

Компьютерное моделирование фазово-контрастных изображений в белом синхротронном излучении на примере микротрубок в карбите кремния

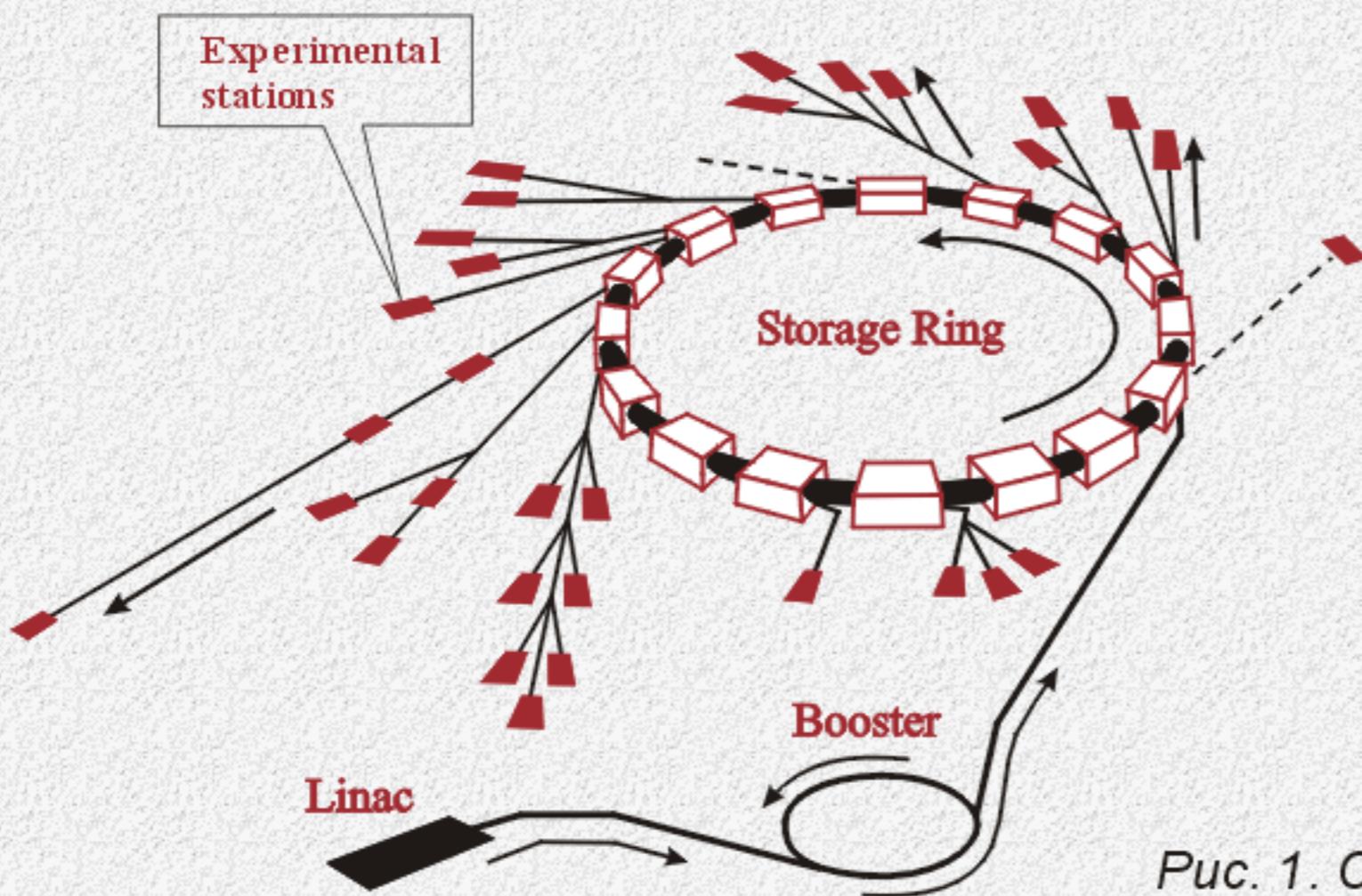


Т. С. Аргунова, ФТИ РАН им. А. Ф. Иоффе, С-Петербург

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

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

Высокая когерентность пучка источников синхротронного излучения (СИ) третьего поколения делает возможным получение фазово-контрастных изображений микро-объектов.



Источник СИ малого размера, расположенный на большом расстоянии от объекта, создаёт пучок с малой угловой расходимостью.

При этом временная расходимость задаётся самими исследователями.

Для этой цели обычно используют кристаллы-монохроматоры, выполняющие несколько функций одновременно.

Рис. 1. Схематическая диаграмма, показывающая накопительное кольцо электронов, решётку магнитов и форму орбиты.

Pohang Light Source - источник СИ 3-го поколения; г. Поханг, Республика Корея.



Линейный ускоритель: 2.5 Гэв.

Длина круговой орбиты: 144 м.

**Эффективный размер источника:
160 микрон (H) x 60 микрон (V).**

**9 VUV станций и 18 рентгеновских
станций.**

**Исследования проводились на
станции 7B2: рентгеновская
микроскопия.**

**Рис. 2. Накопительное кольцо, экспериментальный зал, линейный ускоритель
и технические здания на территории Pohang Light Source.**

Interaction of micropipes with foreign polypeptide inclusions in SiC

M. Yu. Gutkin and A. G. Sheinerman
Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences,
199178 St. Petersburg, Russia

T. S. Argunova
Ioffe Physics-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia
and Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology,
San 31 Hyoja-dong, Namdaemun, Pohang 790-784, Korea

J.-M. Yi, J.-H. Je
Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
373-1 Hyoja-dong, Yusong, Taejon 305-701, Korea

093518-3 Gutkin et al.

S. S. Nagalyu
Ioffe Physics-Technical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

G. Margariton
Institute de Physique de la Matière Condensée, EPFL, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Y. Hwu
Institute of Physics, Academia Sinica, Nankai, Tainan, Taiwan 700-794, Taiwan

(Received 22 January 2006)

Synchrotron PL photoluminescence inclusions in 4H-SiC confirm that MP formation is equilibrium process. Experimental results are supported by simulation of MP expansion in SiC.

I. INTRODUCTION

Due to its large band gap, high breakdown voltage, high-power, high frequency, and high-temperature resistant devices (see, e.g., significant progress in SiC bulk crystals still have defects, which strictly limit their applications.^{1–11}) Defects include inclusions, stacking faults, macropores, etc.¹¹ Inclusions in SiC are micro-pores, low cores of screw dislocations. The diameters of MP are small and they commonly penetrate the section and thread the c-axis.

Different authors at presence of second polytype cavities^{12,13}, surface at polytypes.^{14–21} Recent

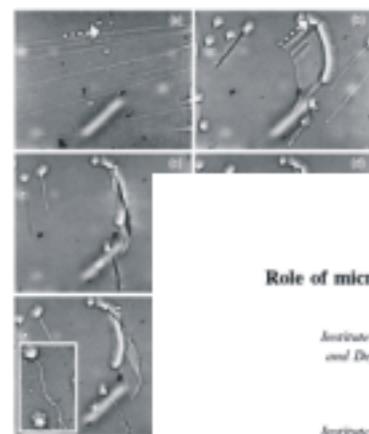


FIG. 3. Representative phase images recorded while a pore is growing. The inset in (a) shows the MP recorded at another place indicated in (a) and (b) by a white arrow coincides with the pore edge, with twisting the sample in (a).

DOI: 10.1063/1.2337700

X-ray Imaging Group

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

The role of micropipes in the formation of pores...
DOI: 10.1063/1.2337700

L.E.

size, pore, and MP is a detailed scanning electron micrograph of the foreign polypeptide inclusion boundary and inclusion boundary has been shown and merging. The diameter of MP, and the inclusion boundary.

For the purposes of portant to find a way by s. While scanning electron micrograph can elucidate the inclusion and follow the growth of elastic micropipes.

FIG. 2. (Color online) Dendritic 6H-SiC inclusion in 4H-SiC wafer: (a) optical micrograph; (b) PL image; and (c) phase radiograph. Numbers 1–6 indicate the inclusion corners where tubular pores are located. The inset to (a) shows the optical micrograph of the region indicated by 4 in (b) and (c). The inset to (c) displays the tube indicated by 1 and the nearby MP. The growth direction is nearly perpendicular to the sample surface.

ward the tube and, at the same time, remarkably deviate from the growth direction, which is almost perpendicular to the sample surface. By evaluating the variation of the MP density, we confirmed that MP were sparse around inclusions, while a high density of MP was detected in inclusion-free regions throughout the wafer.

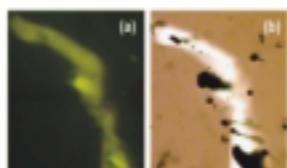
The observations of these foreign polypeptide inclusions and many other similar inclusions provide strong evidences for the attraction of MP to the inclusion boundaries. These MP may coalesce and form pores. Although generation of pores due to agglomeration of MP originated from screw dislocations at the inclusion boundary cannot be ruled out, we believe that pore growth proceeds at the expense of MP pulled out of the neighboring bulk. Tubular pores at inclusion corners are the first to form. (It should be noted that the term "tube" is used here to define a pore around an inclusion corner while the term "MP" is used to define a cylindrical pore formed in an arbitrary crystal area. As for MP, the diameters of the tubular pores lie in the micrometer range, and so these pores are assumed either to form due to the coalescence of several MP or to represent a single MP. The Burgers vector of these pores is added up from the Burgers vectors of the dislocations within the MP merging to form a tubular pore and, if the inclusion boundary contains dislocations, the total Burgers vector of the dislocations lying in the fragment of the inclusion boundary removed by the tubular pore. Since different MP have different Burgers vectors, the dislocation content of tubular pores can vary. Such pores can either contain dislocations or be dislocation-free.) Slit pores spread between tubular pores via joining the MP aligned parallel to the borders of the slit pores.

