

О причине смены контраста на изображениях микротрубок в SiC с помощью синхротронного излучения

В. Г. Кон¹, Т. С. Аргунова^{2,3}, Ј. Н. Је³

¹ Национальн. Исследоват. центр «Курчатовский Институт», г. Москва

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, РАН, г. С.-Петербург

³ Университет науки и технологии, г. Поханг, Республика Корея

РСНЭ-НБИК, 14-18 ноября 2011 г., КИ, Москва

Pohang Light Source (PLS)

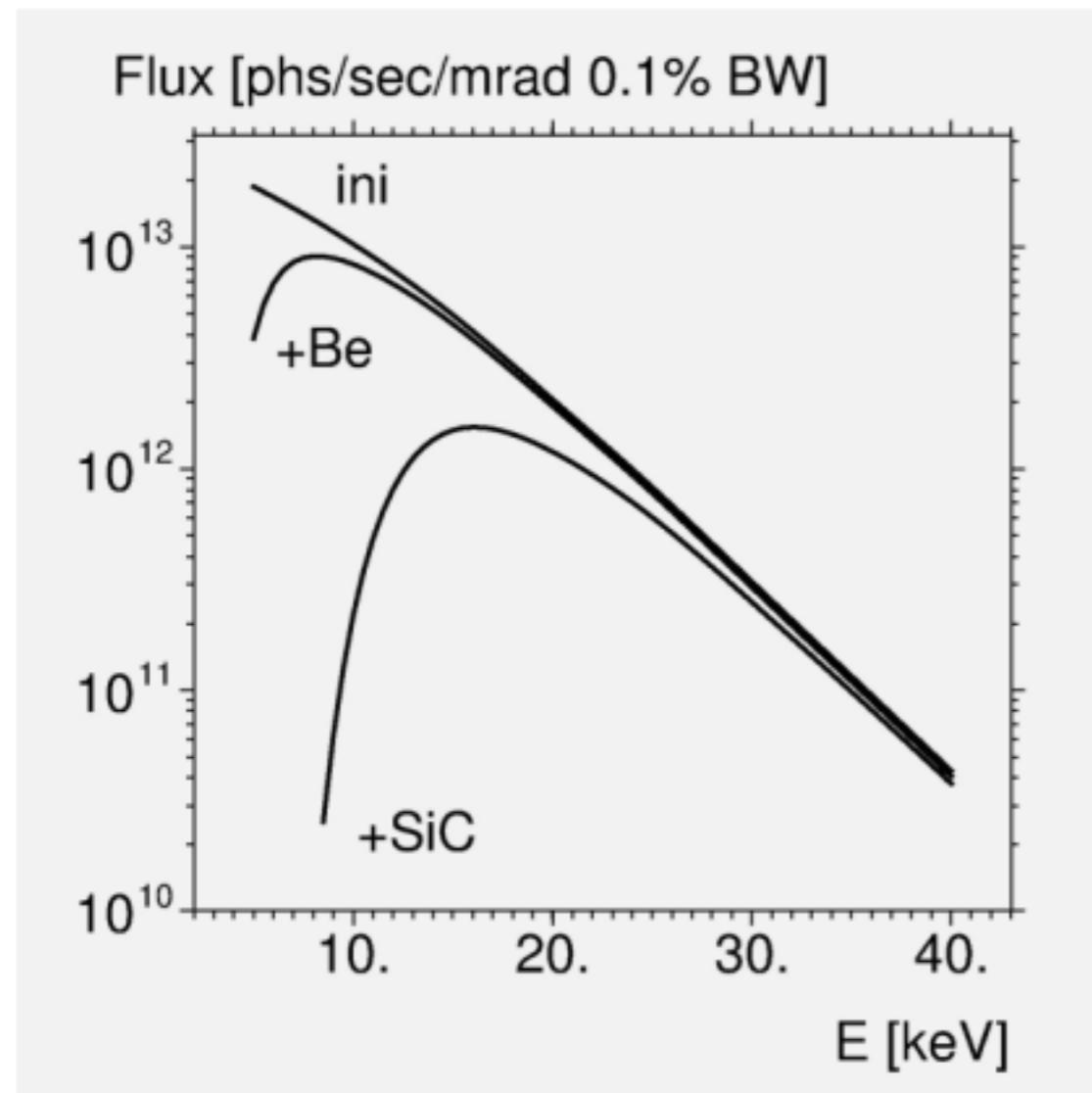


Вид на источник СИ 3-го поколения **Pohang Light Source** в городе Поханге, Республика Корея. Диаметр кольца: 144 м. Энергия: 2.5 GeV.

