## ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВО-КОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОТРУБОК В SiC В БЕЛОМ ПУЧКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2011 г. В. Г. Кон<sup>1</sup>, Т. С. Аргунова<sup>2, 3</sup>, Jung Ho Je<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва, Россия <sup>2</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия <sup>3</sup>Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea Поступила в редакцию 22.03.2010 г.

Экспериментально изучена и теоретически объяснена интересная особенность фазово-контрастных изображений микротрубок в карбиде кремния в белом пучке синхротронного излучения, состоящая в том, что изменение размеров сечения микротрубки не приводит в изменению размеров ее изображения, а влияет только на контраст. Эксперимент выполнен на источнике синхротронного излучения в г. Поханг Республики Корея. Этот эффект объясняется, с одной стороны, малым набегом фазы, создаваемым микротрубкой, а с другой стороны — выполнением условий для дифракции Фраунгофера, когда поперечный размер микротрубки меньше диаметра первой зоны Френеля. Как правило, в рентгеновской оптике выполняются условия ближнего поля, когда изображаются только края объекта. Но микротрубки столь малы, что к ним стандартная краевая теория неприменима. Получен универсальный профиль распределения интенсивности для микротрубок с очень малым сечением.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Кристаллы карбида кремния (SiC), выращенные методом сублимации, содержат дефекты кристаллической структуры, такие как дефекты упаковки, дислокации, дислокационные микротрубки и микропоры. Существует корреляция между плохими характеристиками приборов на основе SiC и наличием дефектов в их структуре [1]. Микротрубки и микропоры, образующиеся в объеме кристаллов в процессе их роста, особенно опасны, потому что они вызывают деградацию приборов и полностью выводят их из строя. Совершенствование технологий выращивания кристаллов SiC привело к появлению образцов с очень низкой концентрацией микротрубок: ~0.7 см<sup>-2</sup> [2]. Однако для производства приборов силовой полупроводниковой электроники на основе SiC необходимо дальнейшее понижение плотности этих дефектов [3]. Поэтому при производстве кристаллов важно выявлять микротрубки, чтобы правильно оценить выход приборов хорошего качества.

Для карбида кремния характерна трансформация дефектов в процессе роста кристаллов. Дефекты разных типов могут взаимодействовать, сливаться, диссоциировать, аннигилировать и изменять свою природу. Микротрубки диссоциируют с образованием винтовых дислокаций [4, 5]. Они вступают в реакции между собой [6, 7] и с границами включений других политипов [7–9]. Взаимодействие микротрубок сопровождается изменением размеров их сечений [6, 7, 10]. При этом морфология микротрубок определяется как типом связанных с ними дислокаций [11], так и условиями их зарождения и взаимодействия [6–9]. Взаимодействие дефектов приводит к изменению плотности их распределения, которая понижается в результате процессов аннигиляции, диссоциации и слияния. Поскольку размер сечения и морфология микротрубки зависят от ее реакций с другими дефектами, знание этих параметров помогает предвидеть плотность микротрубок и держать ее под контролем.

Распределение микротрубок наблюдают с помощью оптического микроскопа по ямкам травления на поверхности пластины SiC. Размер ямки травления не равен размеру сечения микротрубки, а гексагональная форма ямки не отражает ее морфологию. Одним из прямых методов исследования размера и морфологии микротрубки является рентгеновская топография в сочетании с компьютерным моделированием изображений [12, 13]. Однако упругие поля дислокационных микротрубок испытывают влияние полей других дефектов: соседних микротрубок, дислокаций и малоугловых границ. Когда поля напряжений дефектов перекрываются на топограммах, определение характеристик микротрубок становится невозможным.

В последние годы успешно развивается альтернативный прямой метод наблюдения микротрубок – фазовый контраст в пучке синхротронного излучения (СИ) [6–10]. Источники СИ третьего поколения имеют малый угловой размер и обеспечивают высокую пространственную когерентность излучения. С другой стороны, даже исходный спектр СИ, т.е. без монохроматизации, в рассматриваемом случае имеет форму кривой с максимумом при определенной энергии. Уменьшение интенсивности излучения при высоких энергиях определяется природой его генерации, а при низких энергиях — поглощением в образце. По этой причине даже "белое" СИ является частично когерентным, что вполне достаточно для регистрации фазово-контрастных изображений мелких объектов, таких как микротрубки в SiC.

