

## СФЕРИЧЕСКИЕ И ХРОМАТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗЫ

Дудчик Ю.И.<sup>1</sup>, Серебренников Д.А.<sup>2</sup>, Ершов П.А.<sup>2</sup>,  
Климова Н.Б.<sup>2</sup>, Снигирев А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>БФУ имени И. Канта, НОЦ «Функциональные наноматериалы», Калининград, Россия

Как известно, коэффициент преломления рентгеновских лучей в веществе незначительно отличается от единицы, поэтому в течении почти ста лет после открытия рентгеновских лучей преломляющая оптика в этом диапазоне считалась неэффективной. И только в 1996 группа российских и немецких исследователей опубликовали работу [1], где была сформулирована идея многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы и показана ее практическая реализация. Эта работа послужила основой для развития нового направления в рентгеновской оптике – преломляющей рентгеновской оптики. Многоэлементная преломляющая рентгеновская линза состоит из большого числа  $N$  (от 50 до 350) двояковогнутых микролинз, выполненных из материала с малым порядковым номером. Использование большого числа микролинз позволяет уменьшить фокусное расстояние в  $N$  раз по сравнению со случаем одной линзы. Микролинзы изготавливаются из материала с небольшим порядковым номером, что связано с тем, что в этом случае показатель преломления для рентгеновских лучей значительно превышает показатель ослабления.

В настоящее время существует целый ряд способов изготовления линз: сверлением, прессованием, с использованием метода литографии. В НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ было предложено формировать двояковогнутые микролинзы внутри стеклянного капилляра. Идея оказалась перспективной – удалось разработать и изготовить линзы, фокусирующие рентгеновские лучи с энергией фотонов от 8 кэВ до 20 кэВ в пятна размером около одного микрометра. Фокусировка излучения осуществлялась на синхротронных источниках излучения, где используется монохроматический рентгеновский пучок. Линзы являются короткофокусными (5-10 см для фотонов с энергией 8 кэВ) и поэтому могут быть использованы для фокусировки излучения от лабораторных микрофокусных аппаратов. Поскольку излучение в этом случае не является монохроматическим, то необходимо указать требования к монохроматичности пучка, при котором возможно получение рентгеновских микропучков.

Ранее в [2] нами была показана возможность получения рентгеновских микропучков от лабораторного микрофокусного рентгеновского аппарата с использованием многоэлементной преломляющей рентгеновской линзы.

Принципы работы преломляющей рентгеновской линзы схожи с оптикой видимого света –

рентгеновская линза позволяет получать изображения, как источников излучения, так и объектов на пути прохождения излучения, являющихся в этом случае т.н. вторичными источниками. Так, если источник излучения имеет размер  $S$  и расположен на расстоянии  $a$  от линзы, то положение изображения источника относительно линзы и его размер  $S_1$  находятся из следующих соотношений:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

$$S_1 = S \frac{f}{a - f}, \quad (2)$$

где  $b$  – расстояние от линзы до плоскости изображения,  $f$  – фокусное расстояние рентгеновской линзы. Фокусное расстояние рентгеновской линзы рассчитывается как:

$$f = R / (2\delta N), \quad (3)$$

где  $N$  – число одиночных линз,  $R$  – радиус кривизны линзы,  $\delta$  – декремент показателя преломления. Из соотношения (1), которое является формулой тонкой линзы, следует, что если расположить источник излучения на расстоянии  $a > 2f$ , то изображение источника будет уменьшенным.

В [2] в качестве источника рентгеновских лучей использовалась галлиевая микрофокусная трубка «Metal Jet» (Excillum™) имеющая размер фокусного пятна –  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>.

В качестве оптического элемента для формирования рентгеновского пучка использовались разработанная в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ многоэлементная преломляющая рентгеновская линза. Линза содержит 161 двояковогнутую сферическую эпоксидную микролинзу с радиусом кривизны поверхности равным 50 мкм. Рентгеновская линза располагалась на расстоянии  $a = 715$  мм от источника. Расчетное фокусное расстояние линзы (формула 3) для энергии падающих фотонов 9,25 кэВ составило  $f = 54,9$  мм. Положение плоскости изображений линзы ( $b = 59,5$  мм) рассчитывалось по формуле (1). На этом расстоянии от линзы располагалась рентгеновская камера. В соответствии с данной геометрией можно ожидать, что в плоскости изображений будет наблюдаться уменьшенное в  $b/a = 12$  раз изображение источника излучения. Проведенные методом «ножа» измерения размера рентгеновского пучка в плоскости изображения показали, что он равен 2,4 мкм. В работе [2] размер рентгеновского пучка определялся при помощи детектора,

который был настроен на заданную энергию фотонов (9,25 кэВ). Поскольку в эксперименте использовался полихроматический рентгеновский пучок от рентгеновской трубки, то возникает вопрос о размытии рентгеновского пучка вследствие хроматических aberrаций линзы.

