

01

Об уменьшении некогерентного рассеяния в рентгеновских волноводах вблизи края поглощения

© Л.И. Огнев

Институт ядерного синтеза, РНЦ „Курчатовский институт“,
Москва
E-mail: ognev@nfi.kiae.ru

Поступило в Редакцию 28 августа 2009 г.

На основе статистической теории рассеяния рентгеновского пучка в узком шероховатом коллиматоре исследуется роль некогерентного рассеяния в ослаблении прошедшего излучения. С помощью полученных приближенных выражений для коэффициентов затухания волноводных мод предсказывается эффект значительного снижения рассеяния вблизи краев поглощения за счет дисперсии, что можно наблюдать также и по уменьшению интенсивности обратнорассеянного пучка.

Для узких рентгеновских волноводных каналов, а также при невысоких энергиях излучения, особенно в каналах из легких материалов, требуется волновое описание распространения излучения в канале [1]. Как показано в работе [2], затухание пучка за счет поглощения и рассеяния на шероховатостях стенок канала будет иметь место даже при входе излучения вдоль оси канала. Обсуждению рассеяния в многослойных структурах посвящена работа [3].

В рамках квазиоптического приближения медленно меняющаяся амплитуда электрического вектора $A(x, z)$ в диэлектрическом канале находится из параболического уравнения, учитывающего рассеяние на малые углы.

Предполагая малое изменение $A(x, z)$ на длине корреляции шероховатостей l_{corr} , параболическое уравнение можно статистически усреднить [2] по реализациям случайной высоты шероховатостей по-

верхности стенок

$$2ik\partial\langle A\rangle/\partial z = \Delta_{\perp}\langle A\rangle + k^2\chi(x, z)\langle A\rangle - ik^2W(x, z)\langle A\rangle,$$

$$\langle A(x, z=0)\rangle = A_0(x), \quad (1)$$

где z и x являются координатами вдоль и поперек канала, $k = \sqrt{\varepsilon_0}(\omega/c)$ — волновое число, ε_0 и ε_1 — диэлектрическая проницаемость среды в канале и материала „стенок“, $\chi(x, z) = (\langle \varepsilon(x, z) \rangle - \varepsilon_0)/\varepsilon_0$,

$$W(x, z) = - (k(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)^2/4\pi\varepsilon_0^2) \times \int_{-\infty}^{+\infty} dz' \int_{-\infty}^{x/\sigma} \exp(-\xi^2) d\xi \int_{x/\sigma}^{\frac{x/\sigma - R(z')\xi}{(1-R^2(z'))^{1/2}}} \exp(-\eta^2) d\eta, \quad (2)$$

$R(z)$ — коэффициент автокорреляции, σ — дисперсия распределения высот шероховатостей.

Для захваченного излучения усредненная амплитуда волны $\langle A(x, z) \rangle$ может быть представлена в виде разложения по модам или собственным функциям $\varphi_l(x)$

$$\langle A(x, z) \rangle = \sum_l C_l(z) \varphi_l(x) \exp(-k_{lz}z - B_l z), \quad (3)$$

где коэффициенты затухания мод β_l могут быть найдены как интегралы перекрытия

$$\beta_l = -(k/2) \int \varphi_l^*(x) [\text{Im}(\chi(x) + W(x))] \varphi_l(x) dx.$$

Полагая в этих формулах $k_{lz} \approx \pi(l+1)/d$, коэффициент некогерентного затухания при рассеянии на шероховатостях с амплитудой σ можно приближенно записать [4] как

$$(\beta_{incoh})_l \approx \frac{\pi^2}{d^3} (l+1)^2 \sigma \sqrt{\pi} (\text{Re}(1 - \varepsilon_1/\varepsilon_0)) C_{lcorr}. \quad (4)$$

Для экспоненциальной автокорреляционной функции $R(z) = \exp(-z/l_{corr})$ коэффициент $C \approx 0.07$, если длина корреляции