The propagation of MP together with the growth front is accompanied by their lateral motion toward the inclusion

Downloaded 12 Nov 2006

Downloaded 12 Nov 2006

1098-0121/2007/7606/064



PHYSICAL REVIEW B 76, 064117 (2007)

Role of micropipes in the formation of pores at foreign polypeptide boundaries in SiC crystals

M. Yu. Gutkin
Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, 199178 St. Petersburg, Russia
and Department of Metal Physics and Computer Technologies, St. Petersburg State Polytechnical University, 195251 St. Petersburg, Russia

A. G. Sheinerman

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of Physics and Dept. of Materials Science and Engineering

Institute of

Карбид кремния - перспективный материал электронной техники.

SiC превосходит кремний:

По напряжению пробоя -

в 3 раза;

По теплопроводности -

в 3 раза;

По ширине запрещенной зоны -

в 3 раза.

SiC - отличный материал для изготовления силовых, высокотемпературных, радиационно-стойких приборов с малыми потерями. В силовой электронике замена Si на SiC даст колossalный выигрыш как в мощности, так и в площади приборов.

Однако, промышленный выпуск мощных полупроводниковых приборов на основе SiC возможен только при наличии высококачественных кристаллов.

Производству кристаллов мешают дефекты структуры, возникающие в процессе роста.

Кристаллы SiC выращиваются методом сублимации.

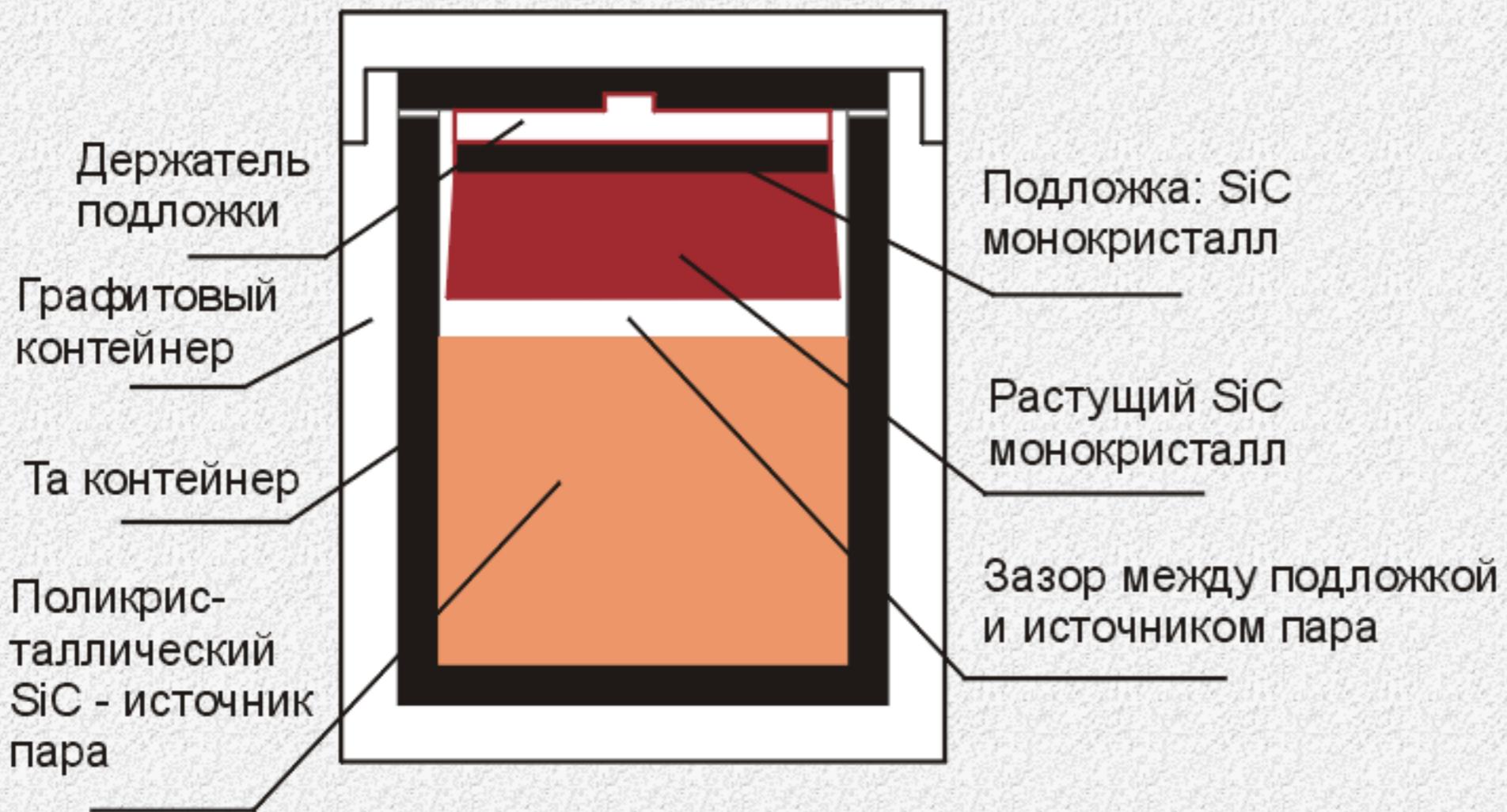


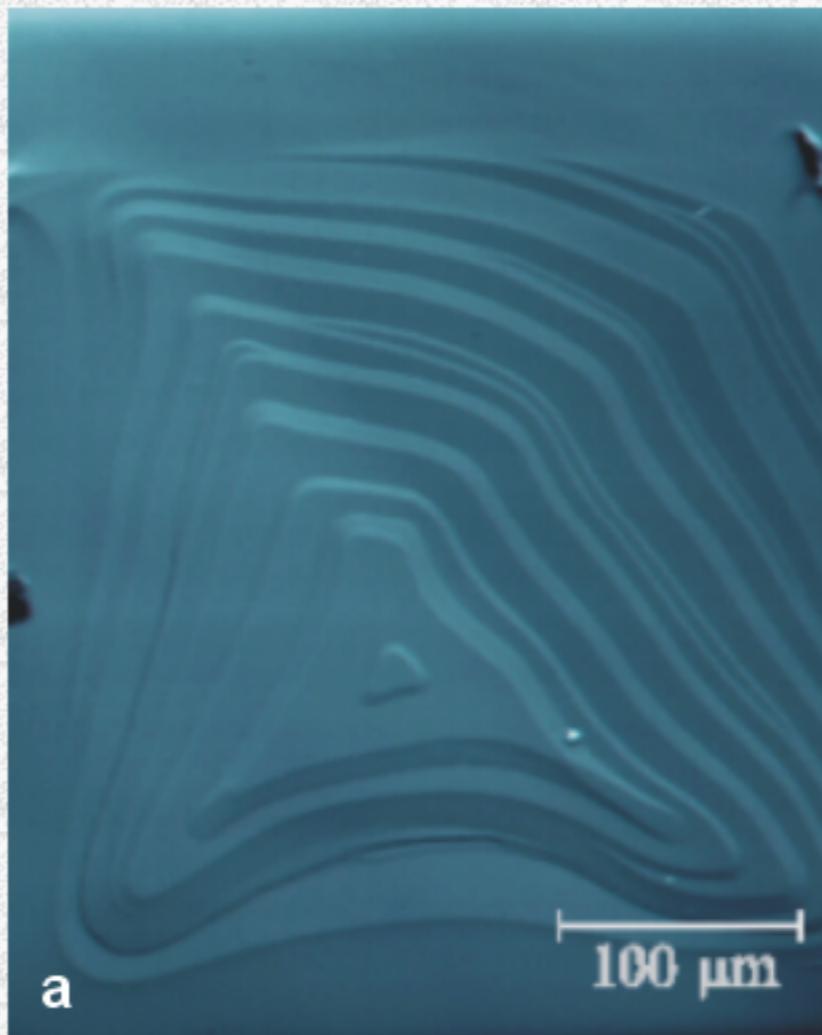
Рис. 3. Рост кристалла осуществляется в «сэндвич-ячейке» - зазоре между подложкой и источником пара; в вакууме или в Ar; температура 2000 – 2200 С, скорость роста 0.5 – 1.5 мм/час.

В частности, Sublimation sandwich метод был разработан в 1970 проф. Ю.А. Водаковым, ФТИ РАН.

Yu.A.Vodakov
and E.N.Mokhov,
Patent USSR
N403275 (1970),
Patent USA
B4147575
(1979).

Микротрубы в SiC - дефекты-убийцы.

