

05;07;12

Влияние эффекта периодического изгиба на волновое каналирование рентгеновских пучков

© Т.А. Боброва, Л.И. Огнев

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

Поступило в Редакцию 4 апреля 2000 г.

Исследовался эффект прохождения X -излучения через узкие хаотичные субмикронные каналы численным методом с учетом дифракции и снижения когерентности. Найдено, что прохождение существенно ухудшается в каналах с периодической деформацией. Эффекты хаотизации объяснены статистической теорией рассеяния X -лучей в хаотической переходной подложке. Возможное объяснение наблюдаемой аномальной энергетической зависимости прохождения через тонкий канал 1620 \AA Cr/C/Cr на 7 keV связывается с малой периодической связью структуры.

В отличие от случая многомодовых волноводов мягкого рентгена [3] лишь малое число мод бралось в рассмотрение для очень малых углов скольжения. Прохождение рентгеновской моды может быть описано в рамках "параболического уравнения" для электрического вектора $A(x, z)$ [4]:

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \Delta_{\perp} A + k^2 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} A,$$
$$A(x, z = 0) = A_0(x), \quad (1)$$

где z и x являются координатами вдоль и поперек канала (рассмотрение ограничено случаем 2-мерных каналов), $k = \sqrt{\varepsilon_0} \frac{\omega}{c}$. В данном случае ε_0 — это диэлектрическая проницаемость "канала", ε_1 — диэлектрическая проницаемость "стенок". Рассеянием на большие углы пренебрегаем [4]. Эволюция каналированного рентгеновского пучка рассчитывалась прямым интегрированием "параболического" уравнения [5]. Диэлектрическая проницаемость шероховатой поверхности случайной формы $x = \xi(z)$ была представлена как $\varepsilon(x, z) = \varepsilon_1 + (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)H(x - \xi(z))$, где $H(x)$ является ступенчатой функцией. Распределение высот шероховатостей предполагается нормальным.

Аналитические результаты ослабления когерентной части рентгеновского пучка вследствие шероховатостей могут быть получены статистическим усреднением уравнения (1). Можно показать, что для нижних каналированных мод ослабление при некогерентном рассеянии

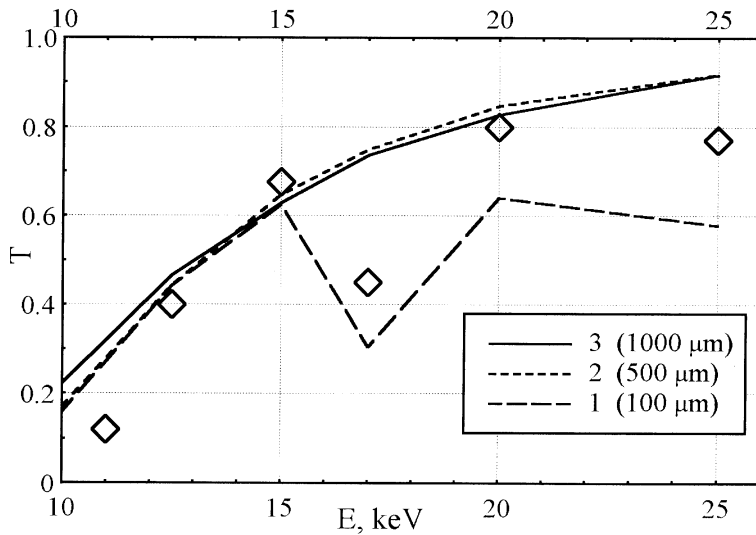


Рис. 1. Зависимость прохождения моды "0" при $L = 3$ mm, $d = 1620$ Å от энергии излучения E . Амплитуда деформации $a = 120$ Å, период $\Lambda = 100$ μm (1), 500 μm (2), 1000 μm (3). $\sigma = 0$ Å. Экспериментальные точки W. Jark et al. [1] показаны ромбиками.

пропорционально σ [6]

$$\beta_{scatter} \sim k^2(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)^2 \sigma \int_{-\infty}^{\infty} dz' \int_{-\infty}^0 \exp(-\xi^2/2) d\xi \int_0^{\frac{-R(z')\xi}{(1-R^2(z'))^{1/2}}} \exp(-\eta/2^2) d\eta,$$

где $R(z)$ — коэффициент автокорреляции.

