

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ФОКУСНОГО ПЯТНА РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗЫ

Н.Н. Кольчевский¹⁾, П.В. Петров

¹⁾ Белорусский государственный университет, kolchevsky@bsu.by

Спектральный состав излучения на выходе преломляющей линзы определяется источником излучения, спектральными зависимостями коэффициентов поглощения и преломления вещества, геометрическими параметрами линзы. Зависимость коэффициента преломления вещества от длины волны излучения приводит к пространственному разделению фокусных пятен для «высокоэнергетической» и «низкоэнергетической» части рентгеновского спектра. Установлено, что линза с $R=100\text{ мкм}$, $d=10\text{ мкм}$, $N=100$, изготовленной на основе эпоксидного клея при фокусировке излучения с широким спектральным составом формирует в фокальной плоскости пятно, спектральный состав которого характеризуется шириной $\sim 1\text{ кэВ}$. Увеличение расстояния от линзы до объекта позволяет сдвигать спектр в сторону увеличения энергии фотонов. Параметры диафрагмы и расстояния до источника позволяют добиваться определенной интенсивности и узости спектра. Двояковогнутая форма фокусирующей линзы (показатель преломления меньше единицы) позволяет фокусировать рентгеновское и ультрафиолетовое излучение. Для остальной части спектра электромагнитных волн рентгеновская линза будет являться рассеивающей. Учитывая малый радиус линзы можно считать, что оптическая сила рассеивающей линзы будет достаточно велика. Таким образом, используя источники, характеризующиеся широким спектром излучения (например, плазменные источники), фокусное пятно рентгеновской линзы будет содержать только рентгеновское излучение узкого спектрального диапазона ($\sim 1\text{ кэВ}$).

Введение

В 1996г. были опубликована первая экспериментальная работа по преломляющей рентгеновской оптике, выполненная на синхротроне ESRF (France). Экспериментально была продемонстрирована возможность сфокусировать рентгеновское излучение с помощью набора преломляющих линз. В настоящее время не определена сфера применения рентгеновских преломляющих линз, поэтому преломляющие линзы изготавливаются в единичных уникальных экземплярах и используются только в научных исследованиях.

Излучение всех источников рентгеновского излучения характеризуется сложным спектральным составом. Для многих рентгеновских методов исследования материалов требуется монохроматическое излучение. Для выделения узкого спектра волн из сплошного спектра излучения используются фильтры [1]. Различают фильтры рентгеновского излучения по типу взаимодействия излучения с веществом: пропускающие (абсорбционные), отражающие, дифракционные и интерференционные.

Наиболее широко для спектральной фильтрации рентгеновского излучения используется эффект селективного отражения излучения от кристаллов-монокристаллов, позволяющего выделять узкие спектральные линии. При уменьшении длины волны рентгеновского излучения углы отражения становятся предельно малыми, следовательно размер отражающего зеркала становится большим. Большие зеркала технологически сложно изготовить и сложно ориентировать их относительно рентгеновского пучка.

Другим широко используемым методом является использование селективного поглощения рентгеновского излучения веществом. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны имеет характерные «скачки» поглощения, формирующие «окна прозрачности». Размер «окна прозрачности» определяется энергетическим положением скачков коэффициента поглощения вещества при изменении длины волны излучения и, как правило, применяется в мягком рентгеновском диапазоне длин волн (длина волны более 2

А). При энергии фотонов более 5 кэВ тонкие металлические пленки применяются для поглощения низкоэнергетических фотонов.

Идея данной работы заключается в использовании многоэлементной преломляющей линзы в качестве рентгеновского фильтра для спектральной фильтрации излучения от рентгеновского источника, характеризующегося сложным спектральным составом излучения.

Основная часть

Спектр излучения твердотельных и плазменных рентгеновских источников содержит тормозной и линейчатый спектр. Интенсивность источника неоднородно распределена по длинам волн. В данном рассмотрении будем полагать однородное распределение интенсивности, что приближенно может соответствовать центральной части тормозного спектра.

Спектральный состав фокусного пятна определяется спектральным составом источника, спектральной зависимостью коэффициента поглощения и аберрациями сферической линзы.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (1)$$

где $I_0(\lambda)$ – спектральная интенсивность характеристика источника на входной апертуре линзы, $T(\lambda)$ – пропускание преломляющей линзы, $S(\lambda)$ – функция, характеризующая аберрации линзы, λ – длина волны излучения.

В приближении параксиальной оптики, размер фокусного пятна определяется размером изображения источника. Фокусное расстояние линзы в дифференциальной форме:

$$dF = 2 R E_f / (E_p^2 N) dE_f \quad (2)$$

где E_f – энергия фотонов, E_p – плазменная энергия, F – фокусное расстояние, R – радиус линзы, N – число линз.

