

# **Выявляемость микропор в SiC методом фазовоконтрастных изображений в белом синхротронном излучении**



**Т. С. Аргунова, ФТИ РАН им. А. Ф. Иоффе, С-Петербург**

**В. Г. Кон, РНЦ "Курчатовский Институт", Москва**

**Jung Ho Je, X-ray imaging center, Pohang University, Korea**

Экспериментально изучена и теоретически объяснена интересная особенность фазово-контрастных изображений микротрубок в SiC в белом пучке СИ, состоящая в том, что изменение размеров сечения микротрубки не приводит к изменению размеров ее изображения, а влияет только на контраст.

Этот эффект объясняется:

*с одной стороны, малым набегом фазы, создаваемом микротрубкой;*

---

*а с другой стороны, выполнение условий для дифракции Фраунгофера.*

---

*Как правило, в рентгеновской оптике выполняются условия ближнего поля. Но трубы столь малы, что к ним стандартная теория неприменима.*

---

*Получен универсальный профиль распределения интенсивности для микротрубок с малым сечением.*

## Карбид кремния (SiC) -

Микротрубки и микропоры в SiC

Рис.1.  
Изображения  
микротрубок  
в SiC на СИ  
топограмме.

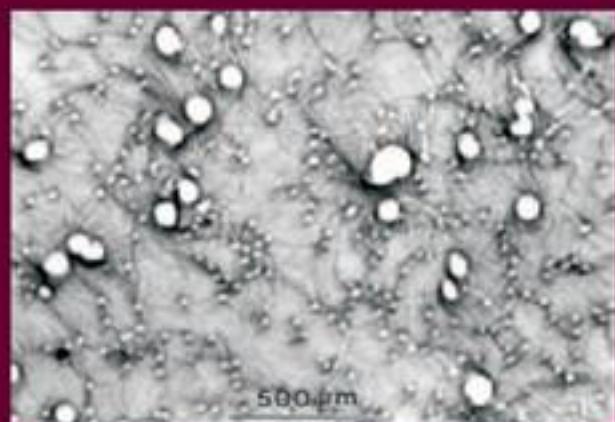


Рис. 2.  
Фазово-конт-  
растное  
изображение  
в белом СИ.



перспективный материал  
электронной техники

вызывают электрический пробой  
в приборах на его основе.

Рис. 3.  
Оптическая микро-  
фотография в  
проходящем  
свете.

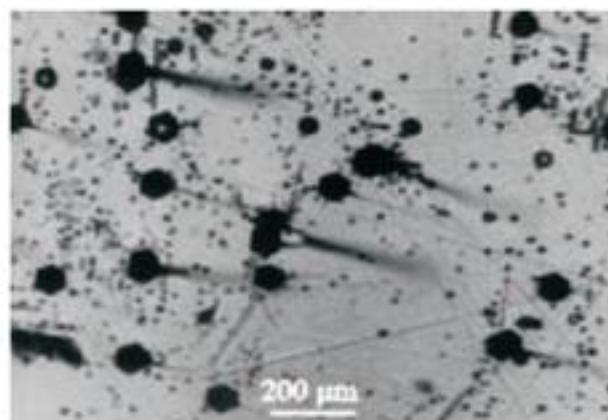
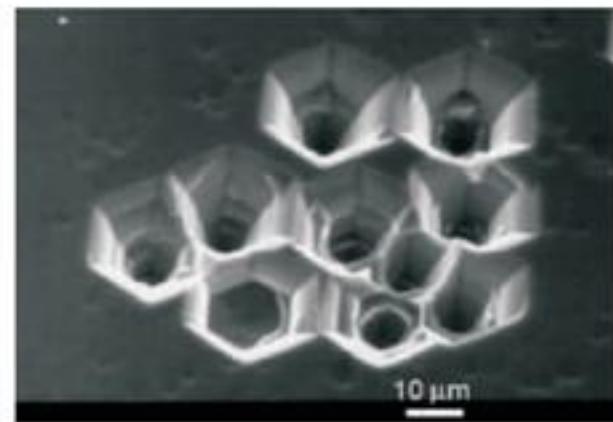


Рис. 4.  
Изображение  
получено  
сканирующей  
электронной  
микроскопией.