Методика измерений в белом СИ имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием монохроматора – высокую интенсивность, малое время экспозиции, большую освещаемую область и простоту экспериментального оборудования. Простота схемы, высокая интенсивность и наличие большого диапазона длин волн позволяют сочетать различные методы исследования в процессе одного эксперимента, комбинируя получение фазово-контрастных изображений с другими методами, включая аналитические методы. Существенным недостатком современного подхода является то, что получаемая информация имеет в основном качественный характер. Успешная визуализация микроструктуры провоцирует измерение различных характеристик, в том числе размеров ее элементов, непосредственно на изображениях. Однако природа фазового контраста такова, что размеры изображения не равны размерам самих изображаемых объектов.

Решением проблемы получения надежной количественной информации является развитие методов компьютерного моделирования фазово-контрастных изображений объектов разной формы и размера. Такой подход был недавно предложен [14] на основе расчета интеграла Кирхгофа для монохроматических гармоник излучения СИ и последующего суммирования по реальному спектру с учетом поглощения в образце. Несколько позже была разработана программа FIMTIM для автоматического определения параметров эллиптического сечения микротрубки пучком из условия совпадения теоретического и экспериментального профилей относительной интенсивности. Было показано, что сечение трубки в процессе роста может изменять не только размер, но и ориентацию [15, 16]. Однако систематического исследования изменения характера изображения в зависимости от размеров и формы сечения микротрубок не проводилось.

В данной работе мы рассматриваем интересную особенность фазово-контрастных изображений микротрубок, а именно: для характерных расстояний от образца до детектора в диапазоне от 10 до 50 см размер изображения практически не зависит от диаметров эллиптического сечения. При уменьшении диаметров сечения происходит лишь уменьшение контраста. Заметное изменение контраста на экспериментальных изображениях микротрубки при движении вдоль ее оси являлось одним из загадочных явлений и ставило в тупик, поскольку никаких причин для такого уменьшения вроде бы не существовало. Решение этой загадки представлено в данной работе. Оказывается, изменение контраста не связано с изменением каких-либо внешних по отношению к трубке условий, а является признаком изменения сечения самой трубки.

#### ЭКСПЕРИМЕНТ

Кристалл 4H-SiC, исследованный в данной работе, был выращен методом сублимации [17] в атмосфере аргона при температуре 2200°С со скоростью 300 мкм/ч. Ось роста была параллельна направлению [0001]. Кристалл был разрезан на пластины параллельно оси роста. Микротрубки, оси которых, как правило, параллельны оси роста, были расположены почти параллельно поверхности образцов.

Фазово-контрастные изображения были получены на станции 7В2 (рентгеновская микроскопия) источника СИ третьего поколения в г. Поханге в Южной Корее (Pohang Light Source). Поворотный магнит обеспечивал эффективный размер источника 60 мкм в вертикальном и 160 мкм в горизонтальном направлении. Источник находился на расстоянии 34 м от образца. Для расчета эффективного спектра излучения использовалась кривая исходного спектра источника в диапазоне энергии от 5 до 40 кэВ, которая имеет монотонно убывающую форму. После учета поглощения в бериллиевом окне толщиной 2 мм и в пластине SiC толщиной 450 мкм спектр приобретал ярко выраженный максимум при энергии 16 кэВ [14—16].

Образцы устанавливались на держатель, обеспечивающий перемещение вдоль трех осей с точностью 0.1 мкм, повороты и вращение вокруг вертикальной оси. Поверхность образцов выставлялась перпендикулярно пучку, при этом оси микротрубок располагались горизонтально, чтобы использовать минимальный угловой размер источника в вертикальном направлении. Излучение, прошедшее сквозь образец, попадало на кристалл-сцинтиллятор CdWO<sub>4</sub> толщиной 200 мкм и возбуждало его свечение. Видимый свет отражался от зеркально полированной пластины кремния и направлялся в детектор с матрицей приборов с зарядовой связью (ССД). Схема эксперимента представлена на рис. 1. На рисунке показано, что световое изображение сначала увеличивается при помощи системы линз, а затем регистрируется детектором. Увеличение изображения можно изменять в пределах от одного до пятидесяти раз. Детектор записывал изображение в числовом виде с разрешением 14 бит на матрицу размером 1600 × 1200 пикселей. Размер поля зрения был 310 мкм (Н), что соответствует размеру пикселя 0.194 мкм.