Источники СИ 3-го поколения обеспечивают высокую пространственную когерентность пучка. Для получения изображений от объектов с относительно малыми поперечными размерами большая степень монохроматичности не требуется. Изображения можно получить с помощью монохроматора низкого разрешения или даже совсем без монохроматора, то есть в белом пучке СИ [1].

[1] Kohn V.G., Argunova T.S., Je J.-H. Appl. Phys. Lett. 2007. V.91. P.171901.

Спектр излучения источника PLS



Немonoхроматический спектр СИ имеет форму кривой с максимумом при определенной энергии. Уменьшение интенсивности излучения с высокой энергией фотонов является следствием механизма генерации, а излучение низких энергий поглощается в кристалле. По этой причине даже "белое" СИ частично когерентно [1].

Спектры СИ, расчетанные с учетом поглотителей (Ве окно толщиной 2 мм (спектр +Be) и пластина SiC толщиной 490 мкм (спектр +SiC) и без учета поглотителей (спектр ini).

Станция 7B2: рентгеновская микроскопия



Общий вид станции 7B2 в 2008 г.
Подробное описание станции см. в [2].

Поворотный магнит обеспечивал
эффективный размер источника 60 мкм в
вертикальном направлении и 160 мкм – в
горизонтальном. Источник находился на
расстоянии 34 м от образца.