## Схема эксперимента

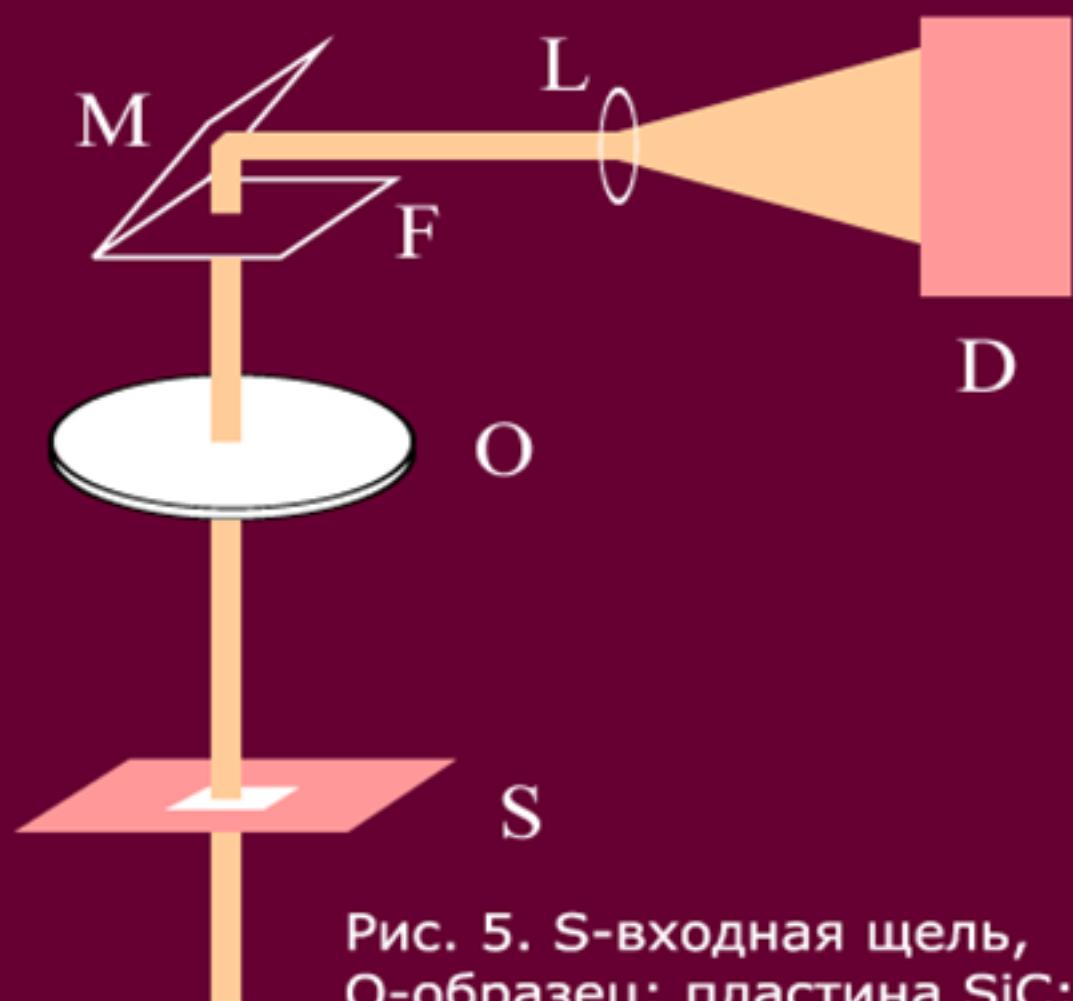


Рис. 5. S-входная щель,  
О-образец: пластина SiC;  
F-кристалл-сцинтиллятор;  
М-зеркало; L-система линз;  
D-детектор (ПЗС матрица).

## Pohang Light Source - источник СИ 3-го поколения



Рис. 6. LINAC - 2.5 GeV. Длина  
орбиты - 144 м.  
Эффективный размер фокуса:  
160 микрон (H) x 60 микрон (V)  
на станции 7B2.

