

Анаберрационная поверхность преломляющей линзы для рентгеновских лучей

И. Н. Кольчевская, П. В. Петров, Н. Н. Кольчевский

Белорусский государственный университет, Минск; e-mail: kolchevsky@bsu.by

В статье рассмотрен расчёт анаберрационных поверхностей преломляющей линзы для рентгеновских лучей. Получены соотношения, рассматривающие выход лучей из бесконечного источника и приходящих в фокус, случай преломления коллимированного пучка, а также прохождение лучей, вышедших из точечного источника. Для случая бесконечного источника построены графики анаберрационных профилей.

Ключевые слова: рентгеновская оптика, преломляющие линзы, анаберрационная поверхность

Введение

Рентгеновская преломляющая оптика новый раздел физики, основанный на идее 1996 года использовать большое количество преломляющих поверхностей для фокусировки синхротронного рентгеновского излучения [1]. К настоящему времени известно большое число конструкций многоэлементных преломляющих линз, которые применяются для фокусировки и получения изображений при энергиях фотонов 5-50 КэВ. Оптическая сила, усиление, разрешение преломляющих линз зависит от формы преломляющей поверхности [2]. Поиск идеальной поверхности преломляющей линзы идёт до сих пор.

Цель работы вывести уравнение профиля, или кривой меридиального сечения анаберрационной преломляющей поверхности для рентгеновских лучей.

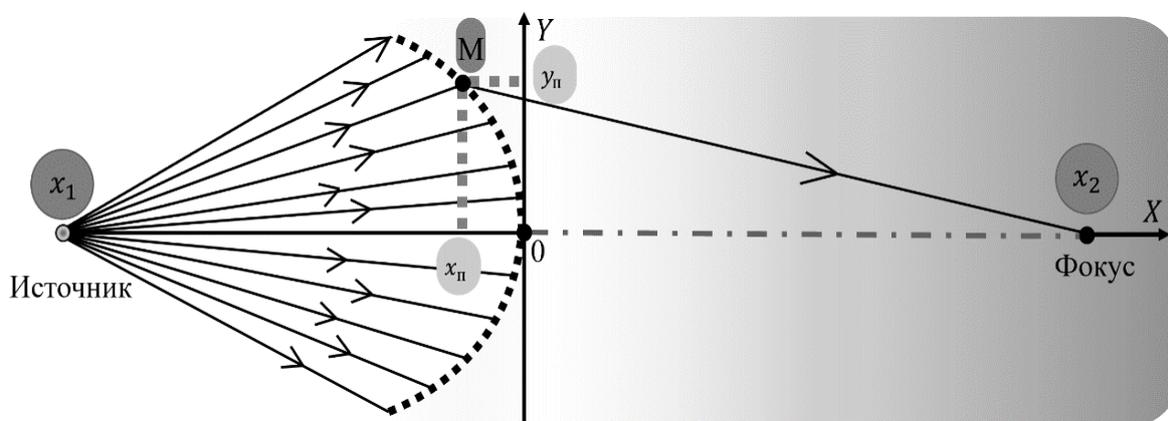


Рис 1. – Анаберрационная преломляющая линза.

Для рентгеновских лучей показатель преломления n вещества имеет комплексный вид:

$$n = 1 - \delta + i\beta, \quad (1)$$

где β – линейное увеличение, δ – единичный декремент, который рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{E_p^2}{E_f^2} \quad (2)$$

Для большинства веществ можно принять, что плазменная энергия E_p изменяется в диапазоне от 22 эВ до 80 эВ, а энергия фотонов E_f изменяется в диапазоне от 1000 эВ до 100000 эВ.

Таким образом можно оценить значения максимума и минимума единичного декремента:

$$\delta_{\max} = 3,2 * 10^{-3}; \delta_{\min} = 242 * 10^{-10} \quad (3)$$

Согласно условию образования точечного изображения предметная точка изображается стигматически преломляющей или отражающей поверхностью, если оптическая длина хода любого из лучей пучка, идущего из точки предмета и приходящего в точку изображения, является величиной постоянной. Поверхность, для которой выполняется данное условие называется анаберрационной.

Рассмотрим два луча выходящих из источника и приходящих в фокус (рис. 1). Первый луч проходит через точку М, а второй идёт вдоль оптической оси. Рассмотрим оптические длины хода этих лучей, по условию образования точечного изображения оптические длины пути от источника до фокуса для любого значения y должны быть постоянны, тогда можно записать:

$$(1-\delta_1)\sqrt{(x_1-x_{II})^2+y_{II}^2}+(1-\delta_2)\sqrt{(x_2+x_{II})^2+y_{II}^2}=x_1(1-\delta_1)+x_2(1-\delta_2) \quad (4)$$

Получено общее решение данного уравнения $y_{II}(x_{II})$, позволяющее рассчитывать анаберрационную преломляющую поверхность.

