

УДК.533.9.08

## Широкодиапазонный ослабитель потока рентгеновского излучения на основе сферического зеркала

В.А.Брызгунов, С.А.Данько

*В рамках геометрической оптики анализируется ранее предложенное устройство для ахроматического ослабления потока мягкого рентгеновского излучения, которое требуется для детектора при измерении больших мощностей на экспериментальных установках термоядерного синтеза. В устройстве используется выпуклая сферическая поверхность, рассеивающая излучение в условиях полного внешнего отражения.*

PACS: 07.85.Fv, 52.70.La, 52.59.Qy, 52.50.Jm, 52.57.z

*Ключевые слова:* плазма, Z-пинч, мягкое рентгеновское излучение, детектор рентгеновского излучения, сферическое зеркало, полное внешнее отражение.

### Введение

На установках инерциального управляемого термоядерного синтеза под воздействием лазерного луча или импульса разрядного тока из материала мишени образуется короткоживущая плазма. Появление плазмы сопровождается интенсивным свечением в длинноволновой части рентгеновского диапазона. При образовании Z-пинча на импульсных генераторах тока это свечение длится 1–10 нс. Охватывая область спектра, приблизительно, от 1 до 30 нм, мягкое рентгеновское излучение (МРИ) несет существенную информацию о протекающих в плазме процессах и об энергетическом потенциале плазменного источника. Прежде всего, это касается измерения полной мощности МРИ, ее временного хода. Существует несколько типов детекторов, имеющих почти постоянную чувствительность в указанном диапазоне излучения, у которых достаточное временное разрешение, а именно, вплоть до  $\sim 10^{-10}$  с. Однако их чувствительность оказывается чрезмерно высокой для измерения на современных больших установках, где мощность МРИ доходит до  $10^{14}$  Вт. В таком случае во избежание насыщения детектор следует удалить от плазмы на десятки и даже сотни метров, что очень редко выполнимо технически. Применение же различных фильтров в качестве ослабителей перед детекторами неизбежно приводит к селективности и, как правило, к отсечению наиболее важной мягкой части спектра. Используется также сложная мно-

гоканальная система в виде спектрометра Данте, который измеряет интенсивность в нескольких узких спектральных интервалах. Но тогда появляется некоторая неопределенность в результатах измерений из-за спектральных интервалов, которые лежат вне измерительных каналов.

Приведенные аргументы объясняют необходимость поиска и разработки альтернативных методов измерения МРИ.

Целью данной работы было исследование ранее предложенного устройства для ахроматического ослабления потока мягкого рентгеновского излучения, которое требуется для детектора при измерении больших мощностей рентгеновского излучения.

### Физико-техническое обоснование метода

Как известно, на границе двух сред световой луч раздваивается, появляются два луча: отраженный и преломленный. Если луч из вакуума падает на поверхность прозрачного тела под углом  $i$  и преломляется под углом  $i'$ , то согласно экспериментально установленному закону Снелля отношение  $\sin i / \sin i' = n$ , где  $n$  — величина, которая зависит только от длины волны  $\lambda$ , называется абсолютным показателем преломления вещества тела. Для световых лучей  $n > 1$ . Если же луч выходит из прозрачного тела наружу, то угол преломления  $i^2$  оказывается у него больше, чем угол падения  $i$ . Следовательно, имеется некоторый критический угол для падающего на границу раздела луча  $i = i_c = \arcsin(n^{-1})$ , при котором преломленный луч исчезает. Далее оказывается, что при  $i_c \leq i < \pi/2$  падающий луч, отражаясь под углом, равным углу падения  $i' = i$ , сохраняет практически всю принесенную с собой энергию. Это явление полного внутреннего отражения наблюдается на всех волнах электромагнитного излучения, включая рентгеновский диапазон.

Брызгунов Владимир Антонович, ст. научный сотрудник.  
Данько Сергей Александрович, начальник лаборатории.  
Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт».  
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.  
E-mail: s.danko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2013 г.