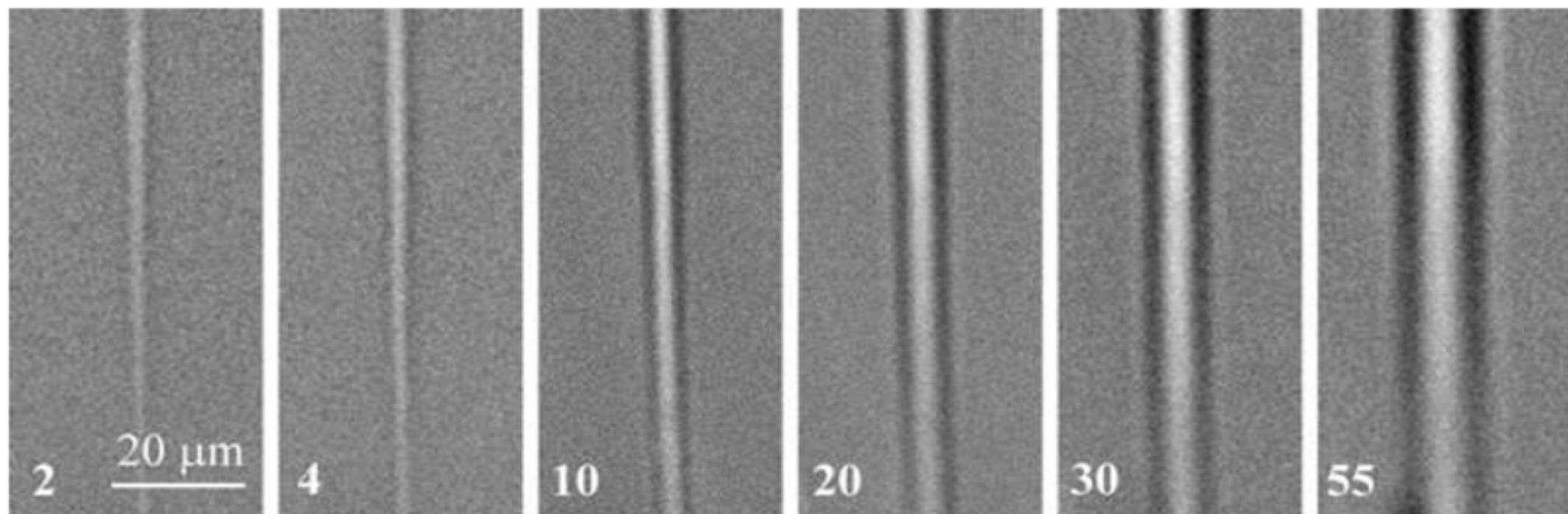


Рис. 7. Серия изображений отдельной микротрубки, полученная на разных расстояниях от образца. Расстояния в см указаны числами на фрагментах.

*В диапазоне расстояний 10 - 55 см можно видеть изменение контраста микротрубки при движении вдоль ее оси, однако никаких причин для такого уменьшения контраста вроде бы нет. Решение этой загадки представлено в данной работе. Оказывается, изменение контраста является признаком изменения сечения самой микротрубки.*

