

05

## Рентгенотопографический контраст краевых дислокаций, перпендикулярных поверхности кристалла 6H–SiC

© А.О. Окунев, И.Л. Шульпина

Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,  
Великий Новгород

E-mail: oao@novsu.ac.ru

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

E-mail: iren.shulpina@mail.ioffe.ru

В окончательной редакции 17 февраля 2005 г.

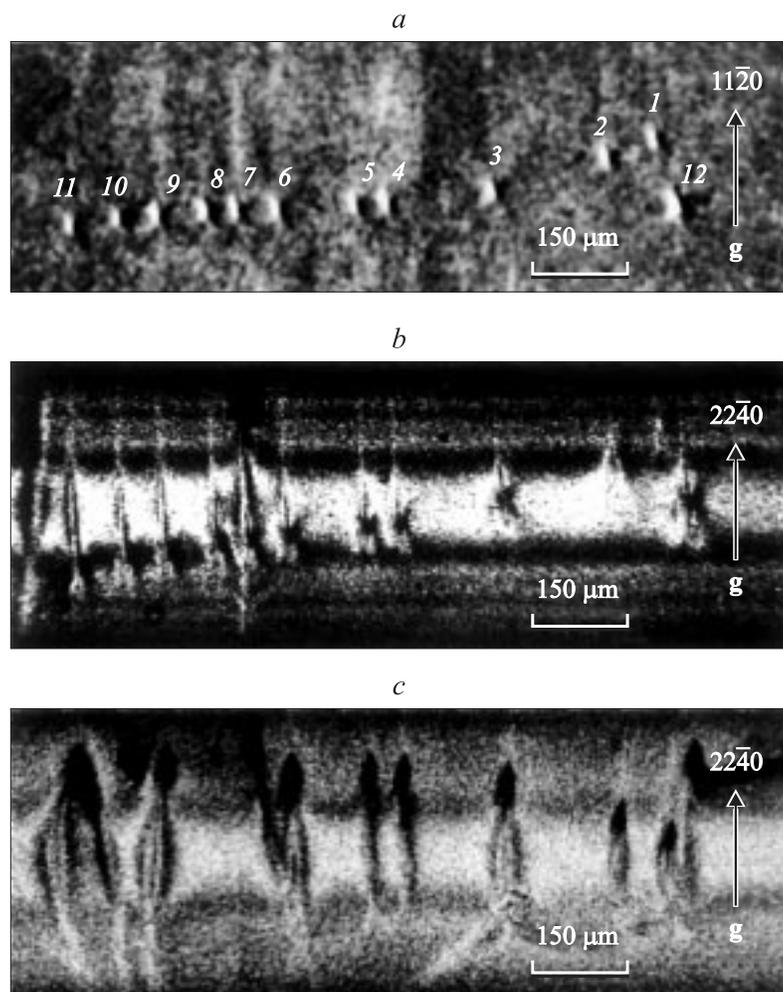
Описаны особенности рентгенотопографических изображений краевых дислокаций, перпендикулярных поверхности (0001) монокристалла 6H–SiC. Проводится сопоставление контраста, полученного методом аномального прохождения рентгеновских лучей и методом секционной топографии в геометрии прохождения.

К настоящему времени накоплен большой материал при исследовании дислокаций, выходящих на поверхность кристалла, по рентгенотопографическим розеткам контраста [1], но некоторые вопросы остаются нерешенными. В частности, неизвестной является зависимость диаметра розетки контраста от длины линии дислокации. Эксперименты для решения этого вопроса возможно проводить на выращенных методом Лели монокристаллах SiC, для которых характерно наличие дислокаций, распространяющихся в базисной плоскости, а затем поворачивающихся на  $90^\circ$  и выходящих на поверхность кристалла [3]. Таким образом, в образце могут находиться дислокации, имеющие прямолинейные участки краевого типа, параллельные оси [0001]. Кроме того, кристаллы SiC, выращенные методом Лели, часто имеют низкую плотность дислокаций ( $N_d < 10^2 \text{ см}^{-2}$ , что позволяет использовать их для специальных дифракционных экспериментов, направленных на изучение контраста от отдельных дислокаций.

Для исследований был выбран кристалл с рядом однотипных дислокаций, оси которых меняют направление с  $[\bar{1}120]$  на  $[0001]$  и выходят на поверхность  $(0001)$  кристалла. Особенностью рассматриваемых дислокаций является то, что их глубинные участки идут практически параллельно поверхности кристалла. Это делает чрезвычайно удобным применение секционной топографии в геометрии прохождения (СТП) для определения глубины их залегания [4].