© Брызгунов В.А., Данько С.А., 2013

Из формул Френеля следует, что показатель преломления  $n$  есть отношение фазовых скоростей электромагнитной волны, соответственно, в вакууме и твердом теле. В рентгеновском диапазоне показатель преломления является комплексной величиной  $n = 1 - \delta - j\beta$ , где  $\delta$  и  $\beta$  — малые положительные величины,  $j$  — мнимая единица [1]. Отметим, что в области МРИ  $\delta$  и  $\beta$  не зависят от поляризации излучения. Действительная часть  $\delta$  связана преимущественно с фазовой скоростью, при этом для легких и средних элементов она приблизительно равна:

$$\delta \approx 1,35 \cdot 10^{-4} \rho [\text{г/см}^3] \lambda^2 [\text{нм}], \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность вещества тела. Мнимая часть  $\beta$  зависит от поглощения в веществе. Если допустить пренебречь мнимой частью  $\beta$ , то  $n = 1 - \delta < 1$  и критический угол равен  $i_c = \arcsin n^{-1}$ .

В рентгеновском диапазоне вместо больших углов падения  $i$  рассматривают дополнительные углы скольжения  $\vartheta = \pi/2 - i$  и, соответственно, критический угол  $\vartheta_c = \pi/2 - i_c$ . Полное (его называют внешним) отражение от твердой поверхности, т.е. от зеркала, происходит, если выполняется условие  $0 < \vartheta \leq \vartheta_c$ . Из изложенного следует:

$$\vartheta \approx \sqrt{\delta}. \quad (2)$$

Более точные квантовомеханические расчеты [2], дополненные многочисленными экспериментами, показывают, что соотношения (1) и (2) соблюдаются только в коротковолновой части рентгеновского диапазона, где поглощением в веществе можно пренебречь, и поэтому выполняется условие  $\delta \gg \beta$ . Тогда как в области МРИ поглощение играет важную роль, хорошо заметную по отражению под углами  $\vartheta > 1^\circ - 2^\circ$  (рис. 1). По мере увеличения длины волны зависимость  $\delta$  от  $\lambda$  ослабевает, а в непосредственной близости к краям поглощения химических элементов, входящих в состав вещества зеркала, эти соотношения становятся полностью непригодными. Например, для МРИ наблюдается плавное возрастание отражения в некотором интервале углов  $\vartheta$  вместо скачкообразного роста. Полезно отметить, что существенного влияния химического состава вещества зеркала на наблюдаемые закономерности не обнаруживается [3].

Заметим, что хотя расчеты [3] относятся к отражениям от плоскости, полученные результаты справедливы и для изогнутой поверхности, если радиус ее кривизны превышает длину волны излучения. Для МРИ это условие вполне выполнимо.

При изготовлении зеркала необходимо обратить внимание на шероховатость реальной поверхности. Как известно, для сохранения высокого коэффициента отражения при небольших углах

скольжения высота шероховатости не должна превышать длину волны излучения. Существующие технологии позволяют получить сверхгладкие рентгеновские зеркала скользкого падения с шероховатостью меньшей, чем 1 нм [2]. Причем эти технологии быстро совершенствуются, так что указанное требование не представляется непомерно жестким.

### Расчет измерительной схемы

На рис. 2 представлена оптическая схема ослабления потока излучения на детектор, предложенная в [4]. Рентгеновский луч, испускаемый источником  $S$  под некоторым углом  $\chi$  к касательной, отражается от сферической поверхности в точке  $C$  под углом скольжения  $\vartheta$  и в точке  $D$  регистрируется расположенным там детектором. Углы  $\chi$  и  $\chi + \Delta\chi$  выделяют расходящийся пучок лучей и определяют линейный размер освещаемого ими пятна на детекторе в плоскости  $SOD$ . И наоборот, каж-

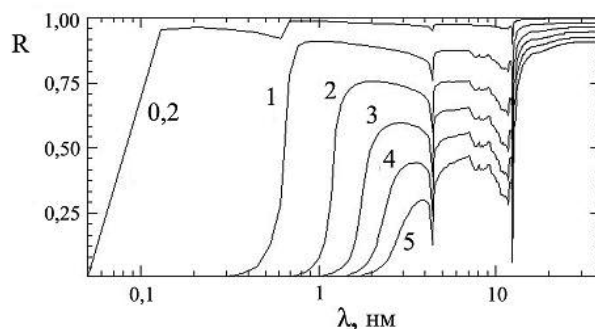


Рис. 1. Коэффициент отражения  $R$  рентгеновского излучения от зеркала из карбида кремния  $\text{SiC}$  в зависимости от длины волны  $\lambda$  для разных углов скольжения. Цифрами около кривых указаны значения угла скольжения  $\vartheta$ . Для целей данной работы используются отражения под небольшими углами  $\vartheta < 1,5^\circ$ .