Эксперименты с каналом Cr/Cr длиной $L = 3$ mm и толщиной $d = 1620$ Å угольного слоя [1] показывают немонотонную зависимость прохождения "0" моды (рис. 1, ромбы). Как предполагалось [1], шероховатость линии раздела не превышает ~ 10 Å.

Прямое численное моделирование прохождения рентгеновского пучка с помощью уравнения (1) было выполнено для исследования зависимости прохождения мод "0" и "1" от амплитуды шероховатостей. Учет шероховатостей уменьшает прохождение основной моды с $E = 17$ keV на величину 1.3% для $\sigma = 10$ Å и на 5% для $\sigma = 20$ Å, что не

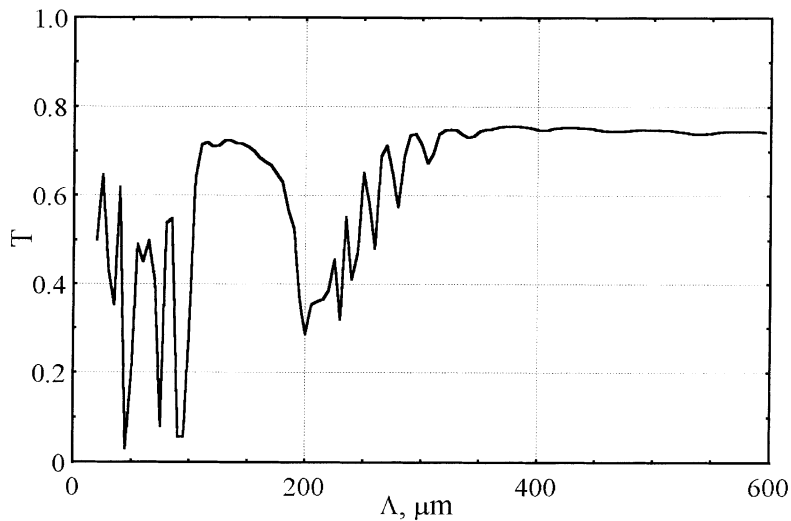


Рис. 2. Зависимость прохождения моды "0" $E = 17$ keV рентгеновского пучка в канале Cr/Cr, $d = 1620$ Å от периода деформации Λ . $\sigma = 0$ Å, $L = 3$ mm, $a = 120$ Å.

может объяснить провала на экспериментальной зависимости рис. 1 даже при значительно худших характеристиках границ раздела, учитывая линейный характер роста коэффициента ослабления от высоты шероховатостей.

Для объяснения аномальной зависимости прохождения основной моды с энергией 17 keV через каналы Cr/Cr было принято во внимание возможное присутствие периодических возмущений канала [2]. Результаты показаны на рис. 1 для амплитуды деформации $a = 120 \text{ \AA}$ и периодов $\Lambda = 100 \text{ \mu m}$ (кривая 1), 500 \mu m (2) и 1000 \mu m (3).

Зависимость прохождения от периода деформации Λ для $E = 17 \text{ keV}$ $a = 120 \text{ \AA}$ и без учета шероховатостей (влияние шероховатостей не существенно; см. выше) показано на рис. 2. В области коротких Λ можно заметить несколько резонансов. Можно отметить, что результаты, показанные на рис. 1 и 2, сходны со сложными эффектами сильной перестройки волновой функции каналированных электронов в сверхрешетках [5].

Таким образом, провал прохождения при энергии $E = 17 \text{ keV}$ на рис. 1, наблюдавшийся в [1], может быть объяснен периодическими возмущениями слоя Cr/Cr и интерференцией возникающих при этом высших волновых мод, что и приводит к возрастанию потерь рентгеновского пучка.

Список литературы

- [1] Jark W., Di Fonzo S, Soullie G., Cedola A., Lagomarsino S. // J. Alloys and Compounds. 1999. V. 286. P. 9–13.
- [2] Bobrova T.A., Ognev L.I. Abstracts of Intern. Conf. "Current Status of Synchrotron Radiation in the World". March 9–10, 2000. Moscow, Russia. P. 54.
- [3] Kukhlevsky S.V., Lubkovics G., Negrea K., Kozma L. // Pure Appl. Opt. 1999. V. 6. P. 97.
- [4] Bobrova T.A., Ognev L.I. // Письма в ЖЭТФ. 1999. V. 69. P. 686.
- [5] Bobrova T.A., Ognev L.I. // Phys. Stat. sol. (b). 1997. V. 203/2. R11.
- [6] Огнев Л.И. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 2. С. 47–52.