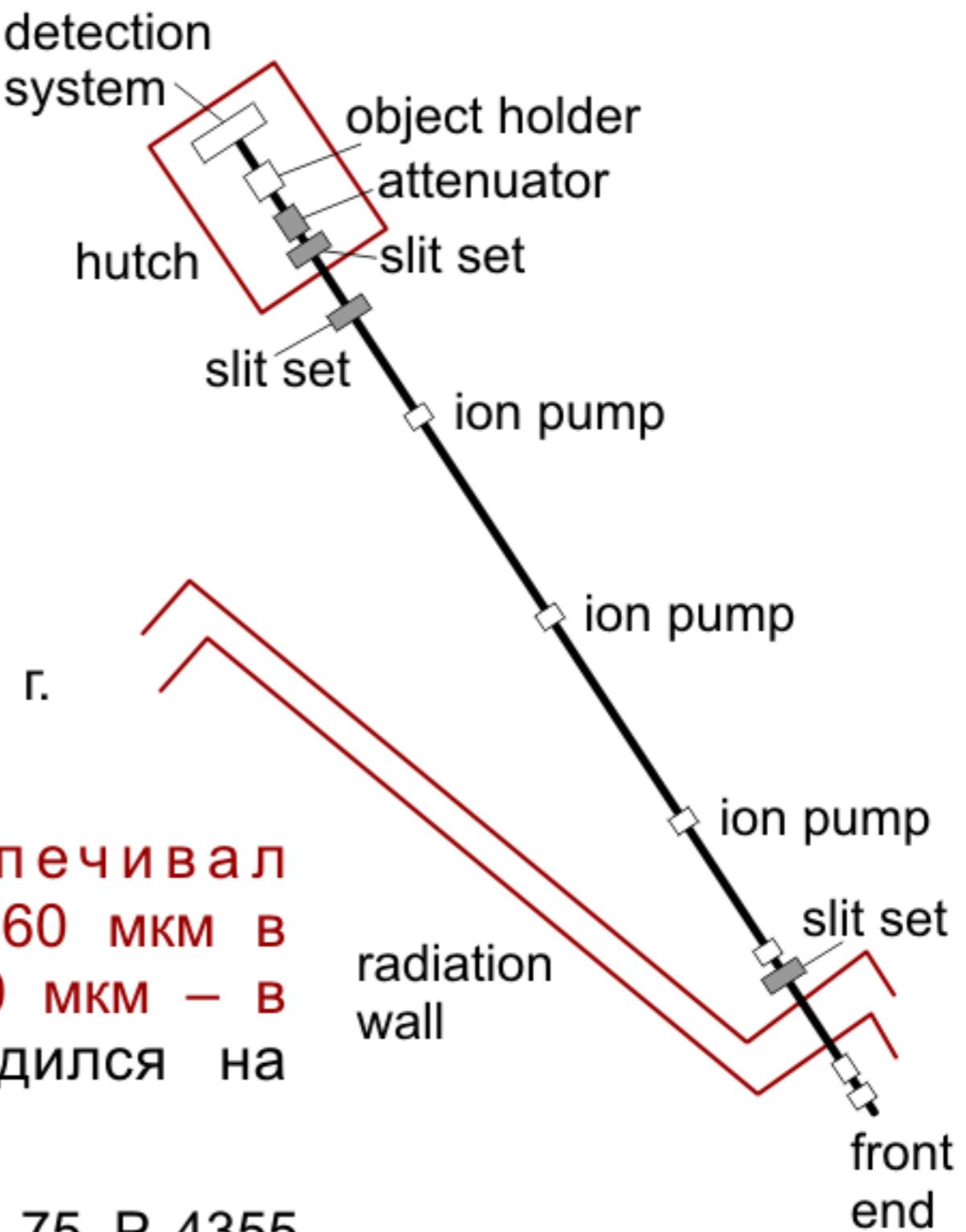


Схема эксперимента в белом СИ

Белое излучение за образцом попадало на кристалл-сцинтилятор CdWO_4 и возбуждало его свечение. Видимый свет отражался от пластины кремния и проходил сквозь **объектив**. Увеличенная картина регистрировалась на матрицу размером **1600x1200 пикс.** и чувствительностью **14 бит.** Размер поля зрения был 540 мкм (H), и размер пикселя - 0.34 мкм.