## Моделирование изображений с помощью программы FIMTIM

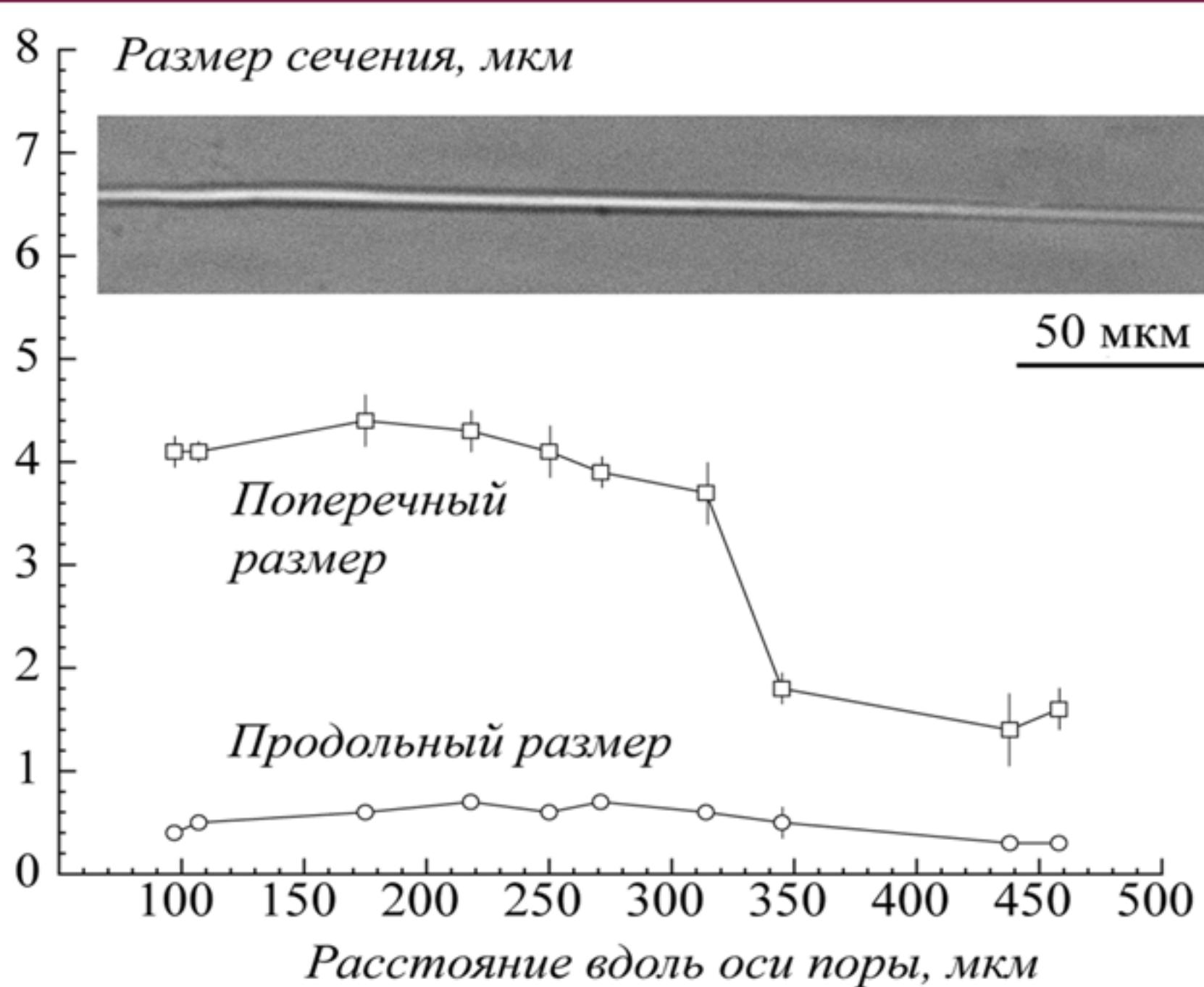


Рис. 8. Изображение отдельной микротрубы (верхний фрагмент) и график зависимости поперечного и продольного диаметров ее сечения от положения вдоль оси трубы. Диаметры получены методом подгонки, используя компьютерное моделирование изображений. Поперечный диаметр изменяется почти вдвое, в то время как размер изображения почти не изменился.