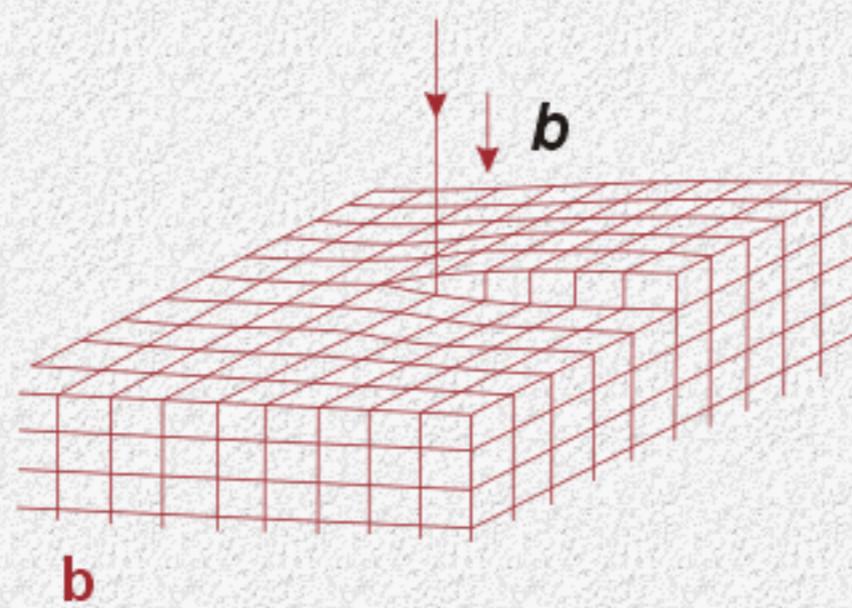
Ростовые дефекты структуры – микротрубы – вызывают электрический пробой в приборах на SiC.



Их называют "дефектами-убийцами" приборов на SiC, а их плотность входит в число основных показателей качества выращенного образца.

Рис. 4. Ростовая поверхность над микротрубкой (а), метод сканирующей электронной микроскопии.

Схематическое изображение винтовой дислокации в кристаллической решётке (б).



Методы исследования микротрубок в SiC.

Рентгеновская топография

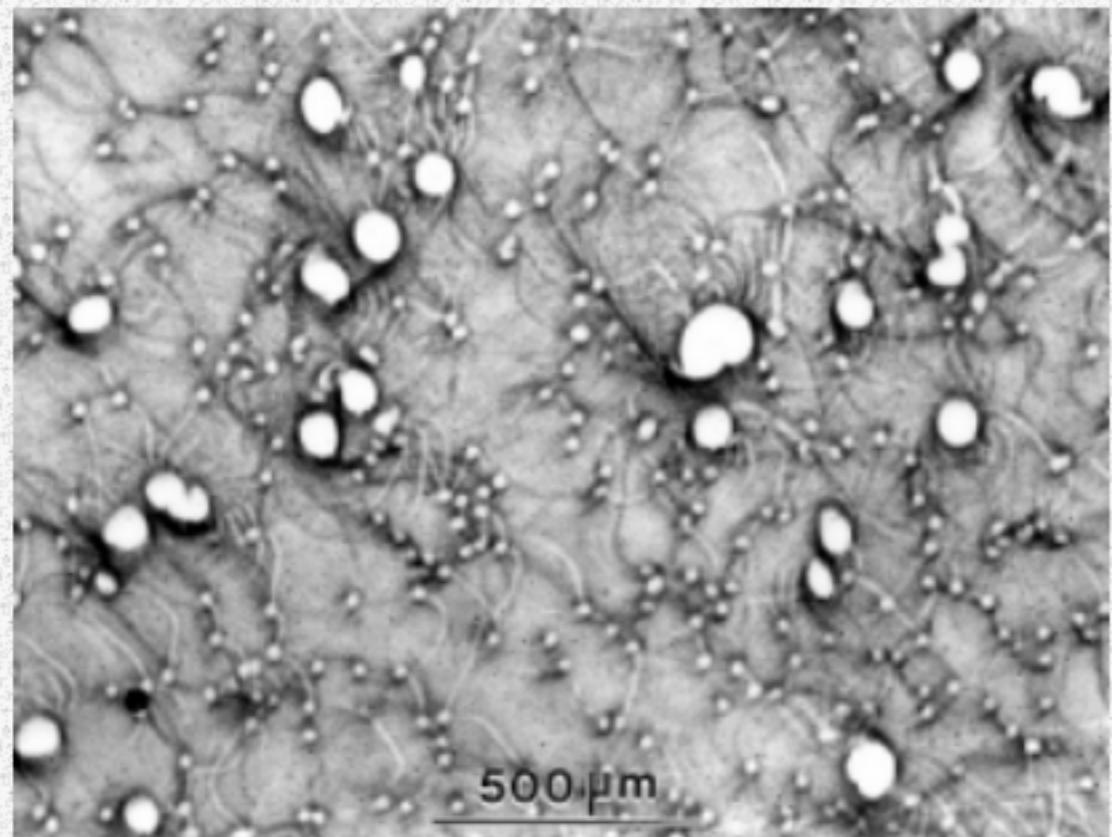


Рис. 5. Синхротронная топограмма в геометрии Брэгга. (0001) 6Н SiC.

X. R. Huang, M. Dudley, W. M. Vetter et al,
J. Appl. Cryst. 32, 516 (1999).

Оптическая микроскопия

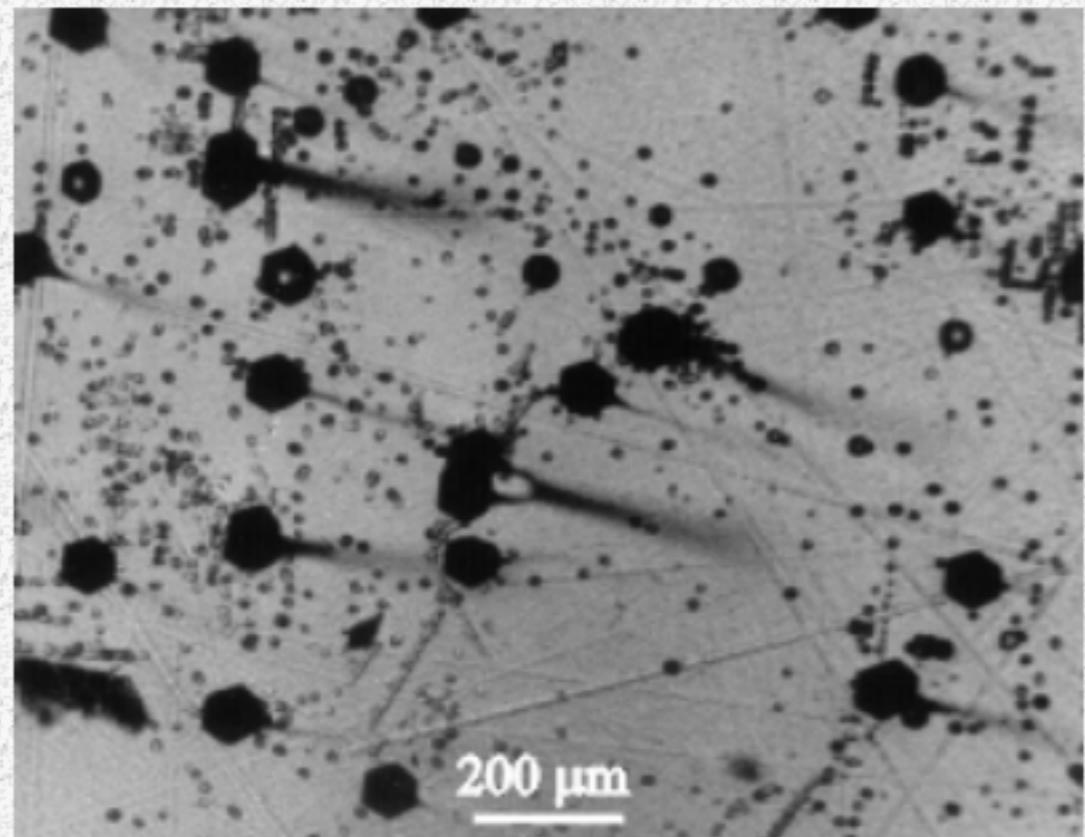


Рис. 6. Микрофотография в проходящем свете. Гексагональные ямки травления соответствуют выходам микротрубок на поверхность образца.

Методы исследования микротрубок в SiC.

