

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ДОЭ В ПАРАКСИАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

© 2010 А. Г. Налимов², С. Н. Хонина¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)
²Институт систем обработки изображений РАН

Приведены результаты различных вариантов моделирования распространения света после прохождения через зонную пластинку из меди и кремния для рентгеновского излучения. Моделирование проводилось с помощью расчёта одномерного преобразования Френеля, одномерного непараксиального распространения (через угловой спектр), двумерного интеграла Релея-Зоммерфельда, RSoft BeamProp из пакета FullWave, производитель RSoft Design Group, США. Показано, что все четыре метода дают очень близкие результаты в фокальной плоскости.

Зонная пластинка, рентгеновское излучение, гамма, BeamProp, FullWave, преобразование Френеля, интеграл Релея-Зоммерфельда, угловой спектр.

Введение

Использование мягкого и жёсткого рентгеновского излучения в оптических системах позволяет получать высокое разрешение в задачах микроскопии и высокоразрешающей оптики [1]. Короткая длина волны рентгеновского излучения по сравнению с видимым светом накладывает более жёсткие условия на расчёт и изготовление оптики – линз Френеля, зонных пластинок, дифракционных решёток [2-4].

Зонные пластинки являются одним из самых простых элементов для фокусирования когерентного рентгеновского излучения [5-8]. Теория их расчёта известна давно [9], однако интерес представляет также и моделирование распространения света через рассчитанную зонную пластинку. Основной проблемой для расчёта дифракции рентгеновского излучения на зонной пластинке является выбор необходимого метода расчёта, а также время моделирования. В этих статьях не были рассмотрены различные методы расчёта дифракции излучения.

В данной статье приводятся результаты моделирования одной зонной пластинки различными способами. Как показало мо-

делирование, результаты расчёта эффективности фокусирования излучения программным пакетом BeamPROP близки к результатам моделирования распространения излучения через зонную пластинку с помощью остальных методов.

1. Постановка задачи

Длина волны при моделировании была принята $\lambda = 0,229$ нм, в связи с возможностью использования когерентного источника рентгеновского излучения. На рис. 1 представлена схема рассматриваемой задачи.

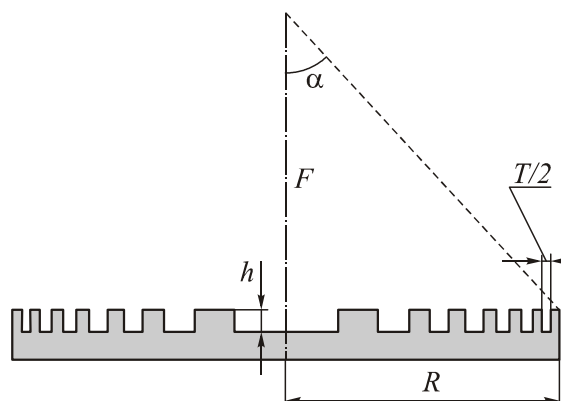


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи

Линза представляет собой цилиндрическую дифракционную решётку с переменным периодом, фокусирующую свет в первом порядке (зонная пластинка).

Микрорельеф выполнен следующим образом. В кремниевой пластине протравлена цилиндрическая дифракционная решётка, затем канавки в решётке заполняются медью. Показатель преломления меди для выбранной длины волны составляет $n = 1 - 5,6 \cdot 10^{-5} + 2,5 \cdot 10^{-6}i$, показатель преломления в кремнии составляет $n = 1 - 1,7 \cdot 10^{-5} + 8,5 \cdot 10^{-7}i$. Таким образом, оптимальная высота решётки равна 2,9 мкм. При радиусе $R = 50$ мкм фокусное расстояние составляет $F = 0,45$ м. Медь относительно прозрачна для данной длины волны, затухание света в два раза происходит на расстоянии 10 мкм, поэтому тонкий слой меди в дифракционной решётке можно использовать в качестве оптического элемента, работающего на пропускание.

Моделирование проводилось с помощью расчёта одномерного преобразования Френеля, одномерного непараксиального распространения (через угловой спектр), двумерного интеграла Релея-Зоммерфельда, RSoft BeamProp из пакета FullWave, производитель RSoft Design Group, США.

Расчёт одномерного преобразования Френеля производился по формуле

$$E(u, z) = \sqrt{\frac{k}{2iz}} \exp(ikz) \times \int_{-R}^R (x) \exp\left(\frac{ik(x-u)^2}{2z}\right) dx, \quad (1)$$

где (x) – комплексная функция пропускания оптического элемента, микрорельеф которого показан на рис. 1 (при ограниченном апертурой плоском освещающем пучке), z – расстояние от поверхности оптического элемента вдоль оптической оси.