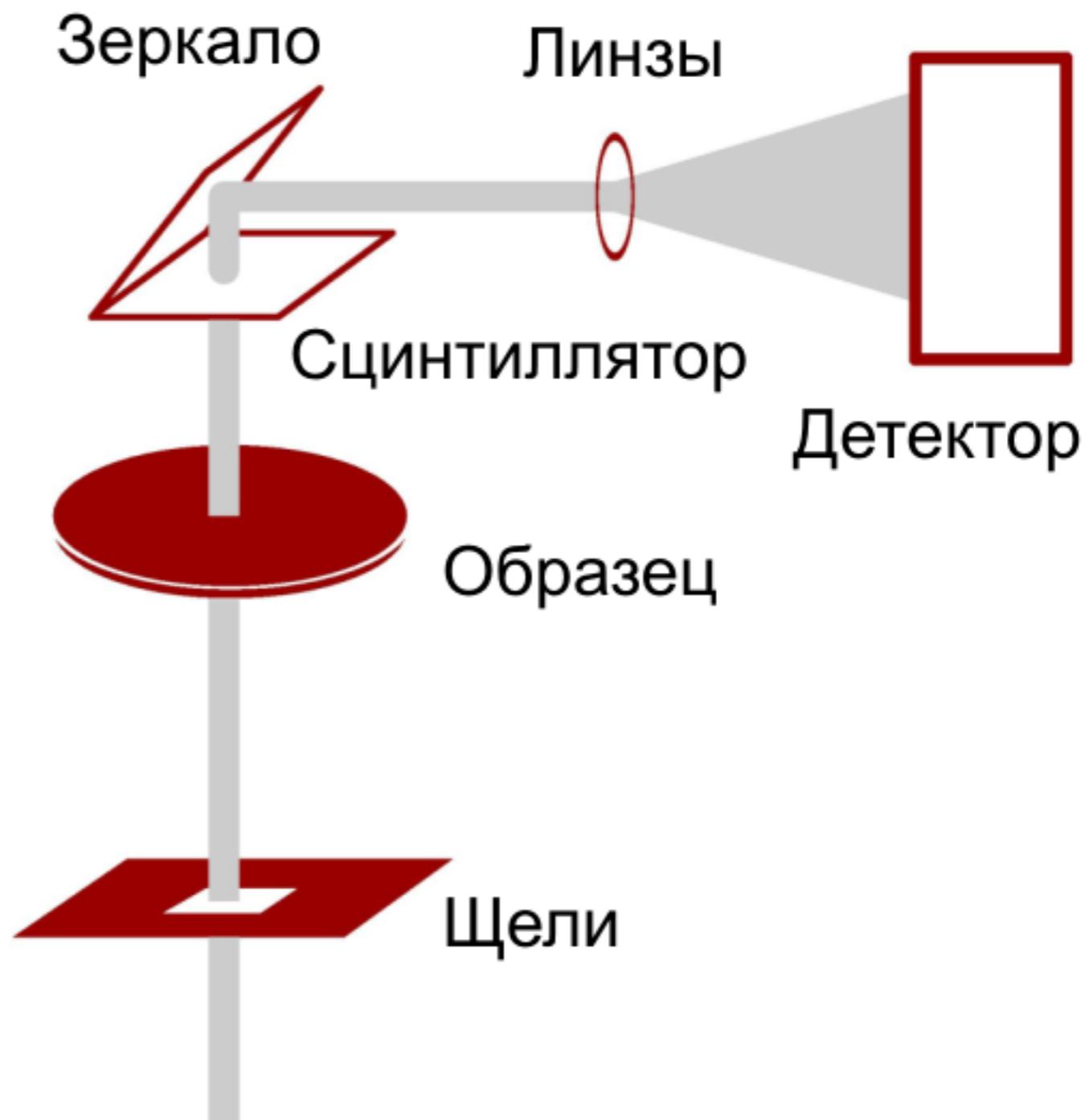
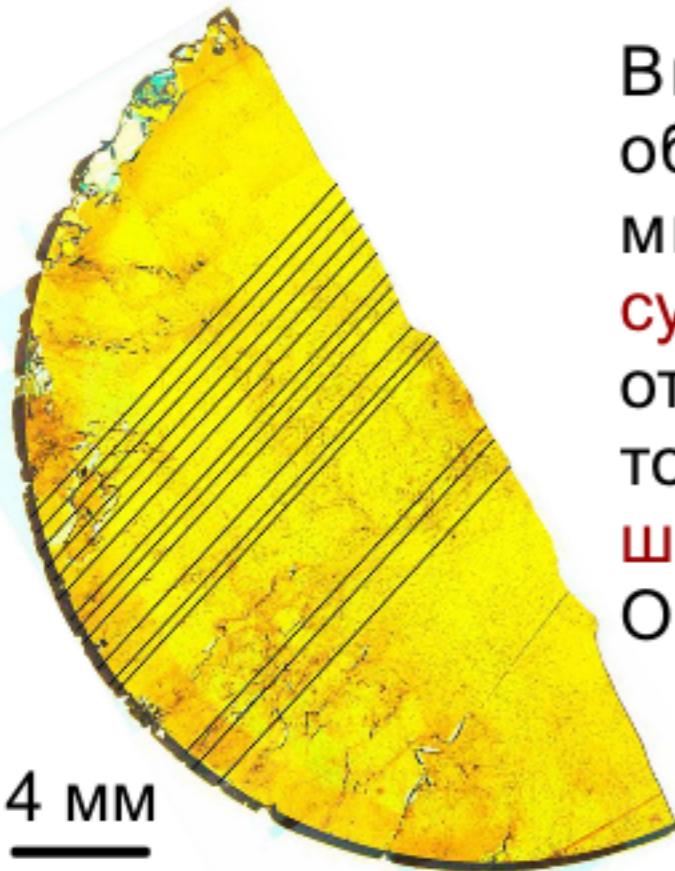