Сканирующая электронная
микроскопия

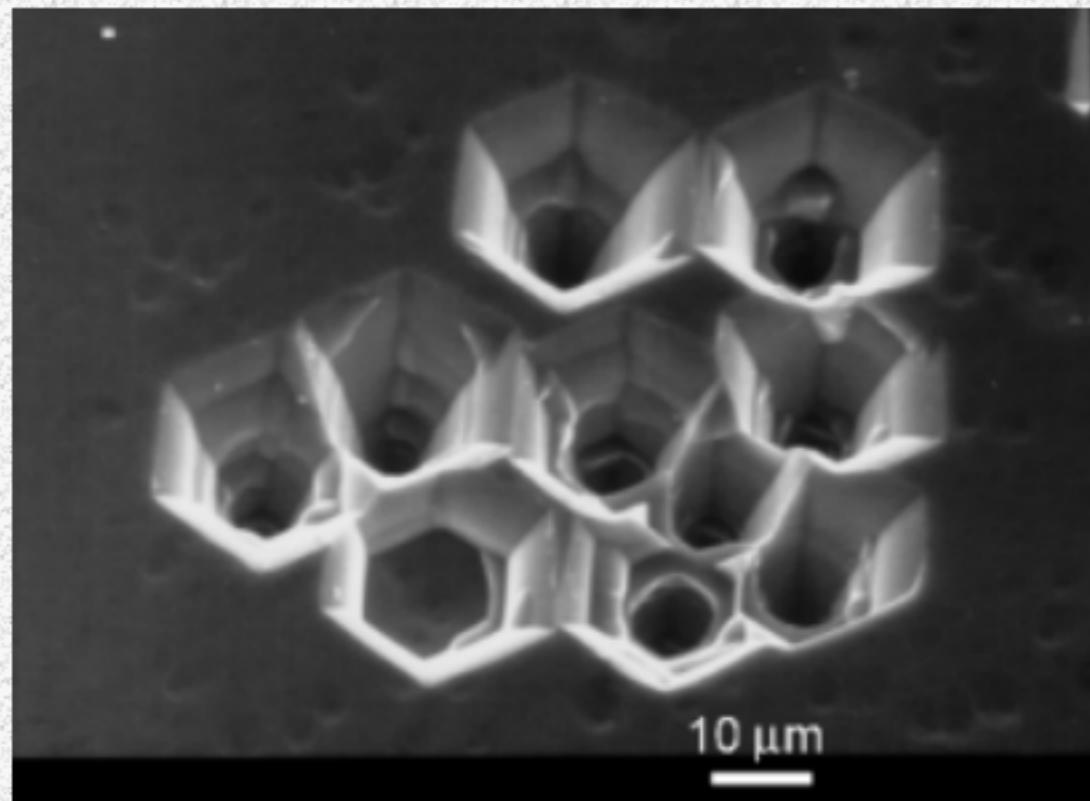


Рис. 7. Группа микротрубок на травленной поверхности пластины SiC. Гексагональная форма ямок и фасетки внутри трубок указывают на присутствие дислокаций.

Фазово-чувствительная
радиография

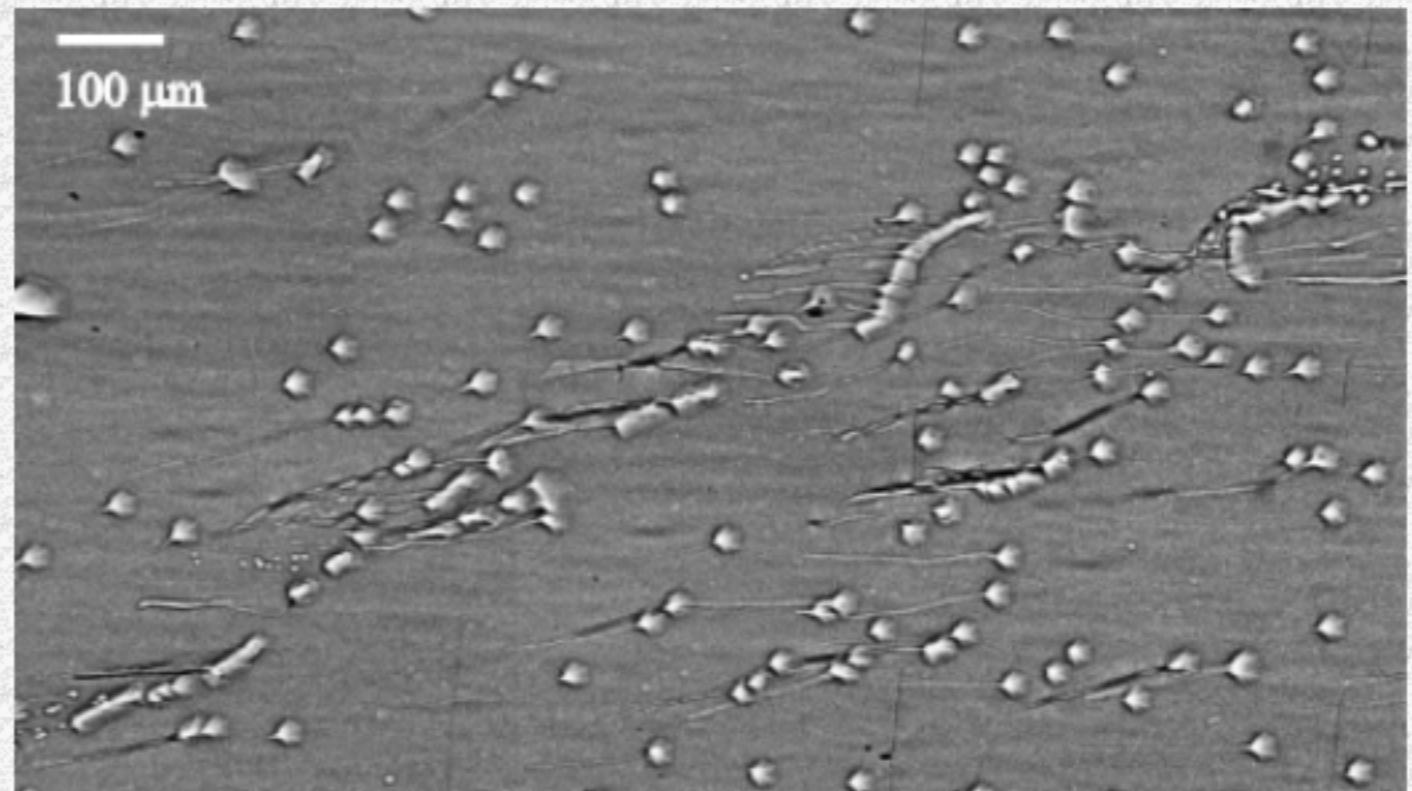


Рис. 8. Синхротронное фазово-контрастное изображение скопления микротрубок. Белые "гало" - изображения ямок травления на поверхности.

Образцы и техника эксперимента.