Расчёт с помощью одномерного непараксиального распространения производился по формуле

$$E(u, z) = -\frac{i}{R} \int_{-R}^R (x) \left\{ \int_{-1}^1 \exp\left(ikz\sqrt{1-\Sigma^2}\right) \times \exp\left(ik\left[(u-x)\Sigma\right]\right) d\Sigma \right\} dx. \quad (2)$$

Пределы взяты от -1 до 1 , так как не требуется учитывать затухающие волны. Расчёт с помощью двумерного интеграла Рэля-Зоммерфельда первого типа производился по формуле

$$E(u, v, z) = -\frac{z}{2} \iint_{\Sigma} (x, y) \frac{e^{ik\ell}}{\ell^2} \left(ik - \frac{1}{\ell} \right) dx dy, \quad (3)$$

где (x, y) – цилиндрическая комплексная функция пропускания оптического элемента, полученная из одномерной функции (x) , $\ell = \sqrt{(u-x)^2 + (v-y)^2 + z^2}$, $\Sigma: 2R \times 2R$ – область входной апертуры. Расчёт двумерного преобразования Френеля производился по формуле для осесимметричных функций:

$$F(r, z) = \sqrt{\frac{k}{2iz}} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) \times \int_0^R (r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) J_0\left(\frac{kr}{z}\right) r dr, \quad (4)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, R – радиус входной апертуры.

Непараксиальный оператор распространения с использованием разложения по плоским волнам записывается следующим образом [10]:

$$E(u, v, z) = \frac{1}{2} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x, y) \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(ikz\sqrt{1-\Sigma^2-\Delta^2}\right) \times \exp\left(ik\left[(u-x)\Sigma + (v-y)\Delta\right]\right) d\Sigma d\Delta \right\} dx dy. \quad (5)$$

В случае, когда входное поле может быть представлено в виде радиально-вихревой функции:

$$(x, y) = (r, \phi) = P(r) \exp(im\phi), \quad (6)$$

выражение (2) можно упростить:

$$E(u, v, z) = ik^2 \exp(im\phi) \times \int_0^{\Sigma_0} \left(\int_0^R P(r) J_m(k\Sigma r) r dr \right) \times \exp\left(ikz\sqrt{1-\Sigma^2}\right) J_m(k\Sigma) \Sigma d\Sigma, \quad (7)$$

где диапазон пространственных частот $\Sigma \leq 1$ соответствует распространяющимся волнам.

Начальная фаза пучка представлена на рис. 2 (чёрный цвет – фаза равна 0, белый – фаза равна π).

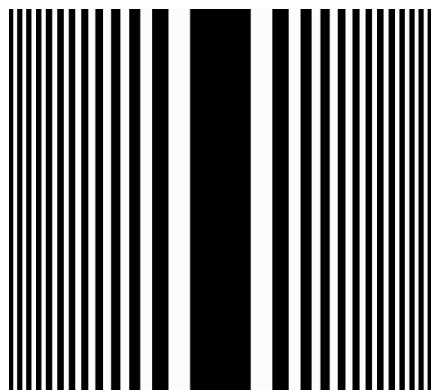


Рис. 2

2. Моделирование в двумерном случае

2.1. Расчёт с помощью одномерного преобразования Френеля

На рис. 3а-в представлены результаты моделирования распространения света после прохождения через зонную пластинку с помощью одномерного преобразования Френеля.

Как видно из рис. 3а, фоновый шум в фокальной плоскости в основном концентрируется на отрезке $x \in [-100 \text{ мкм}, 100 \text{ мкм}]$ 89% энергии.

На рис. 3б видно, что присутствуют дополнительные фокусы, интенсивность в

которых примерно в 4 раза ниже, чем в основном.

Ширина интенсивности пучка в фокусе (рис. 3в) по полуспаду:

$\text{FWHM} = 0,936 \text{ мкм}$; эффективность 39,5%.

2.2. Расчёт с помощью одномерного непараксиального распространения (через угловой спектр плоских волн)

На рис. 4 показаны результаты моделирования прохождения света через зонную пластинку с помощью одномерного непараксиального оператора распространения.

В дальней зоне дифракции результаты, полученные в 2.1 и 2.2, полностью совпадают.

Кроме того, как видно по рис. 4б, использование непараксиального оператора распространения (2) в отличие от (1) позволяет получить верную картину в ближней зоне дифракции.

Ширина интенсивности пучка в фокусе (рис. 4в) по полуспаду: $\text{FWHM} = 0,927 \text{ мкм}$; энергетическая эффективность 39,8%.

2.3. Моделирование с помощью 2D интеграла Релея-Зоммерфельда

На рис. 5 представлены результаты моделирования прохождения света через зонную пластинку с помощью интеграла Рэлея-Зоммерфельда.