Ранее было показано, что размеры и структура изображения зависят от расстояния образец-детектор [14–16], поэтому в процессе измерений это расстояние варьировалось. Схема эксперимента позволяла изменять расстояние от 5 мм до 1.5 м.



Рис. 1. Схема эксперимента. Пучок синхротронного излучения идет снизу вверх: S – входная щель; O – образец (кристалл карбида кремния, содержащий микротрубки); F – кристалл-сцинтиллятор толщиной 200 мкм, поглощающий рентгеновские кванты и излучающий оптические кванты; M – зеркало; L – система линз, увеличивающая изображение; D – координатный детектор (ССD-матрица).

Фактически измерена серия изображений микротрубок на расстояниях от 2 до 50 см.

Микротрубки с размером сечения порядка нескольких микрон и меньше являются фазовыми объектами, и их контраст существенно зависит от ориентации оси трубки относительно оси пучка СИ. Центральная часть изображений может быть как белой, так и черной, более того, различные участки одной и той же трубки могут иметь разный контраст. Метод компьютерного моделирования был основан на предположении, что трубка является однородной вдоль оси, и, следовательно, достаточно вычислить распределение интенсивности в направлении, перпендикулярном пучку и оси трубки. Это предположение хорошо выполняется при ориентации трубки, когда ее ось почти перпендикулярна пучку. Поэтому были исследованы такие варианты ориентации микротрубок, когда их оси были почти перпендикулярны пучку и располагались горизонтально, так что контраст формировался вертикальным (наименьшим) размером фокуса.

На рис. 2 показана серия изображений участка одной микротрубки. полученных на разных расстояниях от образца. Цифры на изображениях указывают расстояние в сантиметрах. Эта серия была специально отобрана для демонстрации обнаруженной нами особенности в изображении микротрубок. На двух левых изображениях, полученных на расстояниях 2 см и 4 см, горизонтальный размер (диаметр сечения) монотонно уменьшается при движении вдоль оси трубки сверху вниз. Если предположить, что размер изображения, полученного на расстоянии 2 см, коррелирует с истинным размером сечения микротрубки, то можно сделать вывод, что сечение микротрубки уменьшается при движении сверху вниз. Однако на малых расстояниях контраст изображения очень мал, и требуются специальные условия, чтобы его выявить. По этой причине часто получают изображения на расстояниях от 10 до 50 см. Но на этих расстояниях структура изображения существенно меняется. Появляются черные полосы по краям светлой полосы, а при больших расстояниях видны дополнительные светлые полосы. Интересно, что на этих изображениях расстояние между черными полосами уже не меняется при движении сверху вниз, т.е. профиль распределения интенсивости в горизонтальном направлении один и тот же на всех высотах. Меняется только контраст изображения.

Другой важной особенностью является тот факт, что расстояние между черными полосами увеличивается с ростом расстояния *z* от образца до детекто-



Рис. 2. Серия изображений отдельной микротрубки, полученная на разных расстояниях (расстояния в сантиметрах указаны числами на фрагментах).

ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ № 1 2011



Рис. 3. Изображение отдельной микротрубки (верхний фрагмент) и график зависимости поперечного и продольного диаметров ее сечения от положения вдоль оси микротрубки. Диаметры получены методом подгонки в результате компьютерного моделирования изображений по программе FIMTIM. Видно, что поперечный диаметр изменяется почти вдвое, в то время как размер изображения почти не изменился.

ра. То есть изображение масштабируется, и легко оценить, что масштабный коэффициент пропорционален  $z^{1/2}$ . Отсюда следуют два вывода: структура изображения микротрубки на больших расстояниях универсальна независимо от ее сечения и истинные размеры микротрубки на этих расстояниях проявляются только через контраст.

На рис. 3 показано изображение другой микротрубки. Для этой микротрубки были получены экспериментальные профили распределения относительной интенсивности в вертикальном направлении на разных участках вдоль оси трубки и проведено количественное определение диаметров сечения методом сравнения результатов компьютерного моделирования профиля интенсивности для разных диаметров сечения с экспериментальным профилем. Использовалась программа FIMTIM. Результаты расчетов показаны на графике, на котором видно, что в области уменьшения контраста поперечный диаметр трубки уменьшился в два раза. Продольный диаметр тоже слегка уменьшился, хотя он и так был очень мал.