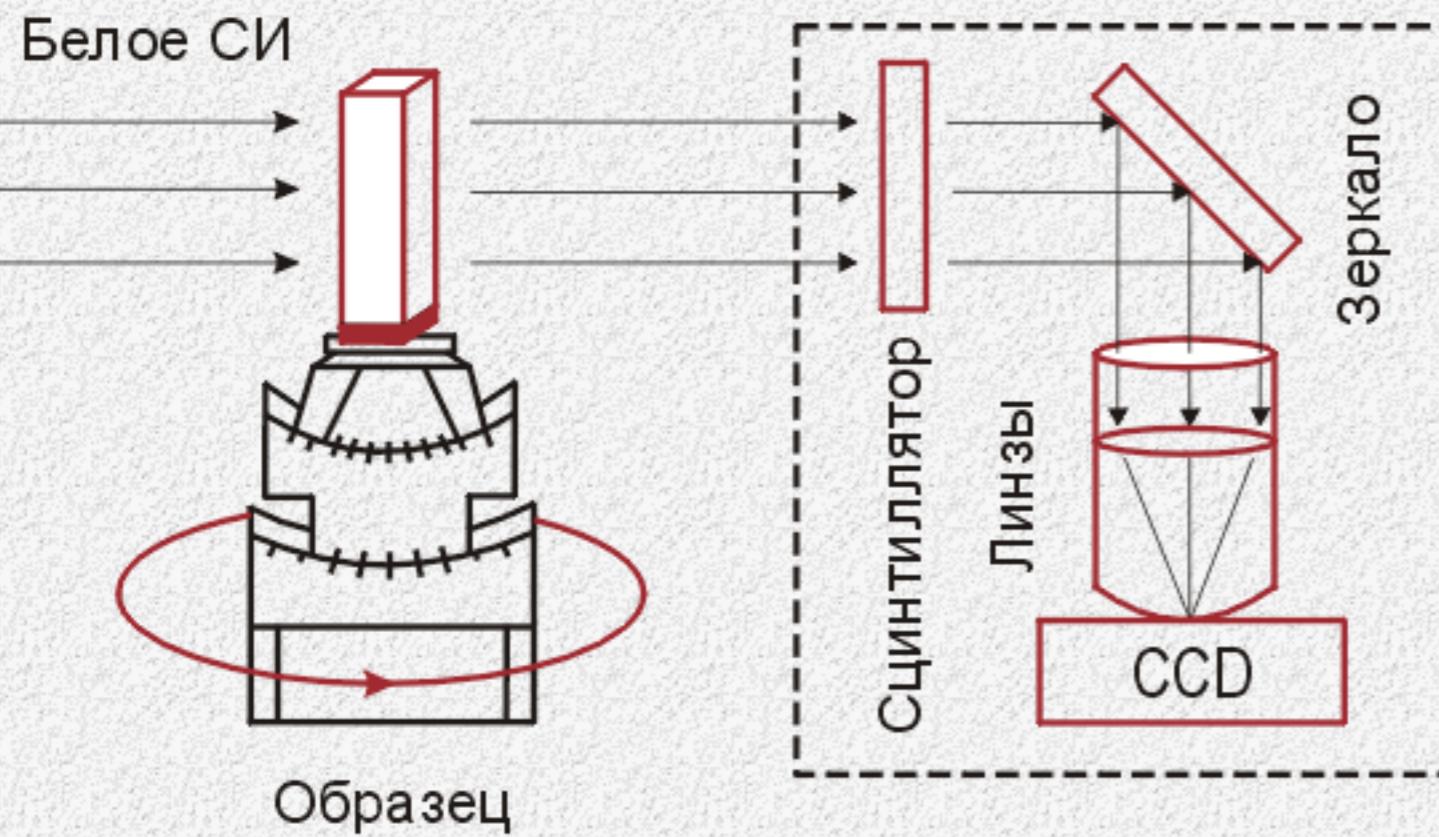
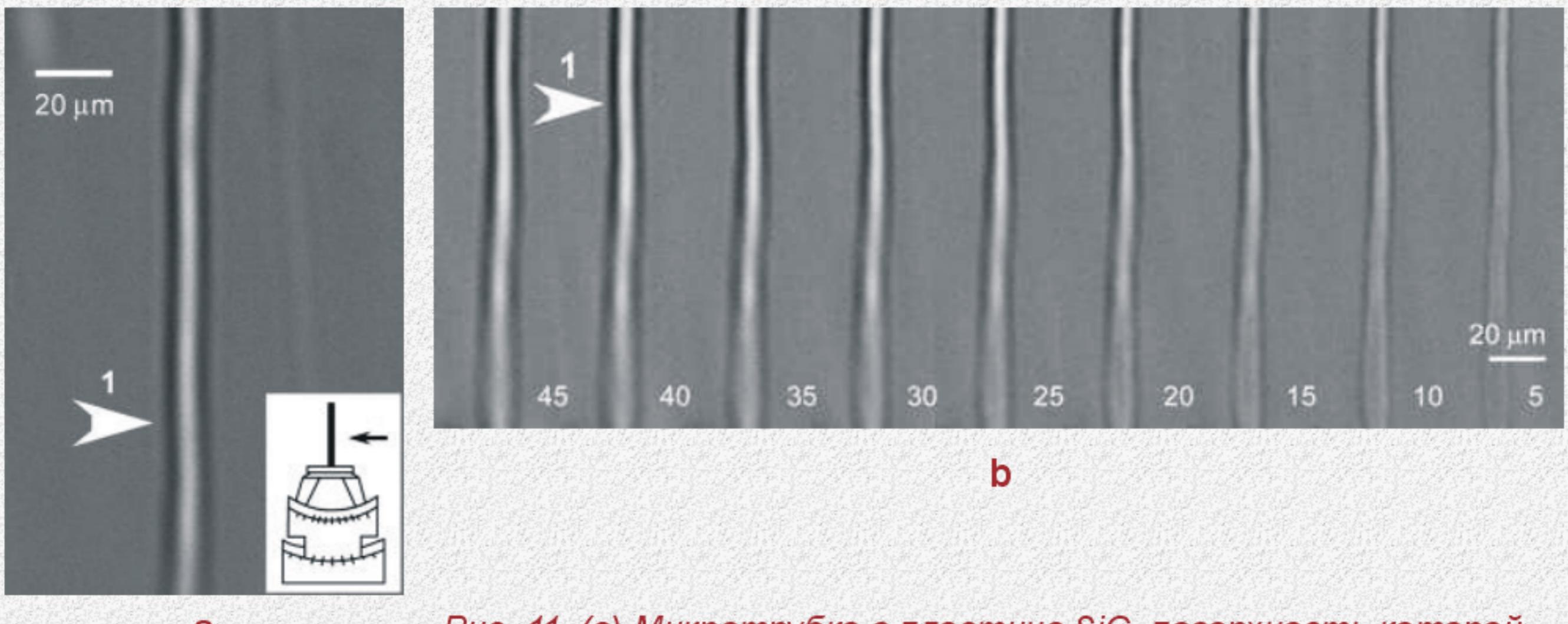


Рис. 9. Схема эксперимента, включающая держатель образца, сцинтиллятор, детектор и систему линз.



Рис. 10. Образец – пластина SiC , вырезанная параллельно оси роста кристалла (0001). Микротрубы расположены горизонтально. Поверхность образца – перпендикулярна пучку.

Экспериментальные результаты: определение диаметра.



а

Рис. 11. (а) Микротрубка в пластине SiC , поверхность которой установлена перпендикулярно пучку. Во время эксперимента положение микротрубки было горизонтальным.

б

(б) Изображения, измеренные на разных расстояниях от детектора. Цифры 45 – 5 показывают расстояния от детектора до образца, см.

Расчёт реального спектра с учётом поглотителей.

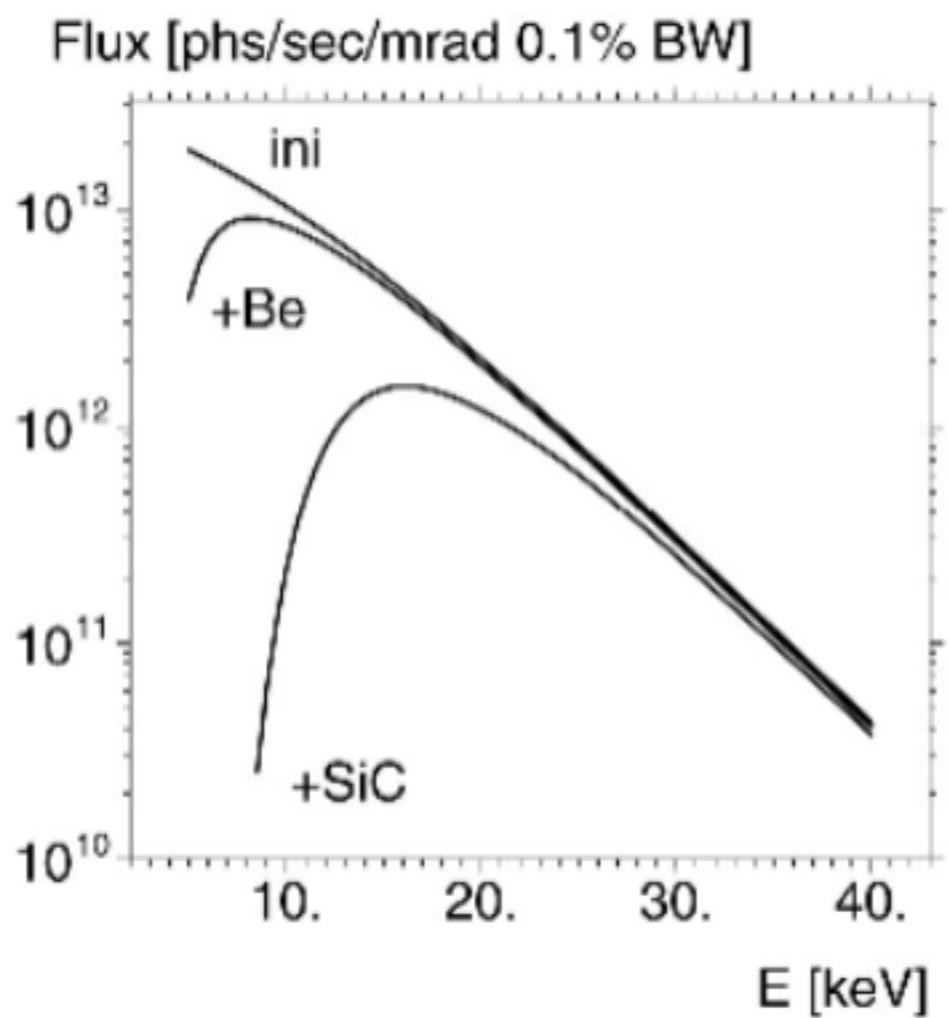


Рис. 12. Спектры СИ, рассчитанные с учётом поглотителей (берилиевое окно 2 мм толщиной и образец толщиной 490 микрон) и без учёта поглотителей.



Компьютерное моделирование в белом СИ – это суммирование картин для разных энергий.

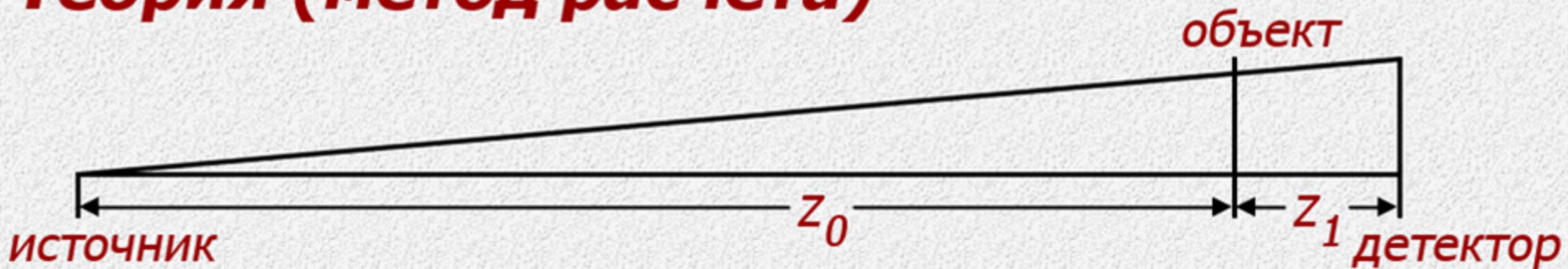


Различные гармоники СИ по разному поглощаются как в поглотителях, так и в образце.



Необходимо очень точно учитывать реальный спектр разложения СИ по гармоникам. Причем в задачу входит не исходный спектр СИ, а тот, который регистрируется детектором.