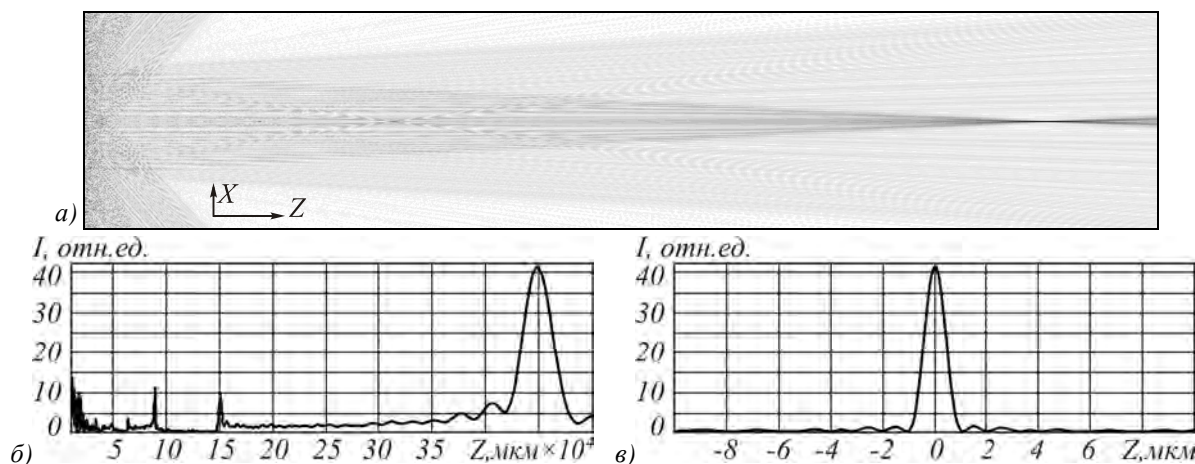


Рис. 3. Моделирование с помощью одномерного преобразования Френеля: общая картина распределения амплитуды $z \in [10 \text{ мм}, 500 \text{ мм}]$, $x \in [-100 \text{ мкм}, 100 \text{ мкм}]$ (а), интенсивность на оптической оси (б), интенсивность в фокальной плоскости ($F=450 \text{ мм}$) (в)

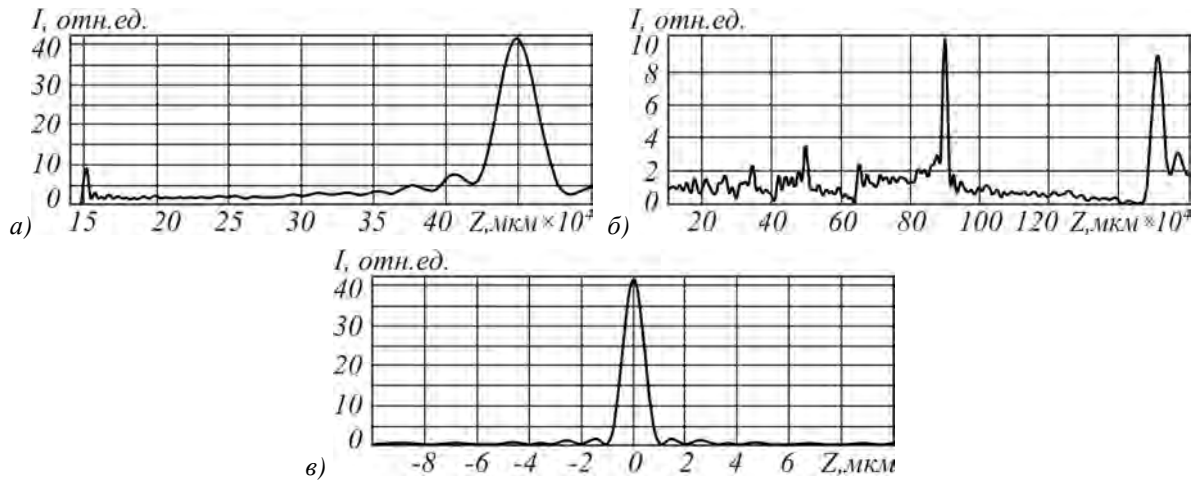


Рис. 4. Моделирование с помощью одномерного непараксиального оператора распространения (распределение интенсивности): на оптической оси в диапазоне от 140 мм до 500 мм (а), на оптической оси в диапазоне от 10 мм до 160 мм (б), в фокальной плоскости (450 мм) (в)

Как видно из рис. 5, ширина интенсивности пучка в фокусе (рис. 5в) по полуспаду: FWHM = 0,927 мкм; эффективность 40,86%.

2.4 Моделирование с помощью программного пакета BeamPROP

При помощи программного пакета BeamProp (фирмы RSoft Design group, США) производился расчёт распространения света через линзу и далее до фокусной плоскости. Для уменьшения времени вычисления сетка бралась с шагом по поперечной к направлению распространения оси X: 20λ , вдоль оптической оси Y: 20000λ . Такие шаги сеток были выбраны, так как уменьшение шагов дискретизации сетки вдвое изменяет результат вычисле-

ний менее чем на 5%. Ширина области расчёта была равна апертуре зонных пластинок.

На рис. 6 представлено распределение интенсивности рентгеновского излучения вдоль оптической оси и в фокальной плоскости после прохождения через зонную пластинку.

Как видно из рис. 6, ширина пика интенсивности по полуспаду составляет 0,952 мкм, эффективность по критерию FWHM составляет 40,18%.

Как видно из табл. 1, все четыре метода дают очень близкие результаты (различие максимум на 2%), что вполне ожидаемо для дальней зоны, в которой проводятся исследования.