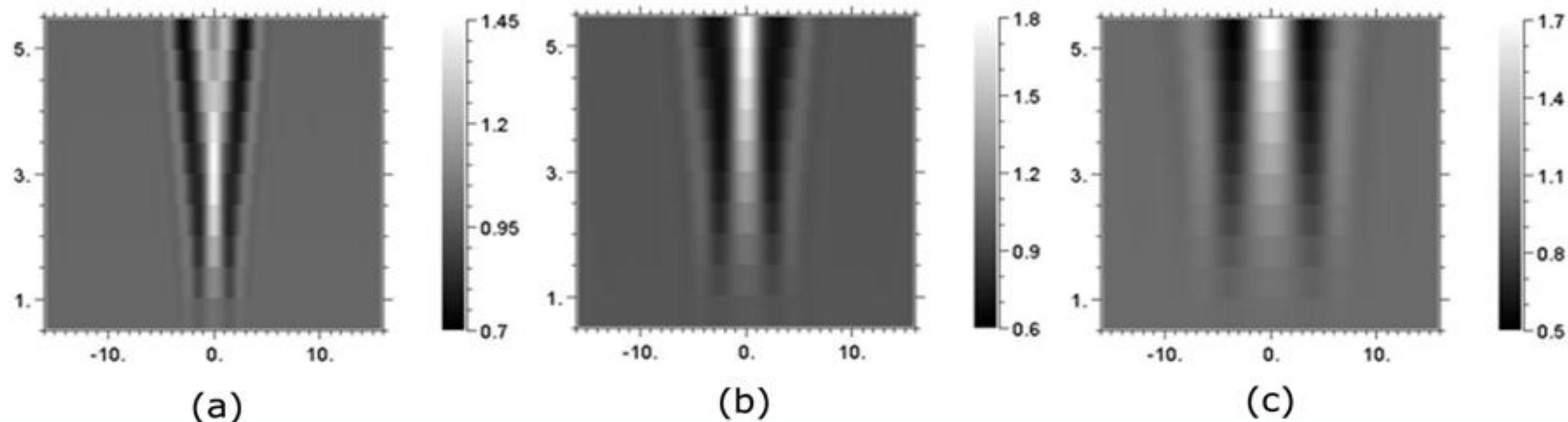


Рис. 9. Расчетные изображения микротрубки с уменьшающимся сечением.

(a) -  $z=5$  см, где  $z$  - расстояние от образца до детектора;

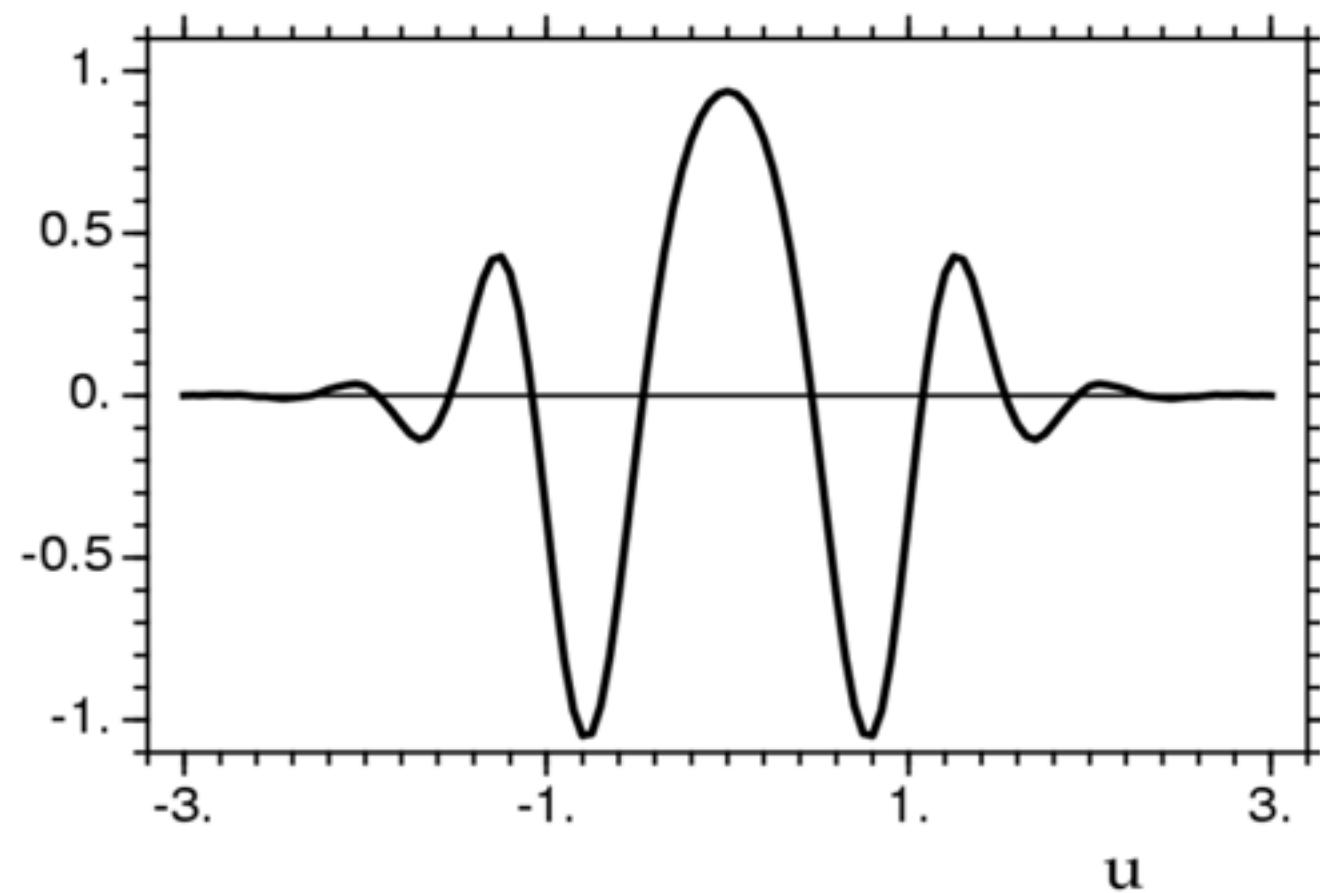
(b) -  $z = 15$  cm, (c)  $z = 35$  cm.