Схема эксперимента на станции 7В2 источника PLS

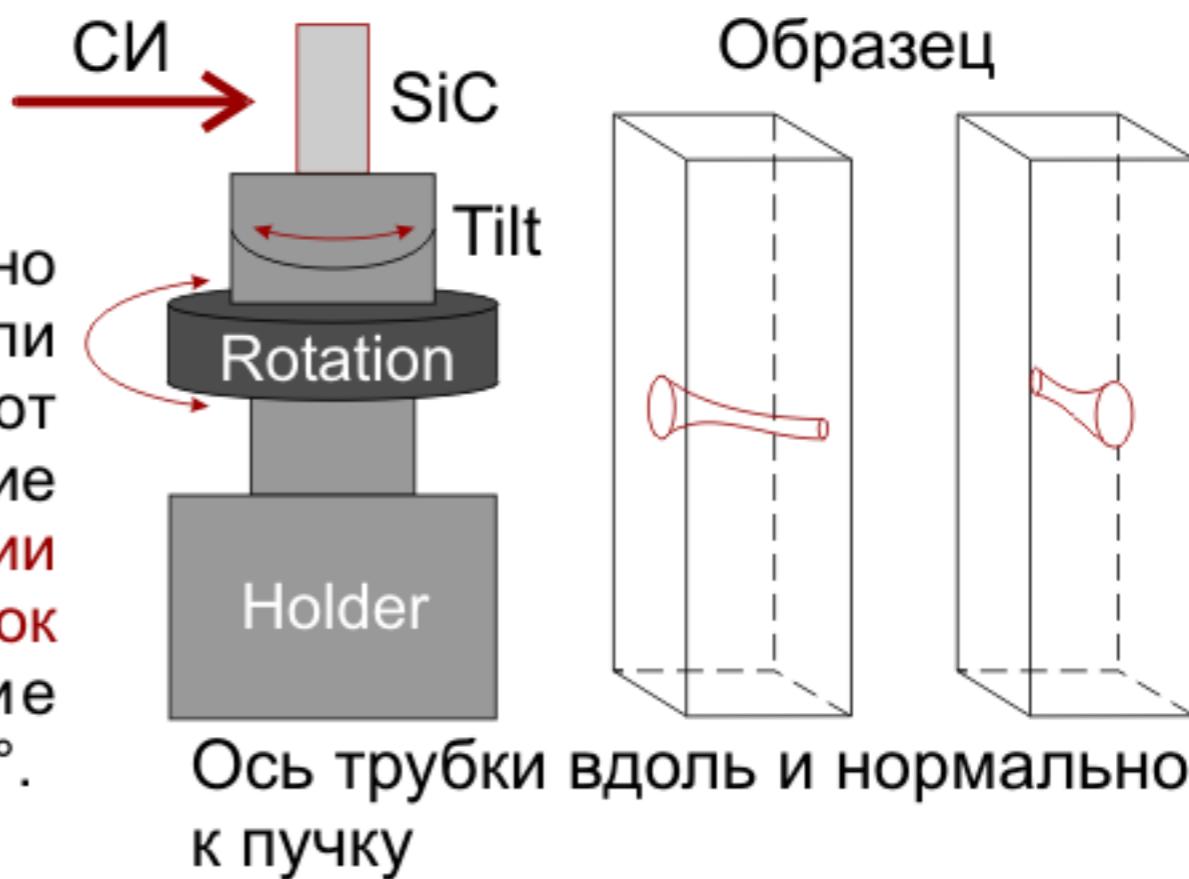
Образцы для исследования



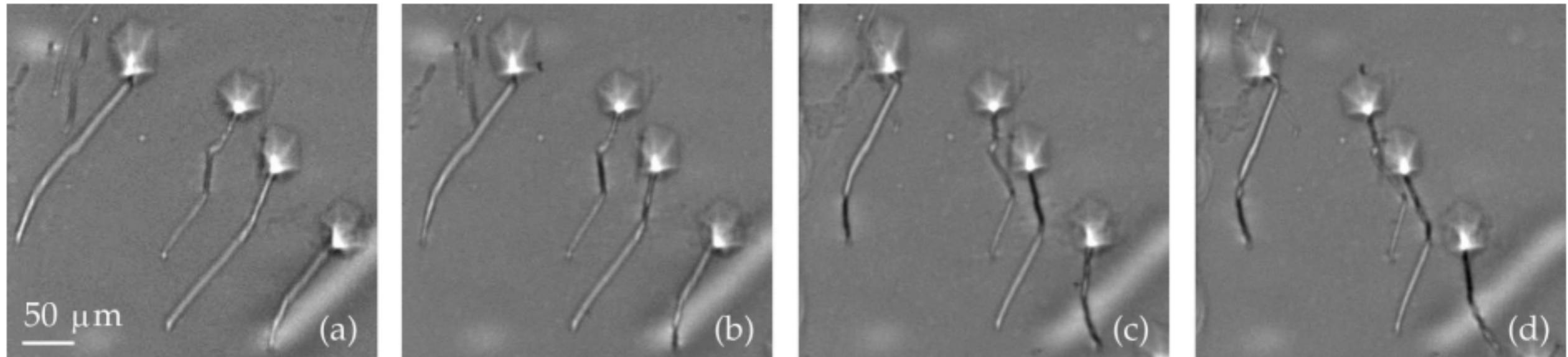
Выращивание кристаллов SiC сопровождается образованием цилиндрических пор, называемых микротрубками. **4H-SiC** был выращен **методом сублимации** с осью [0001]. Пластины с разориентацией относительно базиса на 8° были отполированы до толщины 0.49 мм. Одну из пластин разрезали на полоски шириной 0.5 мм, толщиной 0.49 мм и длиной 15 мм.