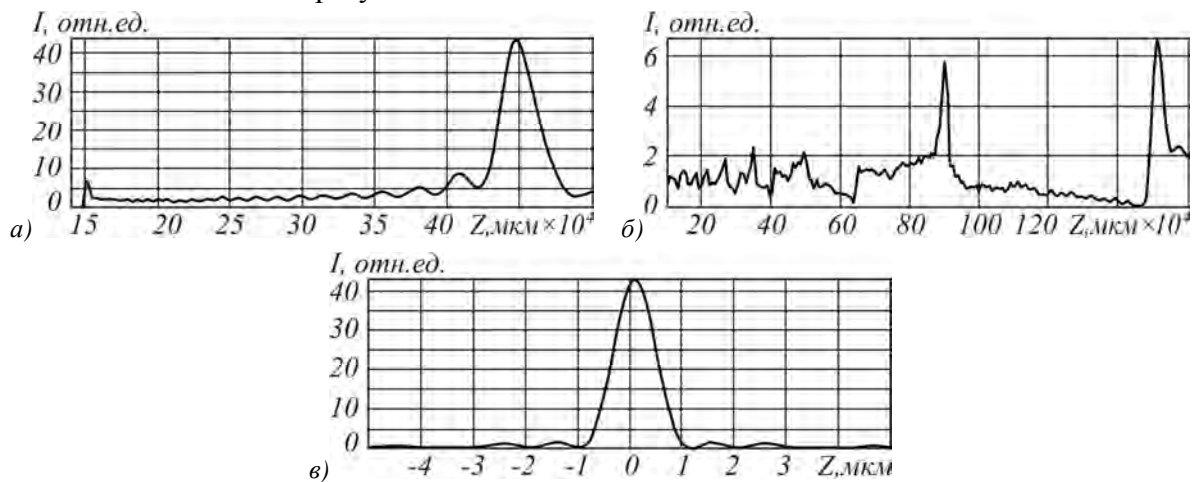


Рис. 5. Моделирование с помощью двумерного интеграла Релея-Зоммерфельда (распределение интенсивности): на оптической оси в диапазоне от 140 мм до 500 мм (а), на оптической оси в диапазоне от 10 мм до 160 мм (б), в фокальной плоскости (450 мм) (в)

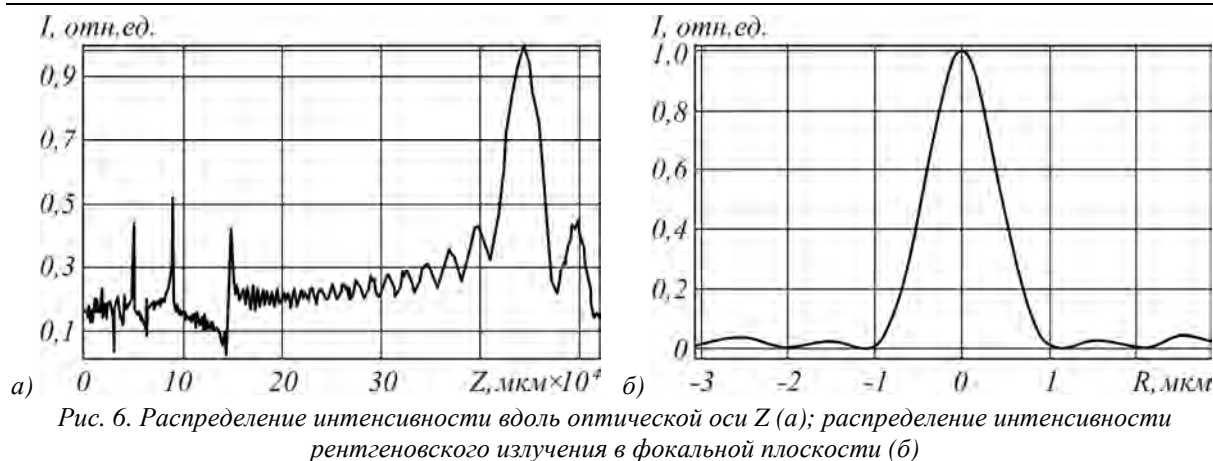


Таблица 1. Сводные параметры для второго варианта зонной пластинки (двумерный случай)

	FWHM	Эффективность
1D преобразование Френеля	0,936 мкм	39,5%
1D непараксиальное распространение (через угловой спектр)	0,927 мкм	39,8%
2D интеграл Рэля-Зоммерфельда	0,927 мкм	40,86%
RSoft BeamProp из пакета FullWave	0,952 мкм	40,18%

Разумеется, использование выражения (3), как и выражения (2), в данной области избыточно по точности и затратно по ресурсам, но непараксиальные модели были применены для корректного сравнения полученных результатов.

Упомянутые выше методы применялись в приближении тонкого оптического элемента, не учитывающего поглощение и отражение на элементе. В пакете FullWave учитывается поглощение, но результат практически не отличается от других методов, так как поглощение в тонком слое (толщиной менее 3 мкм) меди, содержащим рельеф, мало.

3. Моделирование в трёхмерном случае

3.1. Расчёт с помощью радиального преобразования Френеля

Начальная фаза падающего поля представлена на рис. 6а. На рис. 6б-г представлены результаты моделирования распространения рентгеновского излучения после прохождения через зонную пластинку с помощью радиального преобразования Френеля:

$$E(r, z) = \frac{-ik}{z} \exp\left(ikz + \frac{ikr^2}{2z}\right) \times \int_0^\infty E(r, 0) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) J_0\left(\frac{kr}{z}r\right) r dr, \tag{8}$$

где $J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка.

Из рис. 7 видно, что неосновные фокусы в отличие от двумерного случая имеют большую интенсивность. Рис. 8 объясняет это явление.