#### ТЕОРИЯ

Как было отмечено в [14–16], фазово-контрастные изображения микротрубок в белом пучке СИ реально формируются как некогерентная суперпозиция изображений для различных гармоник, причем вес каждой гармоники (эффективный спектр излучения) необходимо рассчитывать с учетом ее поглощения на пути от источника к детектору. Учет поглощения в образце приводит к кардинальному изменению эффективного спектра. Он имеет максимум при энергии фотонов E = 16 кэВ и резко убывает при уменьшении энергии. То есть даже при отсутствии монохроматора реальный спектр, формирующий изображение, локализован около значения 16 кэВ. Отметим, что в экспериментах с белым пучком СИ нет возможности изменять энергию, а тем более варьировать ее.

Для расчета монохроматического изображения микротрубку можно представить как квазилинейный объект, который быстро изменяет фазу проходящей через него волны при движении поперек оси и медленно — вдоль оси. Выделяя профиль относительной интенсивности I(x) в каком-либо сечении поперек оси, можно пренебречь зависимостью вдоль оси. В этом приближении профиль интенсивности можно описать с помощью однократного интеграла в бесконечных пределах:

$$I(x) = |a(x_0)|^2, \quad a(x_0) =$$
  
=  $\int dx_1 P_K(x_0 - x_1, Z) T(x_1), \quad x_0 = x \frac{z_0}{z_t}.$  (1)

Здесь  $z_0$  — расстояние от источника до объекта,  $z_1$  — расстояние от объекта до детектора,  $z_t = z_0 + z_1$ ,  $Z = z_0 z_1/z_t$ . Таким образом, задача сводится к вычислению свертки двух функций, первая из которых является пропагатором Кирхгофа

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

где  $\lambda$  — длина волны излучения. Вторая функция T(x) описывает воздействие на когерентную волну со стороны объекта. Для объектов малых размеров достаточно учесть изменение фазы и амплитуды волны в рамках геометрической оптики без изменения траектории лучей, т.е. предположить, что все лучи параллельны оптической оси. В этом приближении для пустоты в материале, имеющей эллиптическое сечение, можно исключить однородную часть образца и учесть только искажение волны за счет неоднородности. Тогда T(x) = 1 при |x| > R, а при |x| < R имеем:

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

$$P = \frac{2\pi}{\lambda}\delta R_0, \quad M = P\frac{\beta}{\delta}.$$
(3)

Здесь *R*,  $R_0$  – радиусы эллиптического сечения микротрубки поперек и вдоль пучка соответственно, комплексный показатель преломления среды  $n = 1 - \delta + i\beta$ . Удвоенные значения *R*,  $R_0$ , т.е. диаметры эллиптического сечения, заранее неизвестны и подлежат определению.

Так как подынтегральная функция в (1) не убывает на бесконечности, то для численных расчетов интеграл удобно переписать в следующем виде, используя свойство нормировки пропагатора:

$$a(x_0) = 1 + \int dx_1 P_K(x_0 - x_1, Z) [T(x_1) - 1].$$
 (4)

Монохроматические профили интенсивности вычислялись на сетке точек в интервале от 5 до 40 кэВ и затем суммировались с учетом спектра, показанного в [14—16]. Компьютерное моделирование изображений проводилось по программе FIMTIM, детали можно посмотреть в [15, 16].

Была выполнена большая серия расчетов, которые подтвердили указанную в предыдущем разделе особенность изображений — их универсальность для типичных диаметров сечения микротрубки не более 2 мкм на относительно больших расстояниях более 10 см. Как оказалось, такая универсальность является типичным проявлением дифракции Фраунгофера (изображения в дальнем поле) в фазовых объектах при дополнительном условии, что сдвиг фазы *Р* меньше единицы.