Оптическая микрофотография и расположение полосок.

Поверхность выставлялась перпендикулярно пучку; при этом оси микротрубок были перпендикулярны базису, отклоняясь от нормали к поверхности на 8° . Измерение изображений проводилось **путем трансляции и путем вращения образцов в виде полосок** вокруг вертикальной оси. Вращение осуществлялось в интервале 180° с шагом 2° .



Экспериментальные результаты



Типичные фазово-контрастные изображения микротрубок в образце карбида кремния измеренные путем вращения образца в виде полоски. Расстояние детектор-образец 6 см.

Можно видеть, что, местами, микротрубки отклоняются от оси роста на углы, существенно большие, чем угол разориентации от базиса 8° . Хорошо видна **смена знака контраста** вдоль осей микротрубок. Типичный контраст – темные края и светлая середина – сменяется полностью черным.

Теория

Одномерный случай. Монохроматическое излучение.

Интенсивность излучения на детекторе вычисляется как

$$I(x) = a(x_0), \quad a(x_0) = 1 + \int dx_1 P_K(x_0 - x_1, Z)[T(x_1) - 1]$$

$$Z = \frac{z_0 z_1}{z_t}, \quad z_t = z_0 + z_1, \quad x_0 = x \frac{z_0}{z_t}$$

z_0 – расстояние от источника до образца (десятки метров)

z_1 – расстояние от образца до детектора (сантиметры)

x – координата поперек оси микротрубки (микрометры)

Пропагатор Кирхгофа описывает перенос излучения по воздуху

$$P_K(x, z) = \frac{1}{(i\lambda z)^{1/2}} \exp\left(i\pi \frac{x^2}{\lambda z}\right)$$

λ – длина волны рентгеновского излучения

Функция $T(x)$ описывает перенос излучения через объект

$$T(x) = \exp \left[(iP + M) \left(1 - \frac{x^2}{R^2} \right)^{1/2} \right], \quad P = \frac{4\pi}{\lambda} \delta R_0, \quad M = P \frac{\beta}{\delta}$$

формула справедлива при $|x| < R$, и $T(x) = 1$ при $|x| > R$.

Здесь $2R$ и $2R_0$ – диаметры эллиптического сечения микротрубки пучком поперек и вдоль пучка, $\delta - i\beta = 1 - n$, n – комплексный показатель преломления среды образца