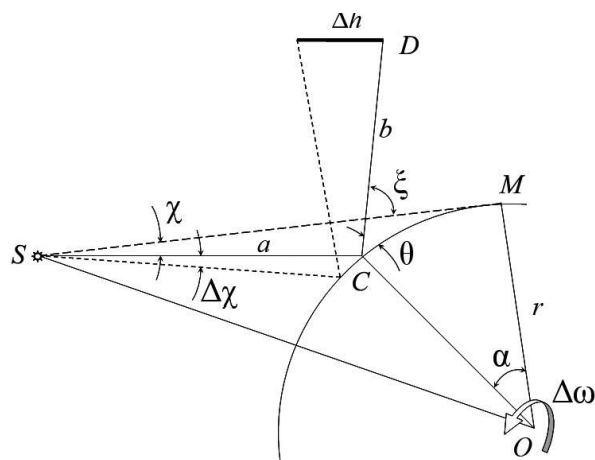


Рис. 2. Схема ослабления рентгеновского потока. Показан ход лучей для углов скольжения  $\vartheta$  и  $\vartheta + \Delta\vartheta$ . Расстояние  $SC \approx SM = a$ ,  $CD = b$ , радиус сферы  $OM = OC = r$  (масштаб на рисунке не соблюдается).

дому заданному положению и высоте  $\Delta h$  детектора соответствует определенный интервал углов  $\chi$ .

Проведя небольшие дополнительные построения [5], можно установить связь, существующую между углами  $\vartheta$  и  $\chi$ :

$$\cos \vartheta = \cos \chi - \frac{1}{p} \sin \chi, \quad (3)$$

где  $p = r/a$ . Также справедливы соотношения:

$$\alpha = \vartheta - \chi, \quad (4)$$

$$\xi = 2\vartheta - \chi. \quad (5)$$

Исходя из полученных соотношений (3–5) и ограничиваясь важным для данной задачи случаем небольших углов  $\vartheta$ ,  $\chi$  и их приращений, а также значениями  $p \ll 1$  и  $q = r/b \ll 1$ , получаем:

$$\chi = \frac{p\vartheta^2}{2}.$$

$$\Delta\vartheta = \frac{1}{p\vartheta} \Delta\chi, \quad (6)$$

$$\Delta\xi = 2\Delta\vartheta. \quad (7)$$

Далее, используя (6) и (7), находим угловой интервал в рассматриваемой плоскости:

$$\Delta\chi = \frac{q\vartheta}{2\alpha} \Delta h. \quad (8)$$

Рассмотрим окружность, которая проходит через точку  $D$ , находится в плоскости перпендикулярной к оси  $SO$  и имеет центр на этой оси. Пусть ширина детектора соответствует дуге этой окружности  $\Delta l$ , которая определяется вращением вокруг  $SO$  на угол  $\Delta\omega$ . Можно показать, что  $\Delta\omega$  соответствует лучам, которые источник  $S$  испускает в интервале углов

$$\Delta\psi = \frac{q}{2\vartheta - p - q} \frac{\Delta i}{\alpha}.$$

Так как два угла  $\Delta\chi$  и  $\Delta\psi$  лежат во взаимно перпендикулярных плоскостях и ход лучей идентичен во всем семействе плоскостей, проходящих через ось  $SO$ , то детектор с линейными размерами  $\Delta l \cdot \Delta h$  регистрирует излучение от источника в телесном угле:

$$\begin{aligned} \Delta\Omega &= \Delta\chi \Delta\psi = \\ &= \frac{r^2 \vartheta}{2a^2 b^2 (2\vartheta + p + q)} \Delta l \Delta h. \end{aligned} \quad (9)$$