Диаметр в микронах показан на левой вертикальной панели.

Толщина Ве окна равна 2 мм; толщина пластины SiC равна 450 микрон.

Видно, что истинный размер микротрубки проявляется только через контраст.

С



**Рис. 10. Универсальный профиль интенсивности поперек изображения мелкой микротрубки. Универсальное изображение имеет вид френелевской зонной пластиинки со светлой центральной зоной и радиусами зон  $x_n = (4n-3)(\lambda z_1)^{1/2}/2$ .**

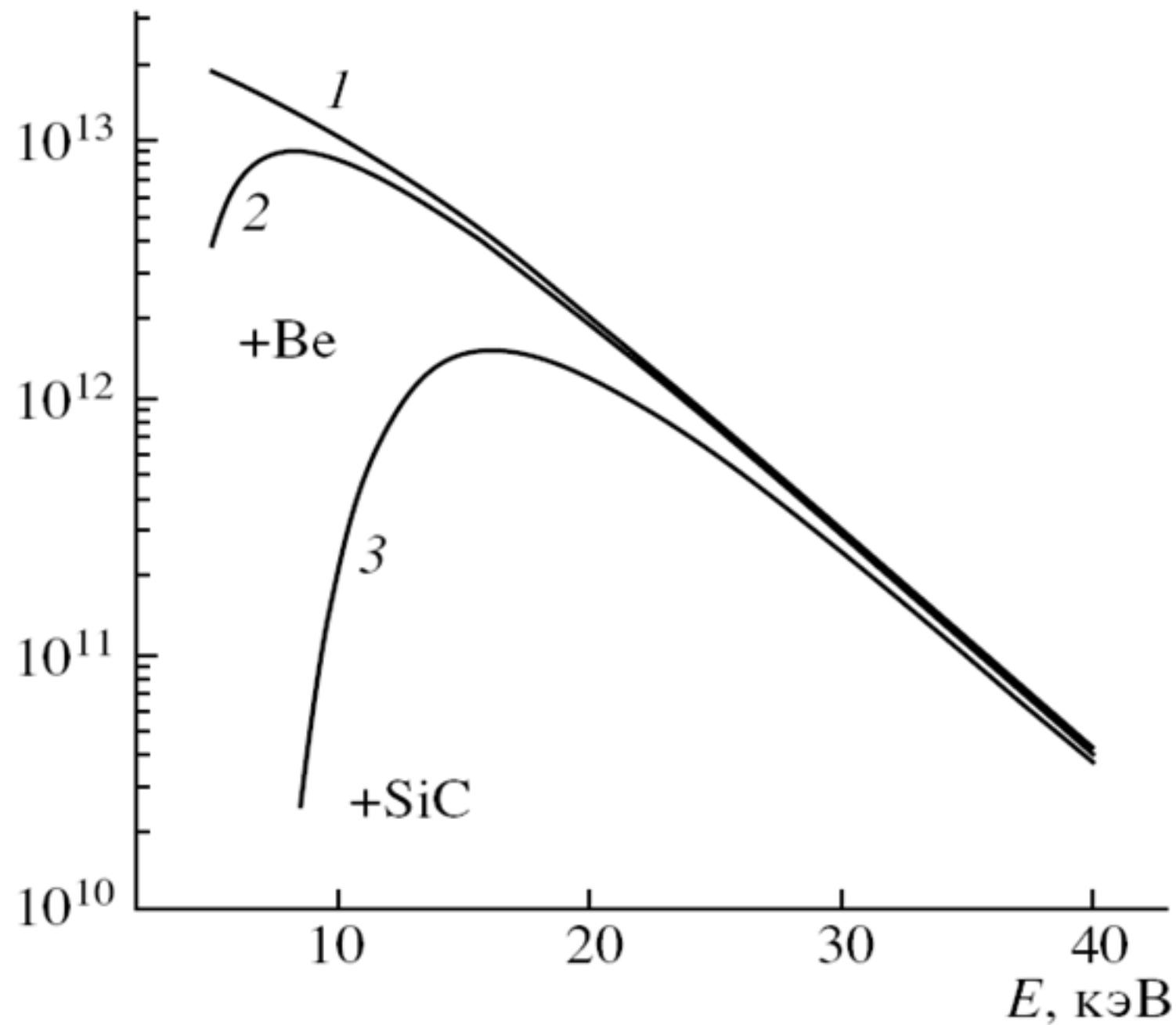
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На больших расстояниях от образца фазовый контраст микротрубок с малым сечением просто пропорционален продольному радиусу микротрубки.