Теория (метод расчета)



$$I_n(x_1) = |a(x_0)|^2, \quad x_0 = x_1 \frac{z_0}{z_t}, \quad z_t = z_0 + z_1, \quad M = P \frac{\beta}{\delta}$$

$$a(x_0) = \int dx P_K(x_0 - x, Z) T(x), \quad Z = \frac{z_0 z_1}{z_t}, \quad P = \frac{2\pi}{\lambda} \delta \frac{R}{\sin \alpha}$$

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

$T(x) = \exp\left[(iP + M)\left(1 - \frac{x^2}{R^2}\right)^{1/2}\right]$ – функция пропускания

Компьютерное моделирование круглой микротрубки.

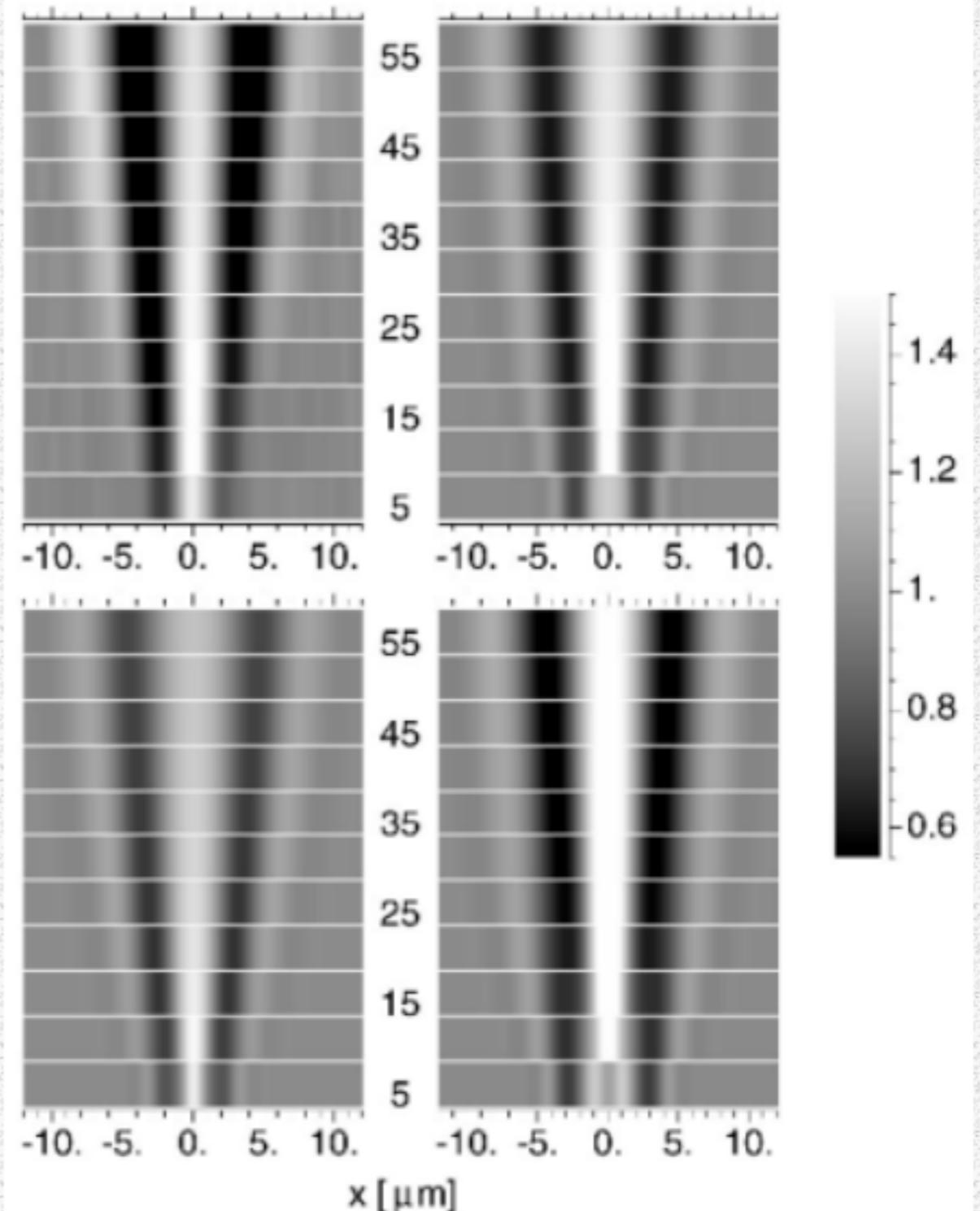
Рис. 13. Компьютерное моделирование зависимости от расстояния. Расстояние в см показано между панелями.

Левая верхняя панель: фрагменты экспериментальных изображений.

Правая верхняя панель: расчётные изображения для микротрубки диаметром 4 микрона.

Нижние панели показывают результаты моделирования для микротрубок диаметром 3 (левая панель) и 5 (правая панель) микрона.

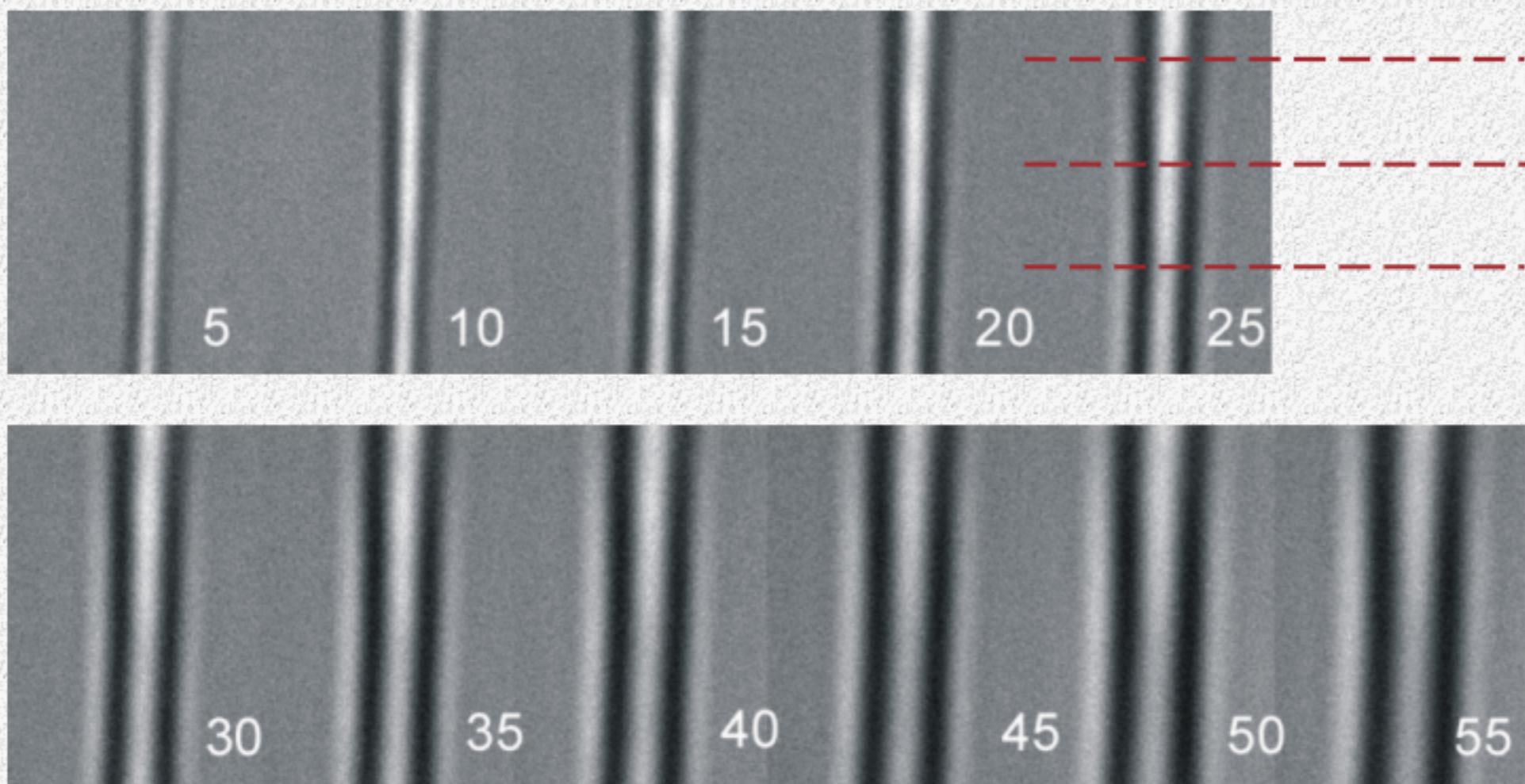
Масштаб справа представляет шкалу серого цвета.



Моделирование микротрубок эллиптического сечения.

1) Подгонка зависимости от расстояния.