Образец представлял собой пластину толщиной  $475\ \mu\text{m}$ , вырезанную параллельно базисной плоскости  $(0001)$ . Для него был получен ряд топограмм методом аномального прохождения рентгеновских лучей (АПРЛ), по которым определялось положение кристалла для съемки секционных топограмм. Секционные топограммы снимались в двух положениях: в первом случае рентгеновский пучок пересекал ряд дислокаций в том месте, где они были параллельны поверхности, во втором — приходился на выход дислокаций на поверхность образца. Съемки проводились на лабораторных источниках рентгеновского излучения (трубки БСВ-10 и БСВ-22), топограммы по методу АПРЛ получены с использованием  $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -излучения и отражений типа  $11\bar{2}0$  ( $\mu t \approx 6.7$ , где  $\mu$  — коэффициент фотоэлектрического поглощения,  $t$  — толщина кристалла); секционные топограммы получены в  $\text{MoK}_{\alpha 1}$ -излучении с использованием отражений  $11\bar{2}0$  и  $22\bar{4}0$  ( $\mu t \approx 0.8$ ), ширина щели перед кристаллом составляла  $20\ \mu\text{m}$ . Топограммы фиксировались на фотопластинки для ядерных исследований с эмульсией МР и для дальнейших измерений оцифровывались непосредственно с негатива при помощи микроскопа МИН-8 и фотоаппарата Olympus Camedia C-5060.

На рис. 1, *a* показан фрагмент топограммы с рассматриваемыми дислокациями, полученной методом АПРЛ. Перпендикулярные поверхности участки дислокаций сформировали розетки контраста, характерные для краевых дислокаций [1,2]. Контраст от краевой дислокации складывается из контраста от глубинной части дислокации и контраста, обусловленного релаксацией напряжений на свободной поверхности кристалла. На данной топограмме видны только четыре (два черных и два белых) наиболее близких к ядру дислокации лепестка розеток, сформированные полем деформаций в глубине кристалла. Эта зона контраста розетки формируется исключительно за счет динамических эффектов дифракции — вследствие изменения плотности траекторий блоховских волн в упругом поле дислокации возникают специфиче-

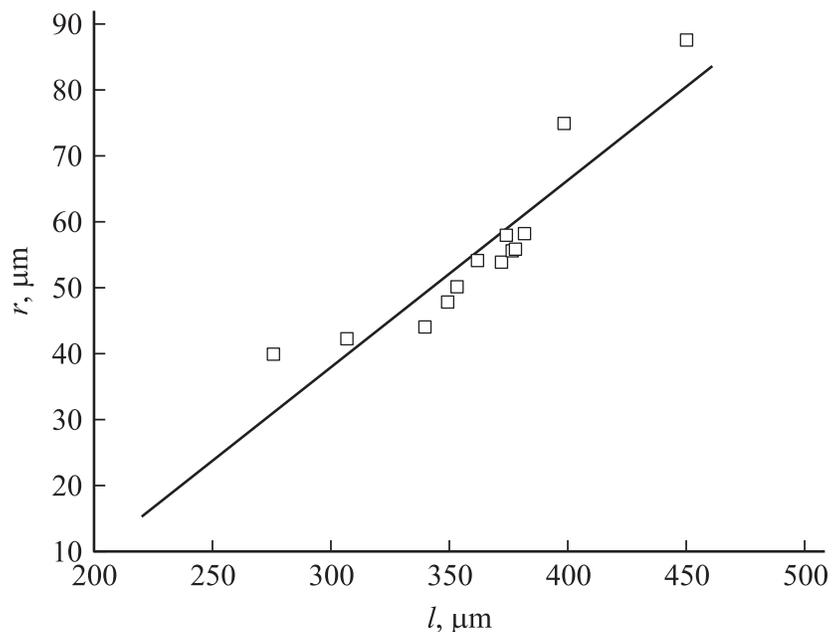


**Рис. 1.** Рентгеновские топограммы ряда краевых дислокаций, выходящих на поверхность кристалла 6H-SiC, полученные методами аномального прохождения рентгеновских лучей (*a*) и секционной топографии в геометрии прохождения: секционные топограммы перпендикулярных поверхности участков дислокаций (*b*) и параллельных поверхности участков (*c*).

ские явления каналирования [5]. Плоскость антисимметрии розетки совпадает с плоскостью скольжения дислокации. Черные лепестки соответствуют области сжатия вблизи экстраполуплоскости, которая у всех дислокаций на рисунке расположена справа, белые — области растяжения [1]. Все дислокации имеют вектор Бюргерса  $\mathbf{b} = \frac{a}{3} [11\bar{2}0]$ . Глубинные винтовые участки дислокаций, вытянутые вдоль вектора дифракции, находятся в так называемом „особом положении“ и формируют на топограмме слабый белый (отрицательный) контраст. В формировании изображения глубинной части дислокации, перпендикулярной поверхности кристалла, вносят свой вклад все участки линии дислокации, контраст от отдельных участков суммируется, приводя к увеличению размера розетки. Дислокации, у которых больше длина участка, перпендикулярного поверхности кристалла, формируют розетки контраста большего размера. Наибольший размер на рис. 1, *a* имеет розетка под номером 12, наименьший — под номером 1. Размеры розеток были сопоставлены с длинами участков дислокаций, участвующих в формировании изображения.