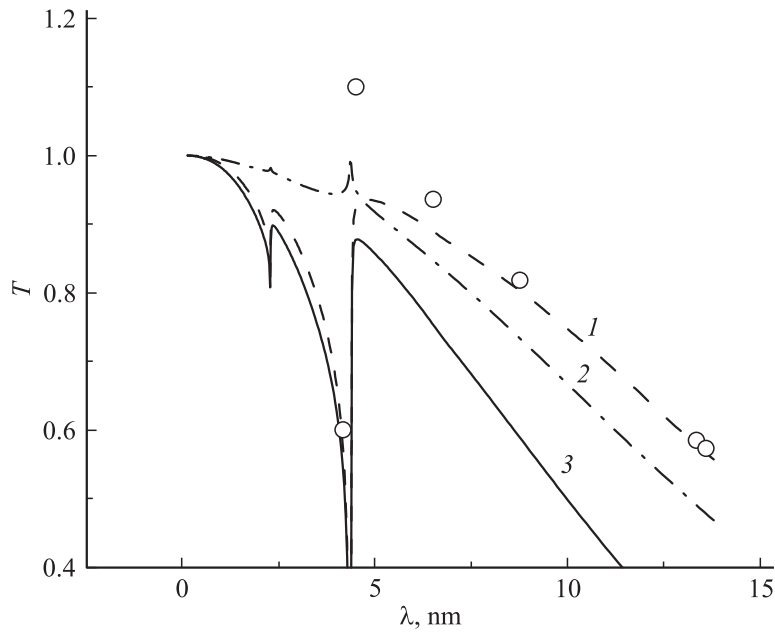


Рис. 1. Зависимость пропускания T от длины волны излучения при ослаблении рентгеновского пучка за счет поглощения (1), некогерентного рассеяния (2) в трековых каналах из майлара и суммарный эффект ослабления (3). Кружками показаны расчеты пропускания для гладких каналов в приближении параболического уравнения [8]. Диаметр канала равен 200 nm, длина $L = 22.5 \mu\text{m}$.

выражена в микронах [4]. Поглощение на стенках приводит к ослаблению излучения для l моды с коэффициентом

$$(\beta_{abs})_l \approx \frac{\pi^2}{d^3} (l+1)^2 \frac{\text{Im}(\epsilon_1/\epsilon_0)}{[\text{Re}(1 - \epsilon_1/\epsilon_0)]^{3/2}} \frac{\lambda^2}{(2\pi)^2}. \quad (5)$$

Можно также отметить, что выражение для коэффициента поглощения β_{abs} имеет ту же зависимость от параметров среды, что и линейная аппроксимация коэффициента отражения от гладкой поглощающей поверхности в приближении геометрической оптики [5]. В случае некоррелированных шероховатостей можно положить $l_{corr} \approx \sigma$ и ослабление

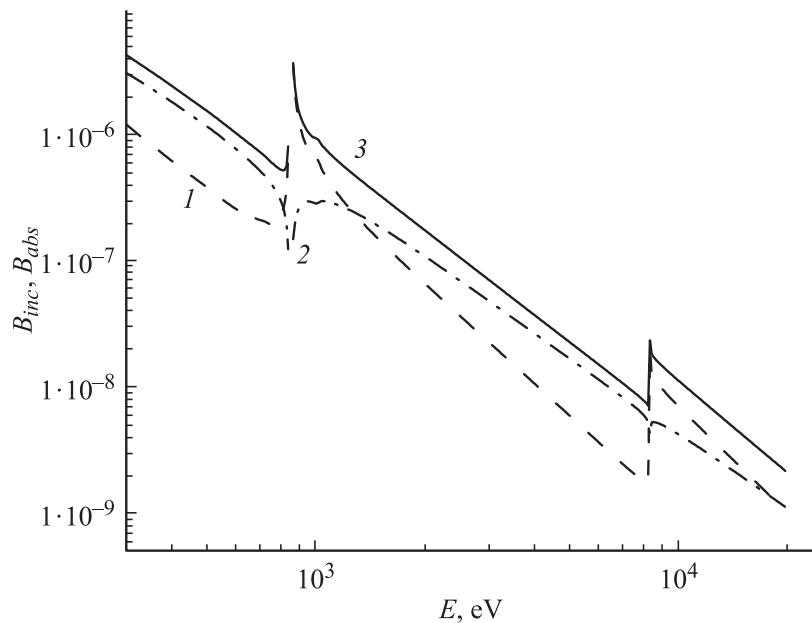


Рис. 2. Зависимость коэффициентов ослабления пучка в плоском никелевом канале от энергии излучения E за счет поглощения на стенках B_{abs} (1), некогерентного рассеяния B_{inc} (2) и общее затухание ($B_{abs} + B_{inc}$) (3). Амплитуда шероховатостей поверхности $\sigma = 50\text{\AA}$, корреляционная длина $L_{corr} = 1\ \mu\text{m}$.