На рисунке 1 показано формирование рентгеновского пучка рентгеновской линзой для случая полихроматического пучка излучения.

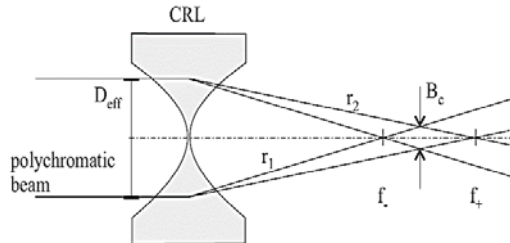


Рисунок 1 – Схема формирования рентгеновского пучка преломляющей линзой для случая полихроматического рентгеновского пучка

Фотоны, которые различаются энергией, фокусируются линзой в различных точках на оптической оси, обозначенных как  $f_1$  и  $f_2$ . Ширина рентгеновского пучка  $B_c$  вследствие хроматических aberrаций линзы можно рассчитать из геометрических соображений зная апертуру линзы  $D_{eff}$ :

$$B_c = D_{eff} - (2 D_{eff} / f) (f f_+ / (f_+ + f)), \quad (4)$$

где  $f_{\pm} = f \pm \Delta f$ ,  $\Delta f$  - разница между фокусными расстояниями линзы для двух значений энергии фотонов. Поскольку значение  $f \sim E^2$ , где  $E$  - энергия фотонов, то  $\Delta f / \Delta E = 2f / E$ . Отсюда для ширины рентгеновского пучка  $B_c$  получается следующее значение:

$$B_c = D_{eff} \Delta E / E. \quad (5)$$

Проведенные расчеты показали, что апертура рассматриваемой линзы из-за поглощения  $D_{eff}$  равна:  $D_{eff} = 80$  мкм для фотонов с энергией 9,25 кэВ. Для того, чтобы ширина пучка составляла  $B_c \sim 1$  мкм необходимо, чтобы параметр  $\Delta E$  равнялся 0,115 кэВ, а параметр  $\Delta E / E$  равнялся

$1,24 \times 10^{-2}$ . Таким образом, для получения рентгеновского пучка микронных размеров необходимо использовать кристалл монохроматор, который целесообразно поставить перед рентгеновской линзой. например, графитовый, который характеризуется относительно высоким коэффициентом отражения и обеспечивает требуемую степень монохроматизации.

Второй фактор, который необходимо учитывать при построении фокусирующей системы - это сферические aberrации рентгеновской линзы. Методика расчета сферических aberrаций изложена нами в [3]. Она основана на рассмотрении траекторий лучей, которые формирует фокальное пятно рентгеновской линзы.

В таблице приведены рассчитанные значения радиуса рентгеновского пучка  $R_{ms}$  в фокусе линзы в зависимости от радиуса диафрагмы  $R_d$  для случая линзы, которая использовалась в [2].

$R_d$ , мкм	15	20	25	30
$R_{ms}$ , мкм	0,17	0,4	0,78	1,35

Из таблицы видно, что для того, чтобы осуществить фокусировку рентгеновских лучей в пятно размером 1 мкм необходимо использовать диафрагму с радиусом отверстия, равным 20-25 мкм.

#### Благодарности

Работа поддержана БРФФИ (проект Ф16Р-070) и РФФИ (проект 16-52-00212).

1. Snigirev A. A Compound Refractive Lens for Focusing High-Energy X-rays. A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler // Nature.- 1996. -V. 384. - P.52.
2. Дудчик, Ю. Формирование рентгеновских микропучков с использованием короткофокусной преломляющей рентгеновской линзы и лабораторного источника излучения. Ю.И. Дудчик, П.А. Ершов, М.В. Поликарпов, А.Ю. Гойхман, И.И. Снигирева, А.А. Снигирев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – Т. 10. – С. 1–6.
3. Ю.И. Дудчик. Многоэлементная сферическая преломляющая линза для формирования микро- и нано- размерных пучков рентгеновского излучения // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2008. – №2. – С. 26–30.

УДК 681

## АЛГОРИТМ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ОТКАЗАХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Артемьев В.М., Наумов А.О., Кохан Л.Л.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**Введение.** Многоканальность или информационная избыточность системы возникает при избыточности датчиков и необходима для ее отказоустойчивой работы. Общая методика решения задач фильтрации в условиях отказов датчиков изложена в публикациях по теории систем со случайной структурой [1, 2]. В имеющихся работах используется статистический подход, в том

числе на основе методологии фильтра Калмана (ФК), что затрудняет решение задачи в реальном масштабе времени.

В настоящей работе рассматривается случай внезапных отказов с их обнаружением по результатам измерений. Решение состоит в обнаружении и исключении канала с неисправным датчиком. При этом производится