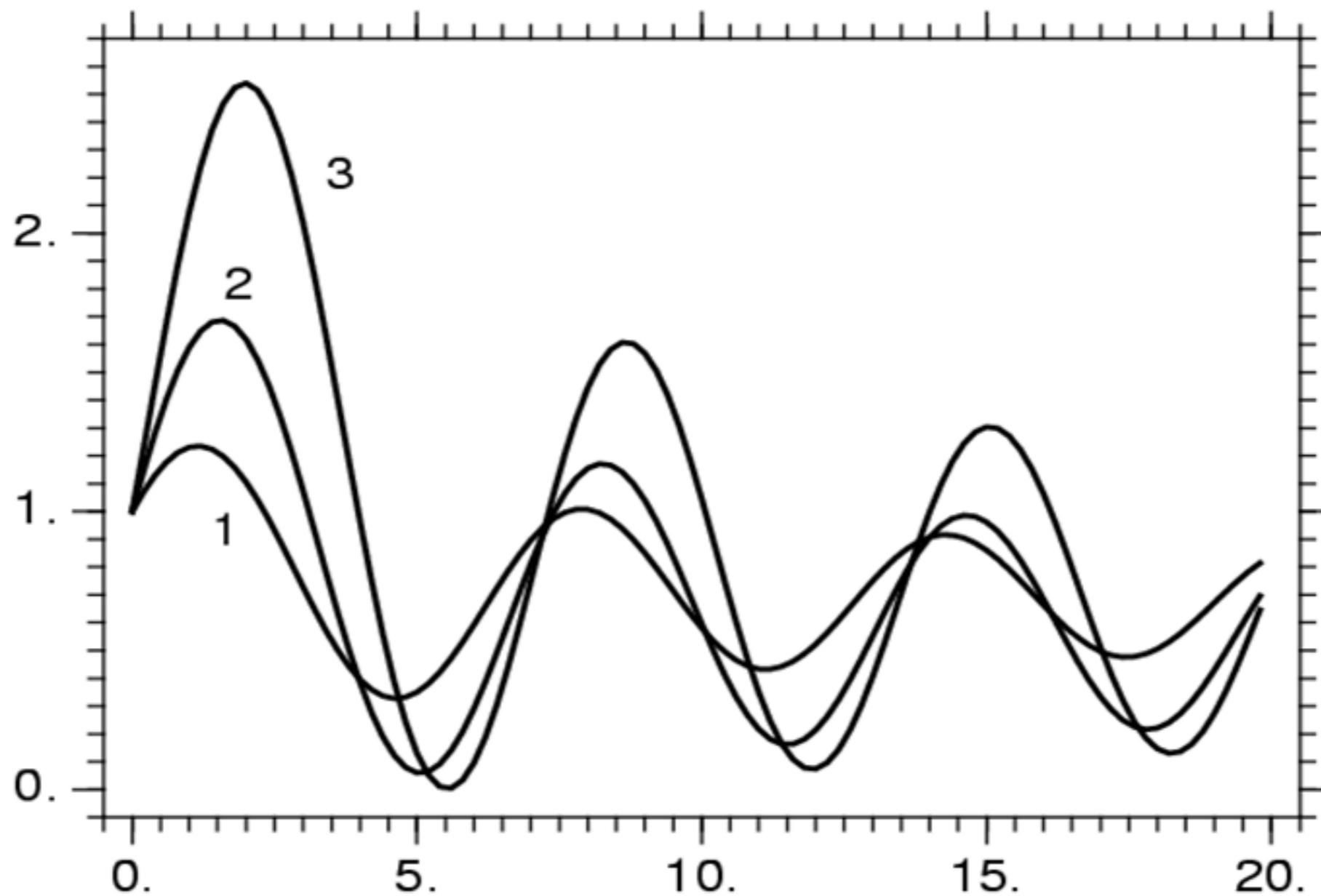
Обычно $z_1 \ll z_0$ и на качественном уровне можно использовать приближение падающей плоской волны. Важное значение имеет такой параметр, как радиус первой зоны Френеля $r_1 = (\lambda z_1)^{1/2}$. Если $2R < r_1$ то можно использовать приближение дифракции Фраунгофера и пренебречь членом $\pi(x_1/r_1)^2$ при вычислении интерала. Также можно пренебречь поглощением так как $M \ll 1$.

При указанных условиях получаем

$$a(x) = 1 + \frac{2R}{i^{1/2}r_1} \exp\left(i\pi \frac{x^2}{r_1^2}\right) B(x)$$

$$B(x) = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 dt \exp(-i\frac{x}{x_0}t) [\exp(iP(1-t^2)^{1/2}) - 1], \quad x_0 = \frac{r_1^2}{2\pi R}$$