Чтобы лучше понять физику формирования таких изображений, сделаем очевидные приближения и упростим задачу. В частности, можно пренебречь поглощением M = 0, и так как  $z_0 \ge z_1$ , то можно пренебречь конечностью расстояния  $z_0$  и заменить  $x_0$  на x, а Z на  $z_1$ . Заметим, что условие P < 1/2 для SiC и E == 16 кэВ выполняется при  $R_0 < 1.2$  мкм, но это есть как раз наиболее типичный продольный радиус микротрубки. Для справок,  $\lambda = 0.0775$  нм,  $\delta = 2.6 \times 10^{-6}$ . Таким образом, при выполнении указанного условия можно разложить экспоненту T(x) в ряд по степеням аргумента и ограничиться лишь первым членом.

Заметим, что пропагатор Кирхгофа слабо изменяется на поперечных расстояниях, меньших радиуса первой зоны Френеля  $r_1 = (\lambda z_1)^{1/2}$ . Для указанных выше условий на расстоянии 30 см имеем  $r_1 = 4.8$  мкм. Но практически все микротрубки имеют поперечный радиус меньше этого значения. Это значит, что при вычислении интеграла можно пренебречь членом  $\pi (x_1/r_1)^2$  в фазе пропагатора, что как раз является типичным приближением в случае дифракции Фраунгофера. С учетом указанных приближений для функции (4) получаем выражение:

$$a(x) = 1 + i^{1/2} \frac{2\pi^2 \delta}{\lambda r_1} R R_0 \exp\left(i\pi \frac{x^2}{r_1^2}\right) b(x), \qquad (5)$$

где

$$b(x) = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^{1} dt \exp\left(-2i\pi \frac{xR}{r_1^2}t\right) \left(1-t^2\right)^{1/2} = \frac{2x_0}{x} J_1\left(\frac{x}{x_0}\right),$$

$$x_0 = \frac{r_1^2}{2\pi R}.$$
(6)



**Рис. 4.** Универсальный профиль интенсивности поперек изображения мелкой микротрубки (подробности в тексте статьи).

Здесь  $J_1(z)$  — функция Бесселя первого порядка. Заметим, что b(0) = 1.

Относительная интенсивность излучения является квадратом модуля (5). Оставаясь в рамках линейного по  $R_0$  приближения, получаем:

$$I(x) = |a(x)|^2 \approx 1 + \frac{4\pi^2 \delta}{\lambda r_1} R R_0 b(x) \cos\left(\pi \frac{x^2}{r_1^2} + \frac{\pi}{4}\right).$$
 (7)

Полученная формула позволяет сделать интересные, по нашему мнению, выводы. В центральной части изображения, где  $|x| < x_0$ , функция b(x) почти равна единице. Поэтому изменение интенсивности не зависит от радиусов сечения микротрубки и имеет универсальный характер. Универсальное изображение имеет вид френелевской зонной пластинки со светлой центральной зоной и радиусами зон:  $x_n = (4n - 3)(\lambda z_1)^{1/2}/2$ . По мере удаления от центра амплитуда осцилляций уменьшается и становится равной нулю при  $|x| = 3.8 x_0$ . Затем осцилляции снова появляются и продолжают пульсировать по амплитуде. Степень уменьшения осцилляций зависит от поперечного радиуса сечения. А полный контраст масштабируется произведением обоих радиусов, т.е. площадью сечения.

В экспериментах с белым пучком СИ формулу (7) следует усреднить по эффективному спектру излучения. Контраст в центральной точке изменяется очень слабо по сравнению с E = 16 кэВ, как и границы френелевских зон. Однако амплитуда боковых осцилляций очень сильно уменьшается. По этой причине пропадает даже слабая зависимость контраста от поперечного радиуса, и профиль интенсивности становится полностью универсальным. Единственной информацией о структуре микротрубки, которую можно получить по величине контраста в центральной точке изображения, является площадь ее сечения. На рис. 4 показана универсальным.