Стоит обратить внимание, что  $\Delta\Omega$  слабо зависит от угла скольжения  $\vartheta$ , если  $\vartheta$  заметно превосходит значения  $p$  и  $q$ . Обозначив через

$$\Delta\Omega_0 = \frac{\Delta l \Delta h}{a^2} \quad (10)$$

телесный угол, перекрываемый детектором на расстоянии от источника  $SM = a$ , соотношение (9) можно представить в другом виде:

$$\Delta\Omega = \frac{1}{K} \Delta\Omega_0.$$

Здесь численный коэффициент

$$K = \frac{2(2\vartheta + p + q)}{\vartheta q^2} \quad (11)$$

показывает, во сколько раз уменьшается телесный угол по сравнению с  $\Delta\Omega_0$  и, соответственно, ослабляется поток излучения на детектор в рассматриваемой схеме.

На импульсном генераторе тока С-300 [6], для которого разрабатывается ослабитель, предполагается измерять мощность МРИ полупроводниковыми детекторами АХUV-5 (IRD, Inc.) [7]. Обычно детекторы устанавливаются на расстоянии до источника излучения, равном  $a = 2,5$  м. Они, имея площадь  $5 \text{ мм}^2$ , согласно соотношению (10) захватывают телесный угол  $\Delta\Omega_0 = 8 \cdot 10^{-7}$  ср. При изотропном излучении мощности МРИ  $\sim 10^{12}$  Вт, которая выделяется на С-300, на детектор приходится  $6,4 \cdot 10^4$  Вт, тогда как допустима мощность всего лишь 0,1 Вт. Таким образом, поток излучения необходимо уменьшить в  $K = 6,4 \cdot 10^5$  раз. Выбирая радиус  $r = 0,35$  см сферической поверхности и угол скольжения  $\vartheta = 1,5^\circ = 0,026$  рад (см. рис. 1), из соотношения (11) для требуемого ослабления находим:  $q = 2,5 \cdot 10^{-3}$  и  $b = 1,4$  м. Далее из (6) и (8) можно найти значение  $\Delta\vartheta \approx 0,04^\circ$ , определяющее разброс коэффициента отражения.

### Заключение

Схема ахроматического ослабления потока МРИ с использованием выпуклой сферической поверхности, рассеивающей излучение в условиях полного внешнего отражения, может быть применена для измерения излучаемой мощности при небольшом угловом размере плазменного источника. Коэффициент ослабления рассчитывается по формуле (11). Детектор требует надежного экранирования от паразитного рассеянного излучения и тщательной юстировки ввиду малых значений рабочих углов скольжения и небольшого отклонения лучей при отражении.

Работа поддержана грантом РФФИ 11-02-00492-а.

### Литература

1. Комpton А., Алисон С. Рентгеновские лучи. — Л.— М.: ОГИЗ, 1941.
2. Баранов А.М. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып.7. С.136.
3. Henke B.L., Gullikson E.M., and Davis J.C. // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1993. V. 54. No.2. P.181;
4. Данько С.А. Патент РФ № 2422854. БИ. 2011. № 18.
5. Henke B.L. // AIP Conf. Proc. 1981. No. 75. P. 85.
6. Bakshaev Yu.L., BartovA.V., BlinovP.I., Dan'ko S.A. et al. // Proc. of 18th Symposium on Plasma Physics and Technology. Prague. 1997. P. 45.
7. <http://www.ird-inc.com>

## Wide range attenuator for X-ray flux on the basis of the spherical mirror

*V.A. Bryzgunov and S.A. Dan'ko*

National Research Centre «Kurchatov Institute»  
1 Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russia  
E-mail: s.danko@mail.ru

*The earlier proposed arrangement for achromatic attenuation of the wide range soft X-ray flux in frames of geometric optics is analyzed. It is required for measurement of high power radiation, generated on pulsed power machines in favor of thermonuclear fusion. The total external reflection and scattering from the convex spherical surface is used in the device.*

PACS: 07.85.Fv, 52.70.La, 52.59.Qy, 52.50.Jm, 52.57.z

*Keywords:* plasma, Z-pinch, soft X-rays, X-ray detector, spherical mirror, total external reflection

Bibliography — 7 references

*Received November 27, 2013*