Глубина фокуса рентгеновской линзы может быть записана в виде как:

$$dF = 0,5 \cdot F \cdot (1/\lambda) \quad (3)$$

Изображающие свойства линзы в значительной мере определяются значением параметра $(1/\lambda)$ – отношение коэффициентов характеризующих поглощение и преломление. Для того, чтобы

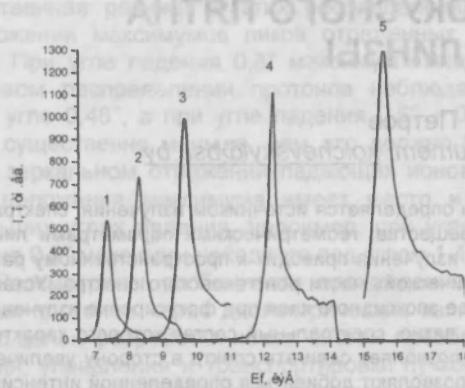


Рис.1. График, показывающий спектральное распределение интенсивности фокусного пятна линзы при различных положениях объекта за линзой. 1- 0.1м., 2- 0.13м., 3- 0.18м., 4- 0.3м., 5- 0.5м.

получить линзу с оптимальными параметрами, соотношение μ/δ должно быть минимальным. Графики μ/δ имеют минимум и определяют оптимальные энергии от 10-25 кэВ для лёгких материалов.

Таким образом, в приближении параксиальной оптики фокусное пятно будет содержать излучение описываемое следующей формулой:

$$dEf = 6.2 \cdot 10^{-4} \cdot R \quad (4)$$

Расчеты по данному соотношению показывают, что разрешение составляет доли килоэлектронвольта. Полученный результат не учитывает aberrаций линзы и спектральной зависимости пропускания линзы. Для учета данных факторов разработано программное обеспечение "X-rayFilter". Результаты расчетов показаны на рисунках 1 и 2. Расчеты проводились для линзы радиусом 100 мкм, содержащей 100 отдельных микролинз. Исследовалось спектральное состав фокусного пятна на объекте размером $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ в зависимости от расстояния между линзой и объектом. Как видно из рисунка 1 в зависимости от положения объекта фокусное пятно содержит излучение различного спектрального состава. Ширина спектрального пика (рис.2) может достигать 300 эВ.

Заключение

Спектральный состав излучения на выходе преломляющей линзы определяется источником излучения, спектральными зависимостями коэффициентов поглощения и преломления вещества, геометрическими параметрами линзы. Параметры диафрагмы и расстояния до источника определяют распределение интенсивности в фокусном пятне линзы. Двояковогнутая форма фокусирующей линзы (показатель преломления меньше единицы)

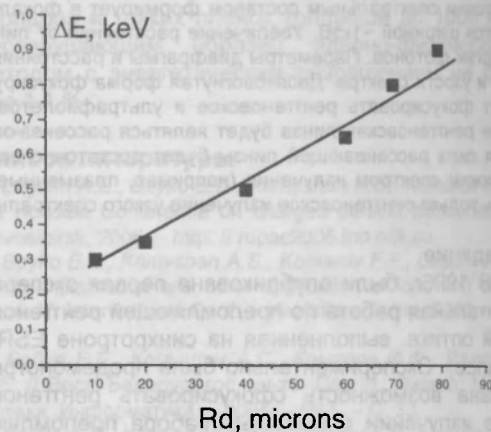


Рис.2. График зависимости спектральной ширины фокусного пятна от радиуса диафрагмы линзы

позволяет фокусировать рентгеновское и ультрафиолетовое излучение. Для остальной части спектра электромагнитных волн рентгеновская линза будет являться рассеивающей. Учитывая малый радиус линзы можно считать, что оптическая сила рассеивающей линзы будет достаточно велика. Таким образом, используя источники, характеризующиеся широким спектром излучения (например плазменные источники), фокусное пятно рентгеновской линзы будет содержать только рентгеновское излучение узкого спектрального диапазона (~1кэВ).

Список литературы

Аристов В.В., Ерко А.И. Рентгеновская оптика. - М.: Наука, 1991. - 150с.

FOCAL SPOT SPECTRUM FOR X-RAY LENS

N.N. Kolchevsky¹⁾, P.V. Petrov

¹⁾ Byelorussian state university, kolchevsky@bsu.by

The spectral structure of radiation on an output(exit) of a refracting lens is defined(determined) by a source of radiation, spectral dependences of factors of absorption and refraction of substance, geometrical parameters of a lens. The dependence of factor of refraction of substance on length of a wave of radiation results in spatial division focal spots for "high-energy" and "low-energy" part of a x-ray spectrum. Is established, that the lens with $R=100 \text{ мкм}$, $d=10 \text{ мкм}$, $N=100$, made on a basis epoxy glue focus X-ray and work like X-ray filter. Spectral structure in focal spot is ~1кэВ in width. Increase of distance from a lens up to object allows to produce special spectrum in the focal spot. The parameters of lens diaphragm and distance up to a source allow to achieve the certain intensity and narrowness of a spectrum. Biconcave form of a focusing lens (the parameter of refraction is less than unit) allows to focus x-ray and ultra-violet radiation. For other part of a spectrum of electromagnetic waves the x-ray lens will be disseminating. Taking into account small radius of a lens it is possible to consider, that the optical force of a disseminating lens will be great enough. Thus, using sources described by a wide spectrum of radiation (for example plasma sources), the focal spot of a x-ray lens will contain only x-ray radiation of a narrow spectral range (~1KeV).