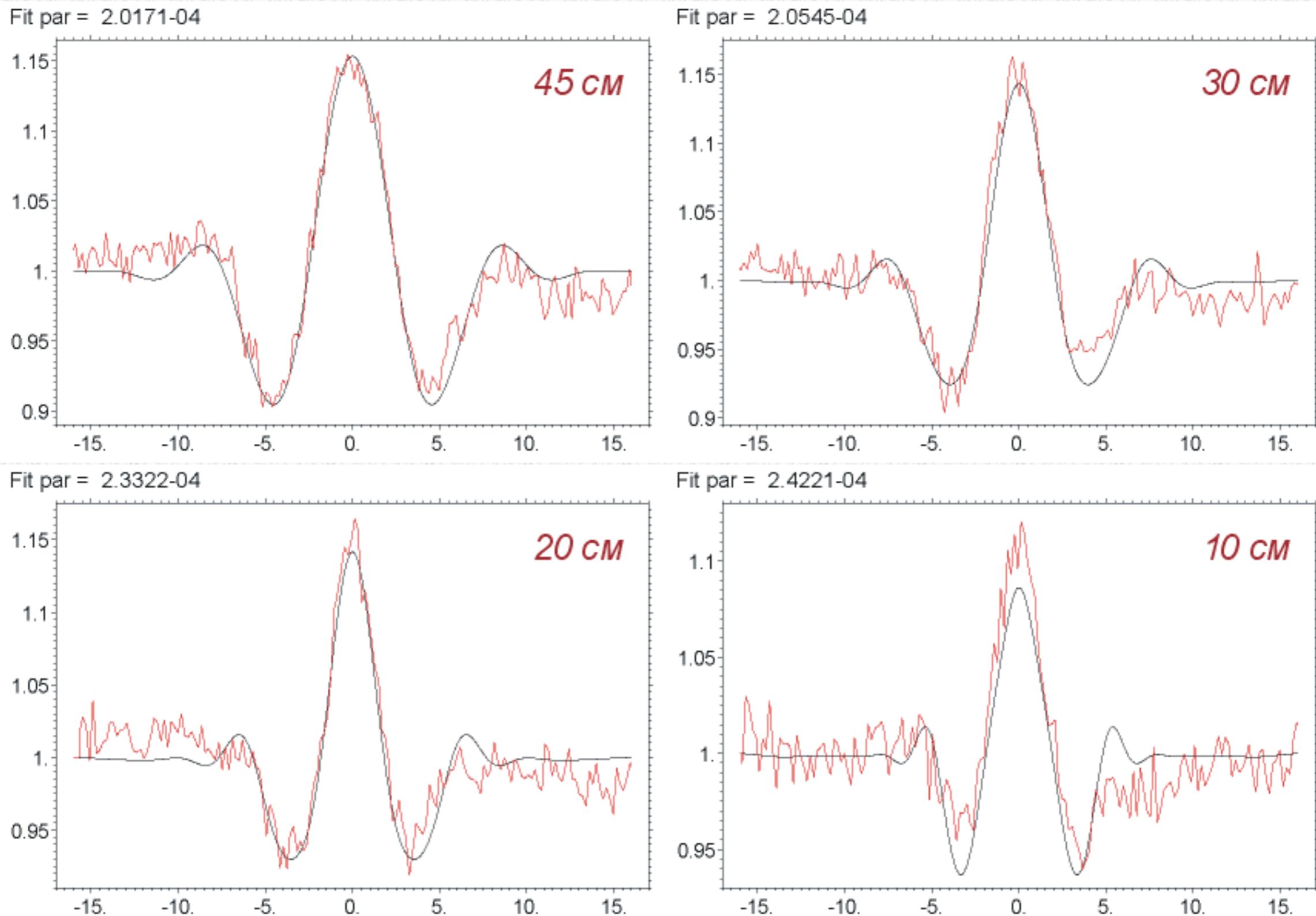
Моделирование трубок эллиптического сечения проводилось в 2 этапа.



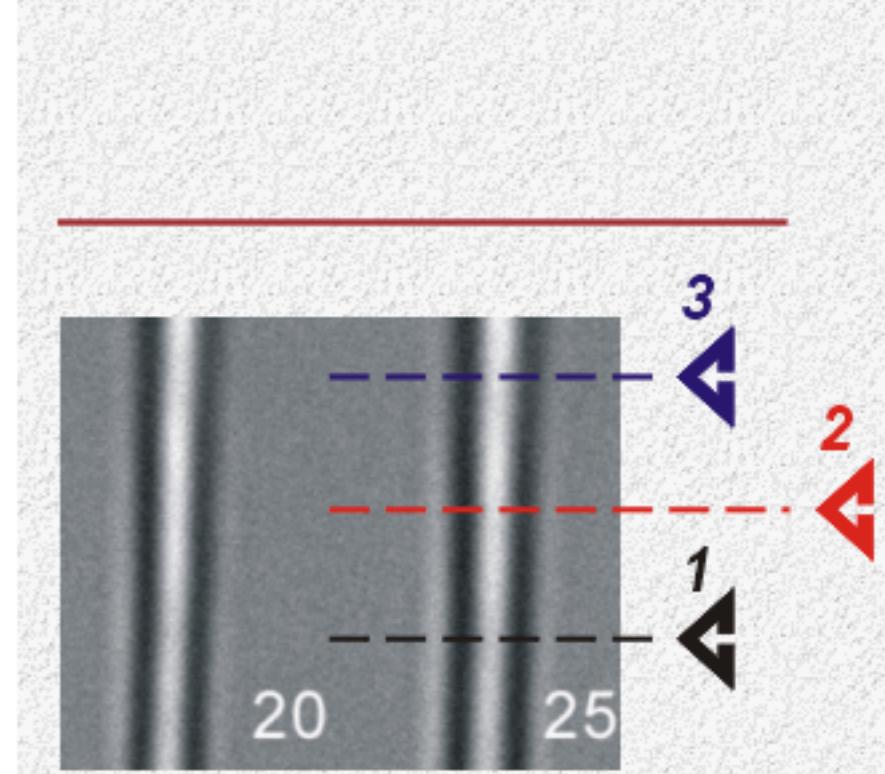
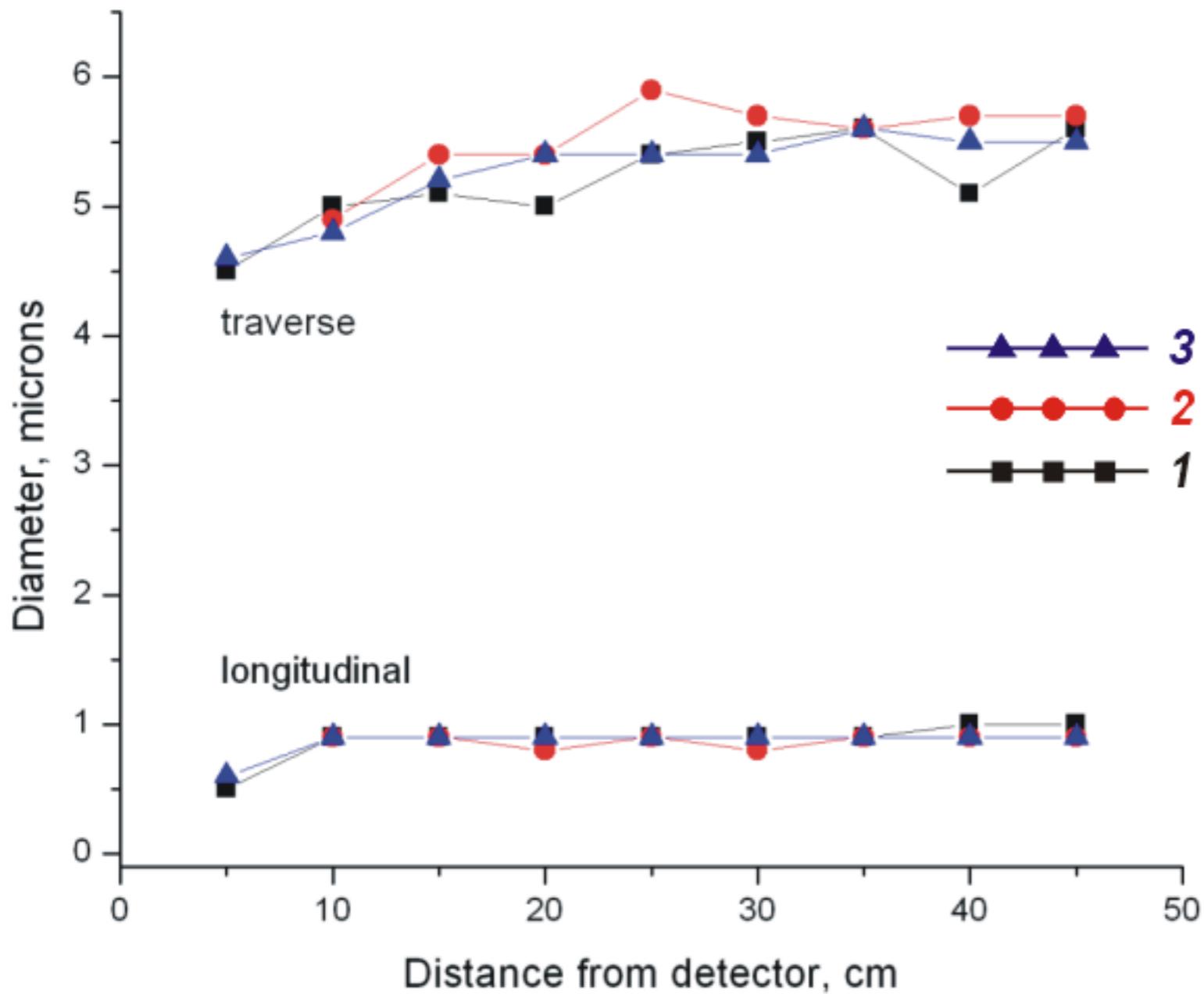
2) Подгонка размера вдоль микротрубы.

