

РАЗРАБОТКА МНОГОПОРЯДКОВОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В РЕНТГЕНОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ

А.Г. Налимов, В.В. Котляр

Институт систем обработки изображений РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

С помощью интеграла Рэля-Зоммерфельда проведено моделирование построения изображения в жёстком когерентном рентгеновском излучении (длина волны 0,229 нм) с помощью комбинированной зонной пластинки. Моделирование показало возможность разрешения линий периодом 20 нм с помощью зонной пластинки с крайней зоной имеющей ширину линий 205 нм и работающую в 11 порядке дифракции. Эффективность построения изображения при этом составила 3,7%.

Зонные пластинки (ЗП) Френеля широко используются в рентгеновской микроскопии [1,2]. Использование ЗП Френеля в изображающей оптике обусловлено простотой изготовления, а так же необходимостью применять тонкие оптические элементы в рентгеновском диапазоне. Толщина ЗП ограничена лишь необходимой толщиной материала, создающего разницу в набеге фазы на π между зонами, а так же 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. А зонная пластинка, имеющая ширину крайней зоны 12 нм помогла достичь разрешения 12 нм. Из приведенных источников видно, что основной помехой к увеличению разрешения в рентгеновском изображающем микроскопе является технологическая 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 первом порядке дифракции она формирует так же паразитные фокусы в 3-м порядке дифракции, 5-м, 7-м и т.д. [3, 4]. Такие фокусные пятна существенно уже фокусного пятна, полученного в первом порядке дифракции [3, 5], что дает возможность их использования для создания ЗП с большим разрешением [6].

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. Моделирование построения изображения в данной работе проводилось с помощью интеграла Рэля-Зоммерфельда [4].

На рис. 1 представлена схема рассматриваемой задачи.

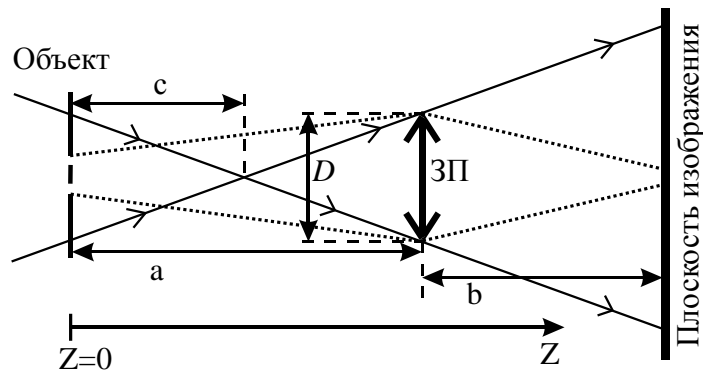


Рисунок 1. Схема рассматриваемой задачи

В качестве падающей волны на изображаемый объект выбрано сходящееся излучение, так как в этом случае оно успевает достаточно разойтись до плоскости изображения и наименьшим образом влияет на контрастность получаемой картинки [7]. 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. Основные параметры ЗП были выбраны следующие: $D = 200$ мкм, фокусное расстояние $f = 18$ см, высота рельефа $h = 1,7$ мкм (показатель преломления серебра на данной длине волны равен $n = 1 - 6,8 \cdot 10^{-5} + 6,8 \cdot 10^{-6}i$), $a = 0,216$ м, $b = 1,08$ м (увеличение в пять раз), размер пикселя ЗП $0,13$ мкм, $c = 6,6$ мм, длина волны $\lambda = 0,229$ нм.

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. Это эквивалентно использованию в качестве объекта для изображения дифракционной решетки, что широко применяется в других работах [6]. Длина щелей была взята $5w$. Расстояние, на котором рентгеновский пучок сходилась после плоскости объекта было принято $c = 6,6$ мм. В качестве критерия разрешения ЗП примем критерий Рэлея, на основании которого отношение максимумов интенсивности и минимума по центру должно удовлетворять $\frac{I_{\min}}{I_{\max}} \leq 0,74$.

Результаты моделирования построения изображения с различным количеством используемых порядков дифракции комбинированной ЗП приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Разрешение зонной пластинки для различного количества используемых порядков дифракции.

Количество порядков	Минимальная разрешенная ширина линий, w , нм	Порядок дифракции крайней области
1	190	1
2	70	3
3	45	5
4	31	7
5	25	9
6	20	11

Из Таблицы 1 видно, что разрешение зонной пластинки существенно улучшается с увеличением количества областей, работающих в высших порядках дифракции. Увеличение количества областей до 6 приводит к улучшению разрешения почти в 10 раз.

В Таблице 2 приведены данные по эффективности рассматриваемых многопорядковых ЗП в сравнении с однопорядковой ЗП, используемой в том же порядке дифракции, в котором работает крайняя зона комбинированной ЗП.

Таблица 2. Эффективность комбинированных ЗП.

Количество порядков	Эффективность построения изображения η , %	Эффективность однопорядковой ЗП, работающей в высшем порядке дифракции	Порядок дифракции крайней области комбинированной ЗП
1	23	23	1
2	15	2,6	3
3	8,5	1	5
4	6,2	0,51	7
5	4,7	0,32	9
6	3,7	0,18	11

Из Таблицы 2 видно, что с увеличением количества областей с высшими порядками дифракции комбинированные ЗП выигрывая в разрешении проигрывают в эффективности. Но даже имея 6 порядков дифракции комбинированная зонная пластинка способна построить изображение с эффективностью выше, чем аналогичная однопорядковая ЗП, работающая в высшем порядке дифракции аналогичном комбинированной ЗП. При этом ширина крайней зоны такой комбинированной ЗП остается неизменной, и в данной работе она равна 205 нм. Однако 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 порядок дифракции, изменение всего радиуса ЗП на 19 нм приведет 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 отсчета в 30 нм, из которых сформирован микрорельеф рассматриваемых ЗП, вполне допустим.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3970.2014.9), а также грантов РФФИ 14-07-31092, 15-07-01174, 13-07-97008, 14-29-07133 и 15-37-20723.

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 [and oth.] // Opt. Lett. – 2006. – Vol. 31. – PP. 1214–1216.
3. 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.
4. 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.
5. Налимов, А.Г. Сравнение методов расчета распространения рентгеновского излучения через ДОО в параксиальной области / Налимов А.Г., Хонина С.Н. // Известия СНЦ РАН. – 2010. – Т. 12 (4). – С. 26-31.
6. Hofsten, O. Sub-25-nm laboratory X-ray microscopy using a compound Fresnel zone plate / O. Hofsten, M. Bertilson, J. Reinspach, A. Holmberg [and oth.] // Optics Letters. – 2009. – Vol. 34 (17). – P. 2631-2633.
7. Котляр, В.В. Зонная пластинка на мембране для жёсткого рентгеновского излучения / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, М.И. Шанина, В.А. Сойфер, Л.О'Фаолайн // Компьютерная оптика. – 2011. – Т.35 (1). – С. 36-41.