.** Исследование рентгенооптических свойств оптики Кумахова / А.Ю. Романов, И.В. Дмитриев, А.Ю. Акулов // Инженерная физика. – 2004. – № 1. – С. 43-47.
15. **Chen, Z.** Toward one nanometer X-ray focusing: a complex refractive lens design / Z. Chen, H. Xie, B. Deng, G. Du [et al.] // Chinese Optics Letters. – 2014. – Vol. 12, Issue 12. – P. 123401-123401.

References

1. **Attwood, D.** Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications / D. Attwood. – Cambridge University Press, 1999.
2. **Vaschenko, G.** Sub-38 nm resolution tabletop microscopy with 13 nm wavelength laser light / G. Vaschenko, C. Brewer, F. Brizuela, Y. Wang [et al.] // Optics Letters – 2006. – Vol. 31. – P. 1214-1216.
3. **Vaschenko, G.** Nano-imaging with a compact extreme ultraviolet laser / G. Vaschenko, F. Brizuela, C. Brewer, M. Grisham [et al.] // Optics Letters. – 2005. – Vol. 30. – P. 2095-2097.
4. **Kuyumchyan, M.** High efficiency and low absorption Fresnel compound zone plates for hard X-ray focusing / M. Kuyumchyan, A. Isoyan, A. Shulakov [et al.]. – Cornell University, 2005. – <http://arxiv.org/pdf/cs.OH/0503005>.
5. **Kaulich, B.** Differential interference contrast x-ray microscopy with twin zone plates / B. Kaulich, T. Wilhein, E.D. Fabrizio [et al.] // Journal of the Optical Society of America A. – 2002. – Vol. 19 (4). – P. 797-806.
6. **Chen, X.** Single-focus x-ray zone plate by stagger arrangement of zones / X. Chen, X. Wang // Optics Express. – 2013. – Vol. 21(17). – P. 20005-20014.
7. **Chao, W.** Hydrogen silsesquioxane double patterning process for 12nm resolution x-ray zone plates / W. Chao, J. Kim, S. Rekawa, P. Fischer, E. Anderson // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2009. – Vol. 27. – P. 2606. – doi: 10.1116/1.3242694.
8. **Chao, W.** Demonstration of 12 nm resolution Fresnel zone plate lens based soft X-ray microscopy / W. Chao, J. Kim, S. Rekawa, P. Fischer, E.H. Anderson // Optics Express. – 2009. – Vol. 17 (20). – P. 17669.

9. **Nalimov, A.G.** Comparing methods of modeling of x-ray radiation propagation through a DOE in paraxial area / A.G. Nalimov, S.N. Khonina // *Izvestiya of the SSC of the RAS.* – 2010. – V. 12(4). – P. 26-31.
10. **Hofsten, O.** Sub-25-nm laboratory X-ray microscopy using a compound Fresnel zone plate / O. Hofsten, M. Bertilson, J. Reinspach [et al.] // *Optics Letters.* – 2009. – Vol. 34(17). – P. 2631-2633.
11. **Keskinbora, K.** Ion beam lithography for Fresnel zone plates in X-ray microscopy / K. Keskinbora, C. Grevent, M. Bechtel [et al.] // *Optics Express.* – 2013. – Vol. 21(10). – P. 11747-11756.
12. **Kotlyar, V.V.** Zone plate on a film for hard x-ray radiation / V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, M.I. Shanina, V.A. Soifer, L. O'Faolain // *Computer Optics.* – 2011. – Vol. 35(1). – P. 36-41. – (In Russian).
13. **Arkadyev, V.A.** Capillary x-ray lens / V.A. Arkadyev, A.I. Kolomyitsev, M.A. Kumahov [et al.] // *Letters to ZhTF.* – 1988. – Vol. 14. – P. 97.
14. **Romanov, A.Y.** Investigates of x-ray and optics properties of Kumahov lenses / A.Y. Romanov, I.V. Dmitriev, A.Y. Akulov // *Engineer Physics.* – 2004. – Vol. 1. – P. 43-47. – (In Russian).
15. **Chen, Z.** Toward one nanometer X-ray focusing: a complex refractive lens design / Z. Chen, H. Xie, B. Deng, G. Du [et al.] // *Chinese Optics Letters.* – 2014. – Vol. 12, Issue 12. – P. 123401-123401.

USE OF COMBINED ZONE PLATES AS IMAGING OPTICS FOR HARD X-RAYS

A.G. Nalimov, V.V. Kotlyar

*Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
Samara State Aerospace University*

Abstract

We have carried out modeling of an image formation in hard x-ray coherent radiation using a Rayleigh-Sommerfeld integral. Combined zone plates have been used to form the image.

The resolution of the combined zone plate was numerically shown to increase up to 10 times (equaling 20 nm) when compared with a traditional Fresnel zone plate without any changes of the outermost zone width (205 nm). The zone plate consisted of 6 areas operating in 1, 3, 5, 7, 9 and 11 diffraction orders. An efficiency improvement of 42% has been numerically achieved in contrast to a traditional Fresnel zone plate used in the third diffraction order. For the combined zone plate, the efficiency of 3.7 % has been achieved.

Keywords: combined zone plates, multi-order diffraction, X-ray.

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 СГАУ в должности доцента, в Институте систем обработки изображений РАН в должности научного сотрудника. Кандидат физико-математических наук, соавтор 78 работ и 3 патентов.

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”. Nalimov A.G. works on Technical Cybernetics department in SSAU 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 78 papers and 3 inventions.

Сведения об авторе **Котляр Виктор Викторович** – см. стр. 11 этого номера.

Поступила в редакцию 31 декабря 2014 г.