пучка при некогерентном рассеянии становится квадратично зависимым от квадрата высоты шероховатостей σ^2 .

Выделяя в формулах (4) и (5) ширину канала d и модовые множители $(l+1)^2$, эти выражения можно переписать в виде обобщенных сечений рассеяния и поглощения

$$B_{incoh} = (\beta_{incoh})_l d^3 / (l+1)^2 \pi^2 \quad \text{и} \quad B_{abs} = (\beta_{abs})_l d^3 / (l+1)^2 \pi^2.$$

Расчеты вкладов некогерентного рассеяния и поглощения на стенках каналов в ослабление пучка производились в диапазоне энергий излучения 0.3–10 keV для кварца, майлара и никеля с использованием оптических констант из [6,7].

Оценка зависимости пропускания T от длины излучения в трековых каналах из майлара находилась по ослаблению основной моды из соотношения $T = \exp(-4\beta_0 L)$ с учетом геометрического фактора и приведена на рис. 1. Кружками показаны результаты расчетов в приближении параболического уравнения для гладких каналов [8]. Амплитуда шероховатостей выбрана равной 100\AA , корреляционная длина равна $0.1\ \mu\text{m}$, длина канала $L = 22.5\ \mu\text{m}$. Видно, что в реальных каналах суммарное ослабление с учетом рассеяния может быть существенно больше, чем в каналах без шероховатостей.

Дисперсионные свойства вещества в рентгеновской области энергий наиболее сильно проявляются вблизи L -края поглощения для веществ с большим атомным номером [6,7], поэтому именно здесь следует ожидать влияние дисперсии на некогерентное рассеяние рентгеновского пучка. Энергетическая зависимость обобщенных коэффициентов поглощения V_{abs} и рассеяния V_{inc} в никелевых плоских каналах показана на рис. 2. Следует подчеркнуть, что V_{abs} и V_{inc} не зависят от ширины канала.

Из рис. 2 видно, что вблизи края поглощения происходит существенное снижение интенсивности некогерентного рассеяния. Этот эффект можно наблюдать как по снижению фона обратного рассеяния рентгеновского излучения, так и по уменьшению ореола в угловом распределении прошедшего излучения при просачивании сквозь стенки каналов из легкого материала (майлар, кварц). Снижение некогерентного рассеяния на шероховатостях в области аномальной дисперсии вблизи края поглощения может быть объяснено уменьшением оптической плотности материала стенок волновода. При этом излучение проникает глубже в стенки и относительный вклад нерегулярной составляющей шероховатого переходного слоя в общее изменение фазы пучка уменьшается. В случае сильного поглощения (никель) оптимальную длину канала L для наблюдения эффекта уменьшения ореола следует выбирать из соотношения $d^3/(8\pi^2 V_{inc\text{coh}}) < L < d^3/(2\pi^2 V_{inc\text{coh}})$, где d — ширина плоского канала. Это соответствует расстоянию убывания интенсивности первой моды рентгеновского излучения. В случае 2-мерного канала оптимальная длина уменьшается приблизительно в 2 раза.

Работа проведена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках реализации ФЦП „Научные и педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2012 гг.

Список литературы

- [1] *Bergemann C., Keumeulen H., van der Veen J.F.* // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. P. 204801.
- [2] *Bobrova T.A., Ognev L.I.* // JETP Letters. 1999. V. 69. P. 734–738.
- [3] *Бушувев В.А., Сутырин А.Г.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2000. № 1. С. 82–85.
- [4] *Огнев Л.И.* Оптимизация компактного коллиматора Соллера. Препринт ИАЭ-6501/14. М., 2007.
- [5] *Виноградов А.В., Ковалев В.Ф., Кожевников И.В., Пустовалов В.В.* // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 2. С. 244–250.
- [6] *Diel I., Friedrich J., Kunz C., Di Fonzo S., Müller B.R., Jark W.* Appl. Opt. 1997. V. 36. P. 6376–6382.
- [7] *Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C.* // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1993. V. 54. N 2. P. 181–342.
- [8] *Митрофанов А.В., Попов А.В.* // Труды XIII Международного симпозиума „Нанозифика и наноэлектроника“. 16–20 марта 2009 г. Нижний Новгород, 2009. С. 204–205.