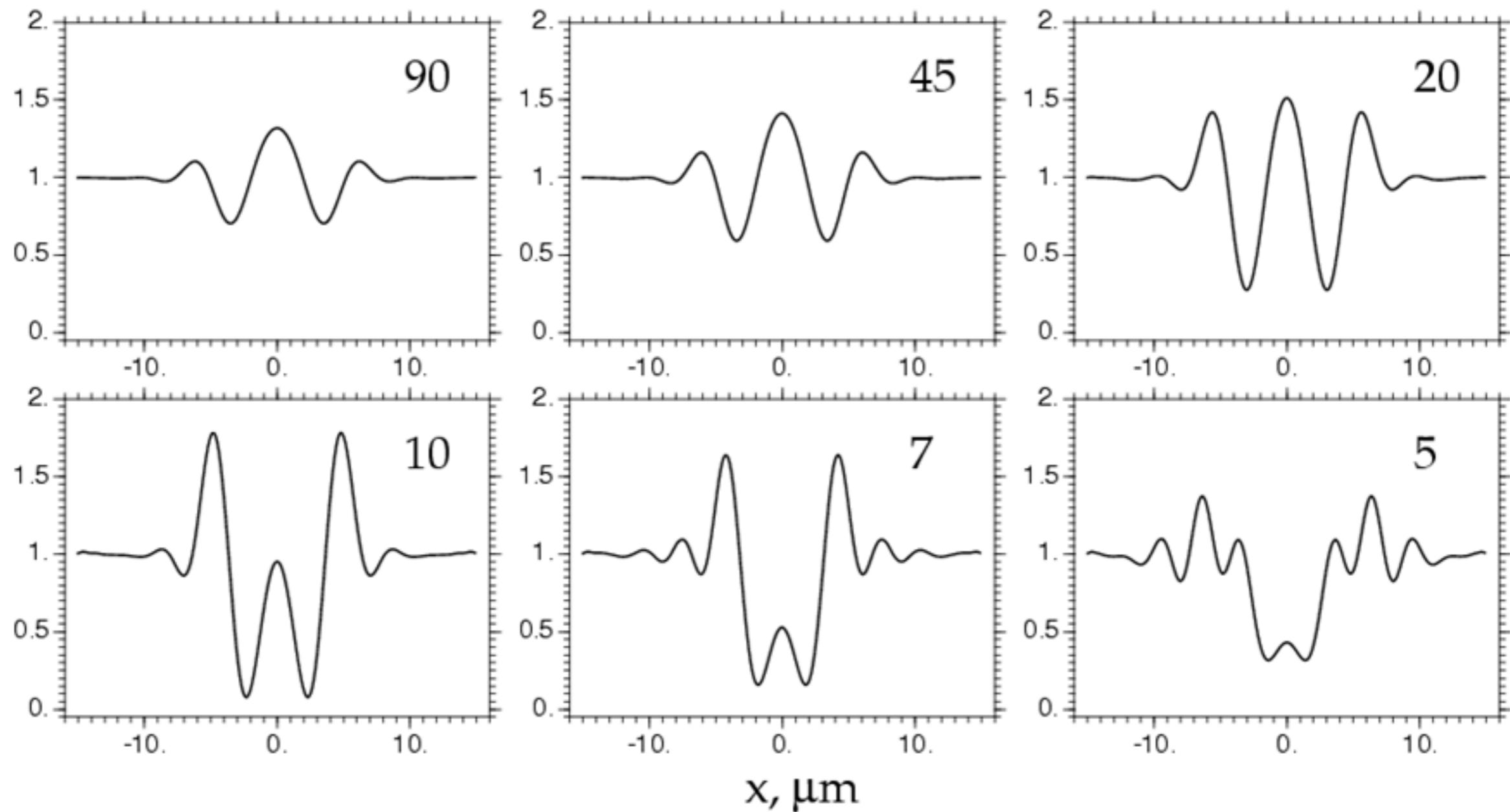
Раньше (J. Phys. D., 2010, 43, N.442002; Поверхность, 2011, N.1, с. 5-10) был рассмотрен случай с $P \ll 1$. Это выполняется для мелких микротрубок, ориентированных перпендикулярно пучку. В общем случае $P = P_0/\sin(\alpha)$, где α – угол между осью микротрубки и направлением пучка. Даже если $P_0 \ll 1$ можно получить условие $P \gg 1$ при малых значениях угла α . В такой постановке относительная интенсивность зависит от трех безразмерных параметров: P , $s = 2R/r_1$ и x/r_1 . Даже при $x = 0$ аналитическое выражение для интеграла очень сложное и проще сделать численный расчет.



Зависимость относительной интенсивности $I(0) = |a(0)|$ для монохроматического излучения в центре изображения от безразмерного параметра P при различных значениях параметра s : 0.3 (кривая 1), 0.6 (кривая 2) и 0.9 (кривая 3).

Для сравнения расчетных изображений с изображениями, полученными в экспериментах с белым пучком, необходимо проводить суммирование кривых, соответствующих разным длинам волн λ с учетом реального спектра излучения. Так как параметр P линейно зависит от λ (с учетом того, что $\delta \propto \lambda^2$) то при больших значениях P и с учетом большой ширины спектра излучения от поворотного магнита заметить осцилляции контраста в зависимости от угла наклона α невозможно, то есть при малых углах наклона контраст всегда черный.

Этот результат следует из расчетов по программе FIMTIM. Эта программа описана в Appl. Phys. Lett., 2007, 91, N.171901; Appl. Phys. Lett., 2008, 93, N. 151905; Поверхность, 2008, N.12, с.48-53; phys. stat. sol. (a) 2009, 206, р. 1833-1837.



Зависимость относительной интенсивности от координаты x для белого пучка СИ, соответствующего условиям эксперимента на источнике СИ в Поханге, $z_1 = 30$ см, $2R = 2R_0 = 3$ мкм, значение угла α проставлено на графиках.