Из рис. 8 видно, что зонная пластинка фокусирует свет в основной фокус F_1 за счёт дифракции излучения в первый порядок $m = 1$. Второй порядок дифракции в сторону оптической оси ($m = 2$) будет выходить под углом θ_2 от колец с радиусом R_1 , и под углом θ_1 от колец с радиусом R_2 . Тогда фокусы для колец с радиусами R_1 и R_2 будут F_3 и F_2 соответственно и не будут совпадать. Поэтому при двумерном случае расчёта основной фокус F_1 имеет наибольшую интенсивность излучения в центре.

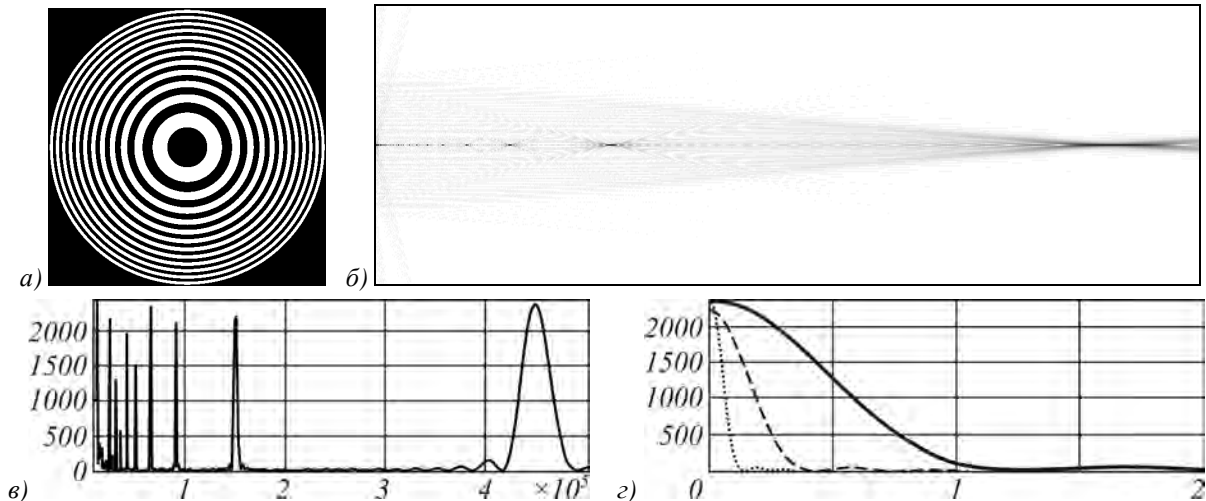


Рис. 7. Моделирование прохождения рентгеновского излучения через зонную пластинку с помощью радиального преобразования Френеля (распределение интенсивности): начальная фаза (а), общая картина (б), на оптической оси (в), в различных плоскостях: в фокальной, $z = 450$ мм (жирная линия), при $z = 150$ мм (пунктирная линия), и $z = 50$ мм (точечная линия) (г)

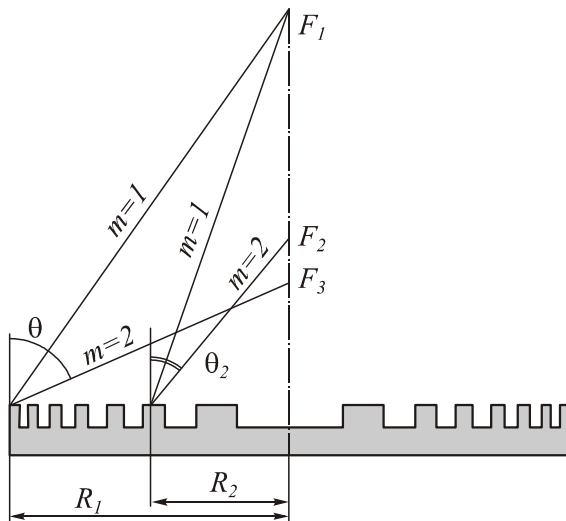


Рис. 8. Распространение различных порядков на различных расстояниях от центра зонной пластинки

В трёхмерном случае расчёта кольца с большим радиусом (R_1) имеют большую площадь, а следовательно, фокусируют больше излучения, нежели кольца с меньшим радиусом (R_2), поэтому неосновные фокусы (F_3) имеют большую интенсивность в отличие от двумерного случая. Чем меньше период зон, чем они ближе к краю, тем более острой фокусировки излучения можно добиться. Это объясняет, что неосновные более близкие фокусы (F_3) уже по полуспаду интенсивности, нежели основной фокус F_1 .

3.2. Расчёт с помощью непараксиального распространения (через угловой спектр)

На рис. 9 представлены результаты моделирования распространения рентгеновского излучения после прохождения через зонную пластинку с помощью непараксиального оператора распространения.

По рис. 9а видно, что основная часть энергии в спектральной области сосредоточена в круге радиуса $\Sigma_0 = 0,0001$, но учёт только этих частот в выражении (7) приводит к неверному результату в средней зоне дифракции. Если же сильно увеличить радиус учитываемой спектральной области, то в дальней зоне вместо гладкого распределения будут получаться биеения (рис. 9б).