Если при съемках методом СТП параллельные поверхности (0001) кристалла участки дислокаций пересекали падающий пучок, то они формировали на секционных топограммах яркое прямое (кинематическое) изображение (рис. 1, *c*). Исходя из геометрических соображений, по положению прямого изображения были определены глубины залегания этих участков и, следовательно, длины параллельных оси [0001] краевых участков дислокации, ответственных за формирование розетки. При расчетах принимались во внимание геометрические размеры падающего на кристалл пучка.

Определенная экспериментально зависимость диаметров розеток от длины участка дислокации, формирующего розетку контраста, приведена на рис. 2. Диаметр розеток измерялся по азимуту  $45^\circ$ , отсчитываемому от плоскости скольжения дислокации (плоскости антисимметрии розетки). Для сравнения на графике показаны также размеры розетки от прямолинейной краевой дислокации, проходящей от одной поверхности до другой в другом образце 6H-SiC (толщина образца  $450 \mu\text{m}$ ). Анализ топограмм показывает, что при данных условиях эксперимента изображения розеток могут быть распознаны на топограмме, если имеют диаметр  $\geq 20 \mu\text{m}$ . Аппроксимация графика (рис. 2) на область меньших размеров розеток позволяет оценить длину соответствующего краевого участка дислокации:  $l \geq 240 \mu\text{m}$ . Это означает, что краевые



**Рис. 2.** Экспериментально установленная зависимость диаметра  $r$  розетки контраста краевой дислокации в  $6\text{H-SiC}$  (метод аномального прохождения рентгеновских лучей) от длины  $l$  линии дислокации.

дислокации меньшей длины, выходящие на поверхность образца под углом, близким к  $90^\circ$ , не будут давать изображения в виде розеток, по которым могут быть надежно идентифицированы их характеристики (направление и знак вектора Бюргерса, положение плоскости скольжения и экстраплоскости).

При съемке кристалла с другой стороны по методу АПРЛ (входная и выходная для рентгеновских лучей стороны кристалла менялись местами) изображения от краевых участков дислокаций не фиксировались, несмотря на то что они подходили к выходной поверхности кристалла на расстояние до  $60 \mu\text{m}$ . Изображения в виде розеток дают лишь дислокации, выходящие на поверхность образца.

Из рис. 1, *b* видно, что секционное изображение перпендикулярной поверхности кристалла краевой дислокации представляет собой розетку контраста более сложной формы, чем в методе АПРЛ. Наиболее крупными деталями изображения являются темные лепестки, расположенные по обе стороны от плоскости скольжения дислокации. Обращает на себя внимание асимметрия секционных розеток — у них более выражены темные лепестки, расположенные на рис. 1, *b* справа от осей дислокаций и соответствующие области сжатия решетки вблизи экстраплоскости. Таким образом, в методе СТП, как и в методе АПРЛ, по одной топограмме возможно определение направления и знака вектора Бюргерса — у всех дислокаций на рис. 1 вектор Бюргерса совпадает по направлению с вектором дифракции. Размер розеток на секционных топограммах, как и в методе АПРЛ, увеличивается с увеличением длины краевого участка дислокации.

Чтобы краевые дислокации при симметричной съемке методом АПРЛ сформировали на топограмме розетки контраста, их оси должны составлять с выходной для рентгеновских лучей поверхностью кристалла углы, близкие к  $90^\circ$ . Размер розеток (при прочих равных условиях) зависит от длины участков дислокаций, перпендикулярных поверхности: чем длиннее дислокация, тем больше розетка. Розетки наибольшего размера формируют дислокации, пронизывающие толстый кристалл насквозь. Такие особенности изображения свойственны только краевым дислокациям, так как контраст от перпендикулярной поверхности винтовой дислокации в методе АПРЛ обусловлен только релаксацией поля напряжений на поверхности кристалла и участки такой дислокации, расположенные в объеме кристалла, не участвуют в формировании розетки. Использование для идентификации дислокаций двух методов АПРЛ и СТП обогащает информационные возможности каждого из этих методов в отдельности.

Авторы выражают благодарность Е.Н. Мохову за предоставленные образцы.

Работа поддержана грантом РФФИ № 02–02–17661 и программой РАН „Новые материалы и структуры“.

## Список литературы

- [1] Данильчук Л.Н., Дроздов Ю.А., Окунев А.О. и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. Т. 68. № 11. С 24–33.
- [2] Ткаль В.А., Окунев А.О., Дроздов Ю.А. и др. // Поверхность. 2004. № 1. С. 32–38.
- [3] Трегубова А.С., Шульпина И.Л. // ФТТ. 1972. Т. 14. № 9. С. 2670–2674.
- [4] Suvorov E.V., Polovinkina V.I., Nikitenko V.I. et al. // Phys. stat. sol. (a). 1974. V. 26. P. 385–394.
- [5] Инденбом В.Л., Чуховский Ф.Н. // УФН. 1972. Т. 107. № 2. С. 229–265.