ная кривая 
$$C(u) = (\langle I(x) \rangle - 1) R_1^2 / (RR_0)$$
, где  $u = x/r_1$ 

ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ № 1 2011

 $R_{\rm l}^2 = \lambda r_{\rm l} / (2^{3/2} \pi^2 \delta)$  и параметры  $r_{\rm l}$ ,  $\lambda$  и  $\delta$  рассчитаны для E = 16 кэВ, соответствующей максимуму в спектре излучения,  $\langle I(x) \rangle$  – интенсивность, усредненная по эффективному спектру излучения. Эта функция не зависит от расстояния  $z_{\rm l}$  и размеров сечения микротрубки. Соответственно, экспериментально измеряемый профиль интенсивности изображения микротрубок при соблюдении указанных выше условий описывается формулой  $\langle I(x) \rangle = 1 + (RR_0/R_{\rm l}^2)C(x/r_{\rm l}).$ 

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что метод фазового контраста в белом пучке синхротронного излучения имеет ограничения при использовании его для изображения микротрубок в SiC с относительно малым сечением при больших расстояниях. В этом случае сдвиг фазы волны, создаваемый микротрубкой, меньше единицы, и работает теория возмушений, согласно которой контраст просто пропорционален продольному радиусу. С другой стороны, в этом случае выполняются условия дифракции Фраунгофера. В этом режиме дифракции изображение представляет собой стандартный вид зон Френеля, размеры которых зависят только от расстояния от образца до детектора, а поперечный радиус микротрубки просто линейно масштабирует контраст. В результате изображение имеет стандартный характер, а по величине контраста можно определить только площадь сечения микротрубки.

По этой причине для определения морфологии микротрубок нужно стараться получать изображения на возможно меньших расстояниях образец—детектор, а также получать изображения под различными углами между осью микротрубки и падающим пучком, чтобы увеличить продольный диаметр сечения. Развитая теория позволила объяснить особенности реально наблюдаемых изображений микротрубок в SiC.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wang Y., Ali G., Mikhov M. et al. // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. P. 013540.
- 2. *Müller St.G., Brady M., Burk A. et al.* // Superlattices and Microstructures. 2006. V. 40. P. 195.
- 3. Hatakeyama T., Ichinoseki K., Fukuda K. et al. // J. Cryst. Growth. 2008. V. 310. P. 988.
- Epelbaum B.M., Hofmann D. // J. Cryst. Growth. 2001. V. 225. P. 1.
- Yakimova R., Vouroutzis N., Syväjärvi M. et al. // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. P. 034905.
- Gutkin M.Yu., Sheinerman A.G., Argunova T.S. et al. // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. P. 7076.
- 7. *Gutkin M.Yu., Sheinerman A.G., Argunova T.S.* // Phys. Status Solidi. C. 2009. V. 6. P. 1942.
- Gutkin M.Yu., Sheinerman A.G., Argunova T.S. et al. // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 093518.
- Gutkin M.Yu., Sheinerman A.G., Argunova T.S. et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 064117.
- Gutkin M.Yu., Sheinerman A.G., Smirnov M.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 151905.
- 11. Hirth J.P. // Acta Mater. 1999. V. 47. P. 1.
- 12. *Huang X.R., Dudley M., Vetter W.M. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 353.
- Chen Yi, Dudley M., Sanchez E., Macmillan M. // J. Electron. Mater. 2008. V. 37. P. 713.
- 14. *Kohn V.G., Argunova T.S., Je J.-H.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 171901.
- 15. *Аргунова Т.С., Кон В.Г., Је Ј.-Н.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2008. № 12. Р. 48.
- 16. Argunova T., Kohn V., Jung J-W., Je J.-H. // Phys. Status Solidi. A. 2009. V. 206. P. 1833.
- 17. Vodakov Yu.A., Roenkov A.D., Ramm M.G. // Phys. Status Solidi. B. 1997. V. 202. P. 177.

# Peculiarities of Phase-Contrast Images of Micropipes in SiC in White Synchrotron Radiation Beam

### V. G. Kohn, T. S. Argunova, Jung Ho Je

The peculiarity of phase-contrast images of micropipes in the silicon carbide in white synchrotron radiation beam was studied both experimentally and theoretically. It consists in the fact that changing the size of the micropipe cross-section does not lead to a change of the size of image but influences only the contrast. The experiment has been performed on the synchrotron radiation source in Pohang, Republic of Korea. This phenomenon can be explained by a small phase shift from the micropipe, on the one hand, and by realization of the Fraunhofer diffraction condition, on the other hand, when the transverse diameter of the micropipe is less than the diameter of the first Fresnel zone. As a rule, in the X-ray optics the near field condition is fulfilled when only the edges of the object are imaged. However, the micropipes are very small and the standard edge theory is not applicable. The universal intensity distribution profile is obtained for the micropipes with very small cross-section.