1. Расчет анаберрационной поверхности для случая бесконечно удаленного источника

Для случая бесконечно удаленного источника: $x_1 = \infty$, $x_2 = x$, $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = \delta$, $y_{II} = y$, $x_{II} = F$ – фокусное расстояние поверхности, расположенного в вакууме решение можно привести к компактному виду

$$y = \sqrt{\frac{x\delta[x(2-\delta)+2(1-\delta)F]}{(1-\delta)^2}} \quad (5)$$

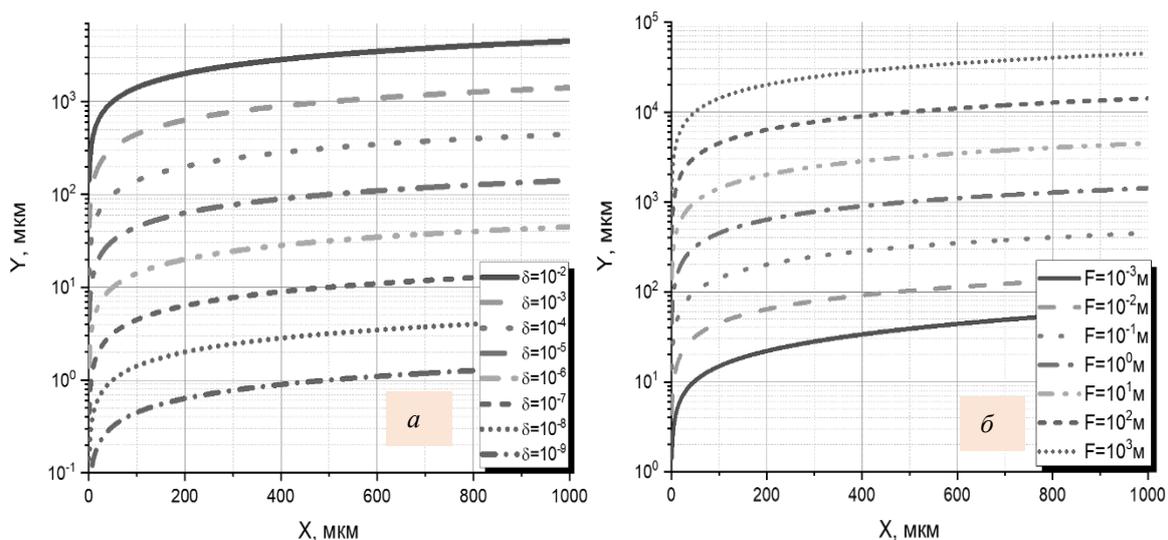


Рис. 2. – Анаберрационные профили преломляющей поверхности.

Расчёт анаберрационного профиля на рис. 2, а производился при фиксированном значении фокуса $F = 1$ м. Можно заметить, что с увеличением декремента, профиль расширяется по координате y . Допустимые значения для технологии ограничены размером 1 мкм, тогда мы получаем, что одиночные линзы с δ равным 10^{-8} – 10^{-9} невозможно изготовить. При фиксированном значении декремента δ , равном 10^{-3} , и изменении фокусного расстояния получили, что при увеличении фокуса профиль расширяется по координате y (рис. 2, б). Так как допустимые значения технологии ограничены размером в 1 мкм, то могут быть получены линзы с фокусным расстоянием порядка 1 метра.

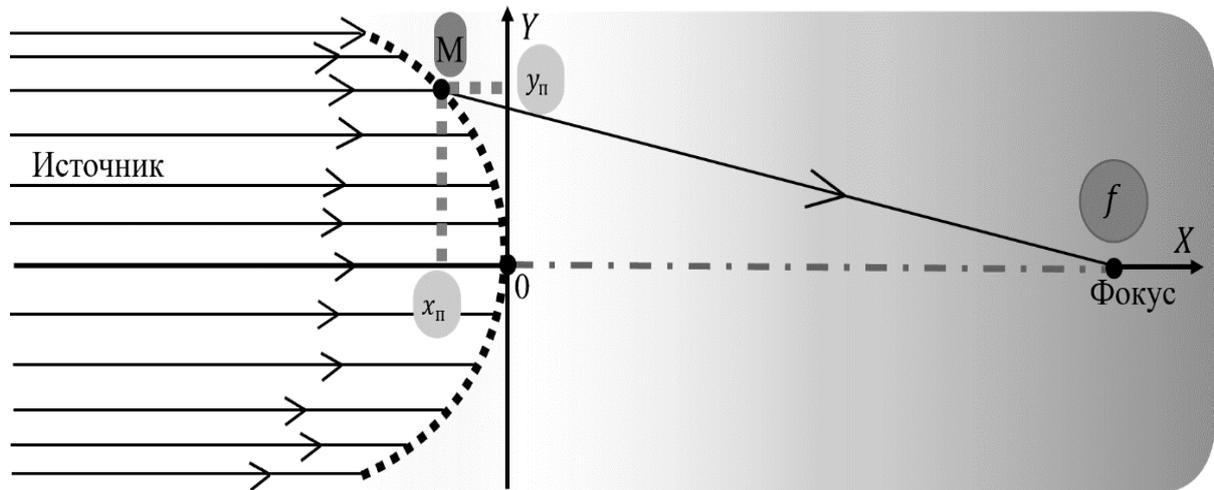


Рис. 3. – Анаберрационная преломляющая линза (коллимированный пучок).