Таким образом, для корректного применения выражения (7) необходимо учитывать числовую апертуру каждой зоны. Например, для расстояния $z = 500$ мм $NA = 0,0001$, а для $z = 50$ мм – в десять раз больше.

В рассмотренных плоскостях результаты непараксиального моделирования практически совпали с результатами предыдущего раздела. Использование интеграла Рэля-Зоммерфельда в трёхмерном случае не имеет смысла, т.к. он требует значительно больших вычислительных ресурсов.

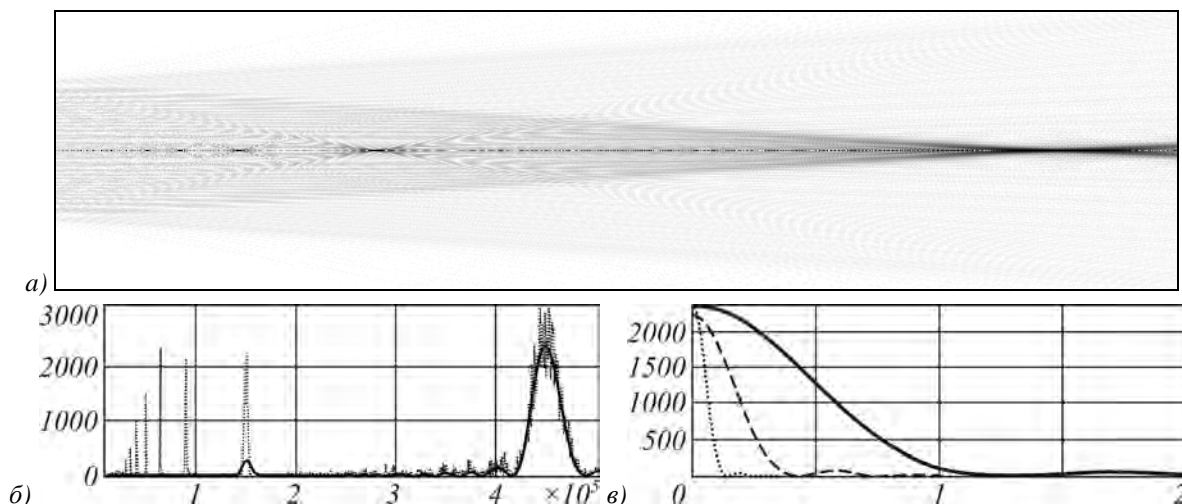


Рис. 9. Моделирование с помощью радиального непараксиального распространения: общая картина амплитуды $z \in [10\text{мм}, 500\text{мм}]$, $x \in [-100\text{мкм}, 100\text{мкм}]$ (а), распределение интенсивности на оптической оси в диапазоне от 10000 мкм до 500 мкм при $\Sigma_0 = 0,0002$ (жирная линия) и $\Sigma_0 = 0,001$ (точечная линия) (б), в различных плоскостях: в фокальной, $z=450$ мм (жирная линия), при $z=150$ мм (пунктирная линия), и $z=50$ мм (точечная линия) (в)

Моделирование дифракции на зонной пластинке в трёхмерном случае с помощью пакета *BeamPROP* является очень ресурсоёмкой задачей, и невозможной для данных условий моделирования. Поэтому для получения адекватного результата трёхмерный расчёт распространения света был аппроксимирован расчётом в двумерном случае, но с источником рентгеновского излучения, излучающего больше энергии на краях, чем в центре, так как различные радиусы источника в трёхмерном случае будут давать вклад в формирование фокусного пятна. Источник излучения для этого был разбит на 20 кольцевых зон, дающих вклад в общее излучение пропорционально радиусу зоны, поляризация рентгеновского излучения не учи-

тывалась. На рис. 10 показано распределение интенсивности в плоскости наблюдения, отстоящей от зонной пластинки на расстояние 450 мм, рассчитанное с помощью *BeamPROP*.

Из табл. 2 видно, что при трёхмерном случае моделирования результат, полученный с помощью программы *BeamPROP*, практически не отличается от результатов, полученных другими методами в фокальной плоскости. Однако промежуточные фокусы в расчётах программой *BeamPROP* значительно менее выражены, нежели при расчёте параксиальным и непараксиальными методами. Причина этого несоответствия результатов является темой для дальнейшего исследования.

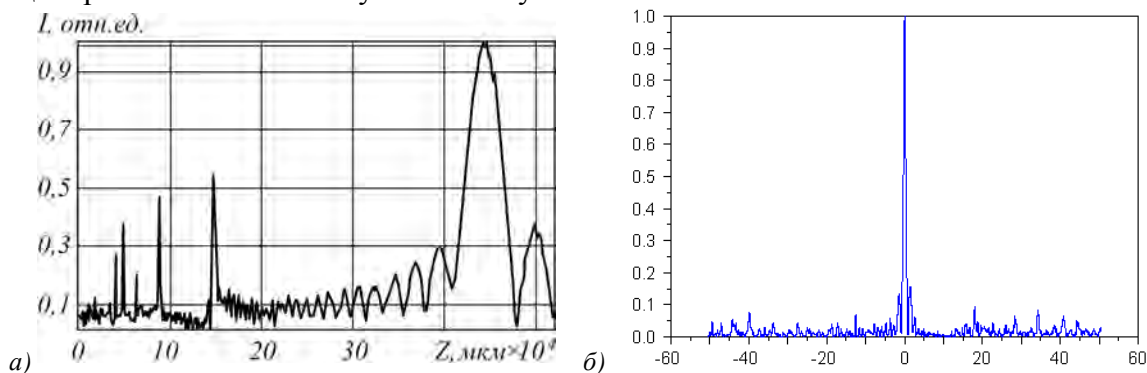


Рис. 10. Распределение интенсивности излучения вдоль оптической оси (а); зависимость интенсивности от радиуса в плоскости наблюдения при моделировании распространения света с помощью программы *BeamPROP* (б). Плоскость наблюдения расположена на расстоянии 450 мм от зонной пластинки