В этом случае выполняются условия дифракции Фраунгофера, и изображения представляют собой стандартный вид зон Френеля, размеры которых зависят только от расстояния, а радиус микротрубки просто линейно масштабирует контраст.

*В результате изображение имеет стандартный характер, а по величине контраста можно определить только площадь сечения микротрубки.*

Поток, фотон/с/мрад/0.1% ( $\Delta E/E$ )



1 - исходный спектр  
2 - спектр с учетом  
поглощения в Be окне  
3 - спектр с учетом  
дополнительного  
поглощения в образце.

Спектр имеет четко  
выраженный максимум  
при энергии 16 кэв.

Эффективный спектр белого СИ для расчетов

## *Метод расчета (в параллельном пучке)*

$$I(x) = |a(x)|^2,$$

$$a(x) = 1 + \int dx_1 P(x - x_1, z) [T(x_1) - 1].$$

## *Пропагатор Киркгофа*

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

*x - поперечная координата (микрометры)*

*z - продольная координата (сантиметры)*

*$\lambda$  - длина волны монохроматической гармоники*

## **Транспарантная функция сечения микротрубы**

$$T(x) = \exp[(iP + M)(1 - x^2 / R^2)^{1/2}],$$

$$P = (2\pi / \lambda)\delta R_0, \quad M = P\beta / \delta.$$

*n = 1 - δ + iβ - коэффициент преломления  
R, R₀ - поперечный и продольный радиусы  
эллиптического сечения, если они малы, то  
поглощением можно пренебречь, а экспоненту  
разложить в ряд, сохраняя лишь линейный член.*

*Важные условия: R < r₁ = (λz)¹/², P < 1/2*

*Тогда интеграл вычисляется аналитически*

$$a(x) = 1 + i^{1/2} \frac{2\pi^2 \delta}{\lambda r_1} R R_0 \exp\left(i\pi \frac{x^2}{r_1^2}\right) b(x),$$

$$b(x) = \frac{2x_0}{x} J_1\left(\frac{x}{x_0}\right), \quad x_0 = \frac{r_1^2}{2\pi R},$$

$$I(x) \approx 1 + \frac{4\pi^2 \delta}{\lambda r_1} R R_0 b(x) \cos\left(\pi \frac{x^2}{r_1^2} + \frac{\pi}{4}\right)$$

*J<sub>1</sub>(z) - функция Бесселя первого порядка, b(0) = 1,*

*C(u) = (< I(x) > - 1) R\_1^2 / (R R\_0) - универсальный контраст,,*

*где u = x/r\_1, R\_1^2 = \lambda r\_1 / (2^{3/2} \pi^2 \delta)*