Рис. 14. Изображения микротрубки эллиптического сечения, измеренные в зависимости от расстояния от детектора. Пунктиром отмечены уровни измерения профилей интенсивности вдоль трубы.

Примеры моделирования профилей интенсивности.



Результаты моделирования зависимости от расстояния.



Показаны три уровня измерения профилей вдоль оси трубы:
1, 2 и 3.

Рис. 15. Значения диаметра микротрубки эллиптического сечения, полученные в результате моделирования зависимости от расстояния образец - детектор. *Traverse* - ось эллипса, измеренная перпендикулярно пучку; *longitudinal* - параллельно пучку.

Моделирование "закрученных" микротрубок.

При повороте трубы вокруг её оси (т.е. при наклоне образца) появился участок тёмного контраста, отмеченный на рис.16 стрелкой 1'.

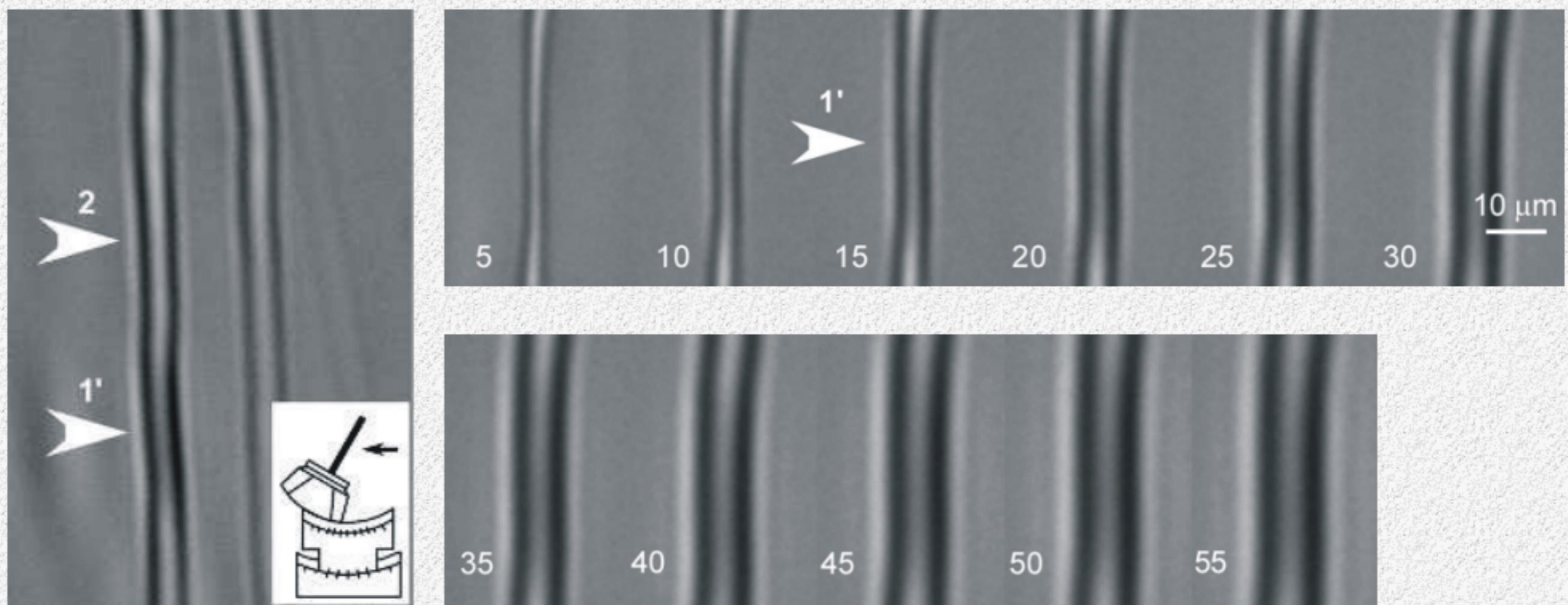
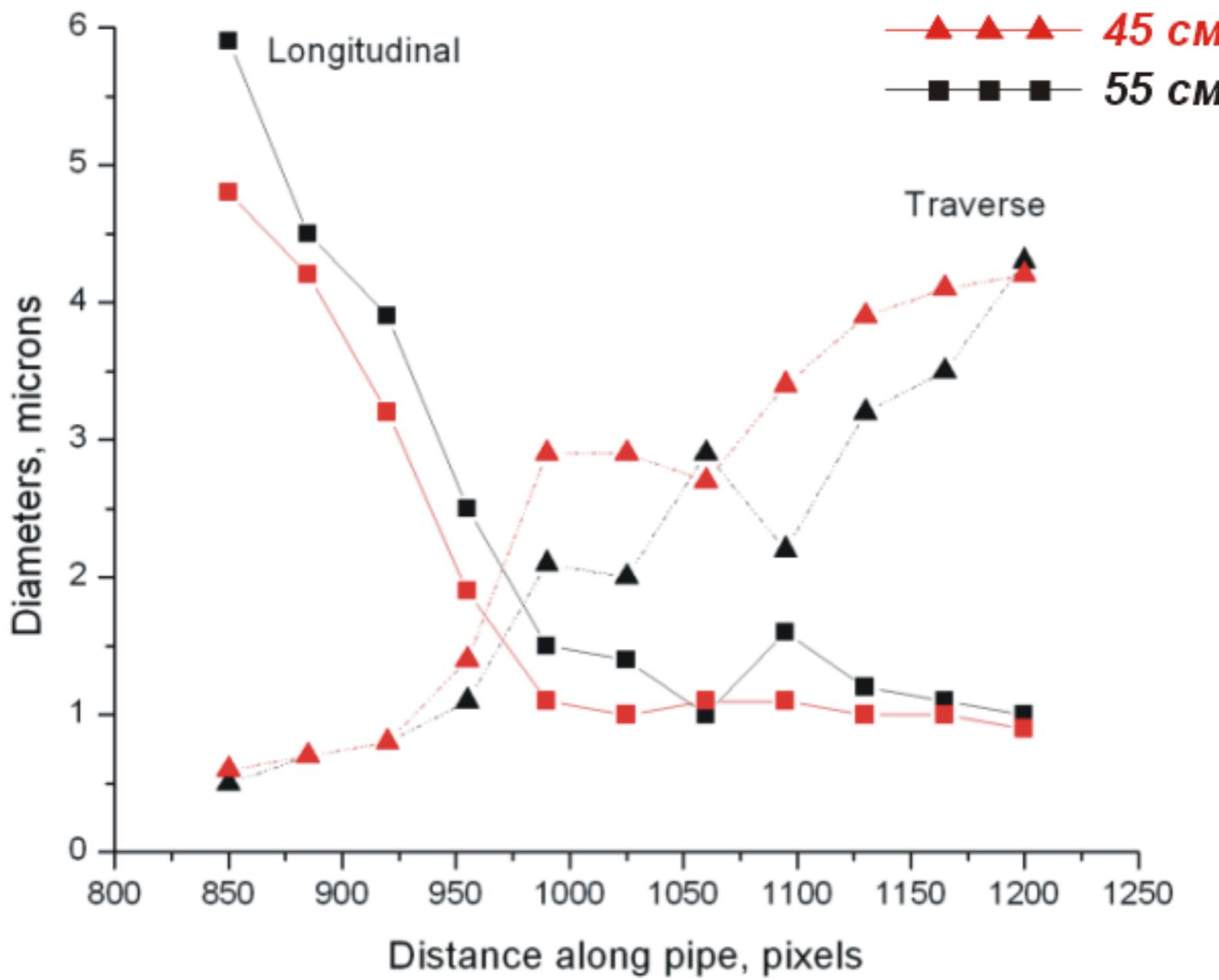


Рис. 16. Изображение микротрубок в наклонённом образце. Изображения зависят от расстояния для участка тёмного контраста, отмеченного стрелкой 1'. Цифры 5 - 55 показывают расстояние от детектора, см.

Измерение сечения вдоль оси микротрубы.



Можно видеть, что продольный диаметр уменьшается вдоль трубы, тогда как поперечный- увеличивается.

Изменение можно объяснить поворотом эллиптического сечения, т.е. закручиванием микротрубы вокруг её оси.

Рис. 17. Изменение поперечного (traverse) и продольного (longitudinal) диаметров микротрубы в зависимости от положения вдоль её оси для двух расстояний от детектора: 55 см и 45 см.

Выводы:

- ooo разработан экспериментальный метод прецизионного измерения профилей распределения интенсивности на фазовом, то есть когерентном, изображении микротрубок в белом пучке СИ
- ooo создана компьютерная программа, позволяющая моделировать профили распределения интенсивности и проводить автоматическую подгонку параметров микротрубок
- ooo решающим фактором успеха в процессе моделирования является знание спектра СИ, формирующего изображение
- ooo зависимость от расстояния позволяет повысить надежность получаемых из подгонки параметров микротрубы
- ooo достоверно установлено, что микротрубы могут иметь не только круглое сечение, но и эллиптическое, с поворотом эллипса при движении вдоль оси трубы

БЛАГОДАРЬ
ЗА
ВНИМАНИЕ