Таблица 2. Сравнение результатов для трёхмерного моделирования: FWHM, эффективность

	Z = 450 мм	Z = 150 мм	Z = 50 мм
Параксиальный	1,058 мкм; 31,98%	0,358 мкм; 10,23%	0,117 мкм; 3,57%
Непараксиальный	1,061 мкм; 31,95%	0,358 мкм; 10,23%	0,118 мкм; 3,45%
RSoft BeamProp	1,05 мкм; 32,5% (38)	0,29 мкм; 4,3%	0,1 мкм; 0,6%

Заключение

В данной работе приводятся результаты моделирования цилиндрической зонной пластинки различными способами: одномерное преобразование Френеля, одномерное непараксиальное распространение (через угловой спектр плоских волн), двумерный интеграл Рэлея-Зоммерфельда и с помощью коммерческого программного пакета BeamPROP, в двумерном и трёхмерном случаях.

Все четыре метода в двумерном случае дают очень близкие результаты (различие менее чем на 2%) – в среднем ширина центрального пика по полуспаду от максимума интенсивности составила 0,93 мкм, а полная ширина между нулевыми значениями – около 2 мкм, средняя энергетическая эффективность – 40%. Непараксиальные методы, избыточные по точности и затратные по ресурсам, были применены для сравнения полученных результатов. Данные методы использовались в приближении тонкого оптического элемента, не учитывающего поглощение и отражение на элементе.

В пакете BeamPROP эти эффекты учитываются, однако полученная им эффективность и ширина пика по критерию FWHM практически не отличаются вследствие малой толщины элемента. В трёхмерном случае различие в моделировании параксиальным, непараксиальным методами, и в пакете BeamPROP в случае основного фокуса на 450 мм получаются порядка 25%, что может быть вызвано погрешностями из-за разбиения источника излучения в программе BeamPROP на 20 частей для расчёта в приближении трёхмерного случая и является предметом для дальнейших исследований.

Учитывая результаты расчёта, можно сделать вывод, что для моделирования

распространения света через зонную пластинку для рентгеновского диапазона достаточно одномерного преобразования Френеля или моделирования прохождения света через пластинку в программе BeamPROP, если необходимо учитывать поглощения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 14.740.11.0016), грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-7414.2010.9) и молодого кандидата наук (МК-64571.2010.2), российско-американской программы "Фундаментальные исследования и высшее образование" (грант CRDF PG08-014-1), и грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а.

Библиографический список

1. **Attwood, D.** Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications [Text] / D. Attwood // Cambridge University Press, 1999. – 486 p.
2. **Vaschenko, G.** Sub-38 nm resolution tabletop microscopy with 13 nm wavelength laser light [Text] / G. Vaschenko, C. Brewer, F. Brizuela, Y. Wang, M.A. Larotonda, B.M. Luther, M.C. Marconi, J.J. Rocca, C.S. Menoni, E.H. Anderson, W. Chao, B.D. Harteneck, J.A. Liddle, Y. Liu, and D.T. Attwood // Opt. Lett. – 2006. – Vol. 31, Issue 9. – P. 1214-1216.
3. **Vaschenko, G.** Nano-imaging with a compact extreme ultraviolet laser [Text] / G. Vaschenko, F. Brizuela, C. Brewer, M. Grisham H. Mancini, C.S. Menoni, M.C. Marconi, J.J. Rocca, W. Chao, A. Liddle, E. Anderson, D. Attwood, A.V. Vinogradov, I.A. Artioukov, Y.P. Pershyn and V.V. Kondratenko // Opt. Lett. – 2005. – Vol. 30, Issue 16. – P. 2095-2097.

4. High efficiency and low absorption Fresnel compound zone plates for hard X-ray focusing [Text] / M. Kuyumchyan, A. Isoyan, A. Shulakov, E. Aristov, V. Kondratenkov, M. Snigirev, A. Snigireva, and I. Yabashi - <http://arxiv.org/pdf/cs.OH/0503005>, Cornell University, 2005.

5. High efficiency and low absorption Fresnel compound zone plates for hard X-ray focusing [Text] / M. Kuyumchyan, A. Isoyan, A. Shulakov, E. Aristov, V. Kondratenkov, M. Snigirev, A. Snigireva, and I. Yabashi - <http://arxiv.org/pdf/cs.OH/0503005>, Cornell University, 2005.

6. **Aoki, S.** The 8th International Conference on X-ray Microscopy and references therein [Text] / Eds.: S. Aoki, Y. Kagoshima, Y. Suzuki – Institute of Pure and Applied Physics, Tokyo, 2006.