Рассмотрим два луча выходящих параллельно из источника и приходящих в фокус (рис. 3). Первый луч проходит через точку М, а второй идёт вдоль оптической оси. Рассмотрим оптические длины хода этих лучей, по условию образования точечного изображения оптические длины пути от источника до фокуса для любого значения y должны быть постоянны, тогда можно записать:

$$x_n + f(1-\delta) = (1-\delta)\sqrt{(x_n + f)^2 + y_n^2} \quad (6)$$

Получено решение данного уравнения $y_n(x_n)$, позволяющее рассчитывать анаберрационную преломляющую поверхность. Решение приведём к компактному виду

$$y = \sqrt{\frac{x_n \delta [2(f + x_n) - \delta(2f + x_n)]}{(1-\delta)^2}} \quad (7)$$

2. Расчет анаберрационной поверхности для формирования коллимированного пучка

Рассмотрим следующий случай, два луча выходящих из точечного источника и уходящих параллельно оптической оси (рис. 4). Первый луч проходит через точку М и идёт параллельно оптической оси, второй – идёт вдоль оптической оси.

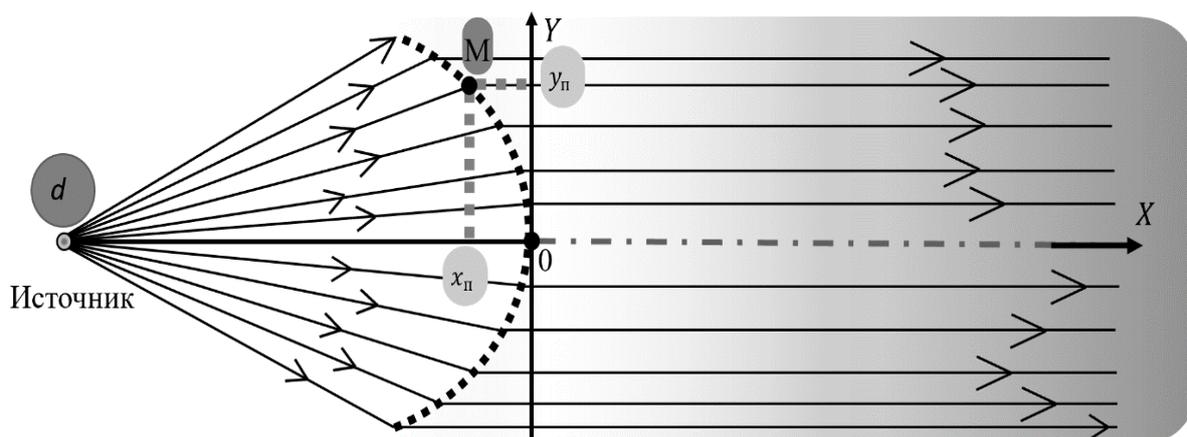


Рис. 4 – Анаберрационная преломляющая линза (случай параллельного выхода лучей).

Рассмотрим оптические длины хода этих лучей и по условию образования точечного изображения запишем:

$$\sqrt{(d - x_{\text{л}})^2 + y_{\text{л}}^2} + (1 - \delta)x_{\text{л}} = d \quad (8)$$

Получено решение данного уравнения $y_{\text{л}}(x_{\text{л}})$, позволяющее рассчитывать анаберрационную преломляющую поверхность.

$$y = \sqrt{x_{\text{л}}\delta[2d - 2x_{\text{л}} + x_{\text{л}}\delta]} \quad (9)$$

Заключение

Расчёты показали, что при допустимых значениях технологии, ограниченных размером 1 мкм, могут быть изготовлены одиночные линзы с декрементом менее 10^{-8} и фокусным расстоянием порядка 1 метра. Данные исследования будут продолжены для поиска идеальной поверхности многоэлементной анаберрационной преломляющей линзы, для фокусировки рентгеновского синхротронного излучения.

Литература

1. Dudchik Yu. I., Kolchevsky N.N., Komarov F.F.. Microcapillary X-ray lens as a novel design of the refractive lens. SPIE Proceedings. 2002. Vol. 4766
2. Kumakhov M.A. Optics of beams. 1993. Vol. 1, P. 3–17.

Aberration-free surface shape of the refractive lens for x-rays

I.N. Kolchevskay, P.V. Petrov, N.N. Kolchevsky

Belarusian State University, Minsk; e-mail: kolchevsky@bsu.by

In the article analyzed the calculation of the unaberration surfaces of a refracting lens for X-rays. Obtained relations considering the exit of rays from an infinite source and arriving at the focus, the case of refraction of a collimated beam, as also the passage of rays coming out of a point source. For the case of an infinite source, plots of unaberration profiles are plotted.

Keywords: X-ray optics, refractive lenses, Anaberration surface.