References

1. **Attwood, D.** Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications / D. Attwood // Cambridge University Press, 1999. – 486 p.

2. **Vaschenko, G.** Sub-38 nm resolution tabletop microscopy with 13 nm wavelength laser light / G. Vaschenko, C. Brewer, F. Brizuela, Y. Wang, M.A. Larotonda, B.M. Luther, M.C. Marconi, J.J. Rocca, C.S. Menoni, E.H. Anderson, W. Chao, B.D. Harteneck, J.A. Liddle, Y. Liu, and D.T. Attwood // *Opt. Lett.* – 2006. – Vol. 31, Issue 9. – P. 1214-1216.

3. **Vaschenko, G.** Nano-imaging with a compact extreme ultraviolet laser / G. Vaschenko, F. Brizuela, C. Brewer, M. Grisham H. Mancini, C.S. Menoni, M.C. Marconi, J.J. Rocca, W. Chao, A. Liddle, E. Anderson, D. Attwood, A.V. Vinogradov, I.A. Artioukov, Y.P. Pershyn and V.V. Kondratenko // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30, Issue 16. – P. 2095-2097.

4. High efficiency and low absorption Fresnel compound zone plates for hard X-ray focusing / M. Kuyumchyan, A. Isoyan, A. Shulakov, E. Aristov, V. Kondratenkov, M. Snigirev, A. Snigireva and I. Yabashi - <http://arxiv.org/pdf/cs.OH/0503005>, Cornell University, 2005.

7. **Chao, W.L.** Soft X-ray microscopy at a spatial resolution better than 15 nm [Text] / Weilun Chao, Bruce D. Harteneck, J. Alexander Liddle, Erik H. Anderson1 & David T. Attwood // *Nature*, 2005. – Vol. 435, N. 7046. – P. 1210-1213.

8. **Jefimovs, K.** Zone-doubling technique to produce ultrahigh-resolution x-ray optics [Text] / K. Jefimovs, J. Vila-comamala, T. Pilvi, J. Raabe, M. Ritala, C. David // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 99, N 26. – P. 264801.

9. **Barret, H.H.** Fresnel zone plate imaging of gamma rays; theory [Text] / H.H. Barret, F.A. Horrigan // *Appl. Opt.* – 1973. – Vol. 12, N 11. – P. 2686-2702.

10. **Виноградова, М.Б.** Теория волн [Текст] / М.Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

5. High efficiency and low absorption Fresnel compound zone plates for hard X-ray focusing / M. Kuyumchyan, A. Isoyan, A. Shulakov, E. Aristov, V. Kondratenkov, M. Snigirev, A. Snigireva, and I. Yabashi – <http://arxiv.org/pdf/cs.OH/0503005>, Cornell University, 2005.

6. **Aoki, S.** The 8th International Conference on X-ray Microscopy and references therein / Eds.: S. Aoki, Y. Kagoshima, Y. Suzuki – Institute of Pure and Applied Physics, Tokyo, 2006.

7. **Chao, W.L.** Soft X-ray microscopy at a spatial resolution better than 15 nm / Weilun Chao, Bruce D. Harteneck, J. Alexander Liddle, Erik H. Anderson1 & David T. Attwood // *Nature*, 2005. – Vol. 435, N 7046. – P. 1210-1213.

8. **Jefimovs, K.** Zone-doubling technique to produce ultrahigh-resolution x-ray optics / K. Jefimovs, J. Vila-comamala, T. Pilvi, J. Raabe, M. Ritala, C. David // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 99, N 26. – P. 264801.

9. **Barret, H.H.** Fresnel zone plate imaging of gamma rays; theory / H.H. Barret, F.A. Horrigan // *Appl. Opt.* – 1973. – Vol. 12, N 11. – P. 2686-2702.

10. **Vinogradova, М.Б.** The theory of waves / М.Б. Vinogradova, О.В. Rudenko, А.П. Suhorukov. – Moscow: “Nauka” Publisher, 1979. – 384 p.

COMPARING OF MODELING METHODS OF X-RAY RADIATION PROPAGATION IN PARAXIAL AREA

© 2010 A.G. Nalimov², S.N. Khonina¹

¹Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

²Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences

The results of calculation of different modeling methods of radiation propagation calculation after a zone plate made of a Cu and Si are shown in the article. The modeling methods are one-dimension Fresnel transformation, one-dimension non-paraxial propagation method (angle spectrum of flat waves), two-dimension integral of Rayleigh-Zommerfeld, RSoft BeamProp software (RSoft design group, USA). It is shown, that all four methods give results close each other in the focal plane.

Zone plate, X-ray radiation, gamma radiation, BeamProp, FullWave, Fresnel transformation, Rayleigh-Zommerfeld integral, angle spectrum of flat waves.

Сведения об авторах

Налимов Антон Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. Институт систем обработки изображений РАН. E-mail: anton@smr.ru.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической кибернетики. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@smr.ru.

Nalimov Anton Gennadyevich, candidate of physical and mathematical sciences, works as a scientist. Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. E-mail: anton@smr.ru.

Khonina Svetlana Nikolaevna, doctor of physical and mathematical sciences, professor technical cybernetics department. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: khonina@smr.ru.