

# Секционные изображения дислокаций, перпендикулярных поверхности монокристаллов $6H$ -SiC

© А.О. Окунев, Л.Н. Данильчук, В.А. Ткаль

Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,  
173003 Великий Новгород, Россия

E-mail: oao@novsu.ac.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 27 февраля 2006 г.)

Получены и интерпретированы секционные топограммы краевых и винтовых дислокаций с осью [0001] в  $6H$ -SiC, дано объяснение формированию изображений в этом случае. Экспериментально исследованы особенности контраста при различном расположении дислокаций в пределах треугольника Бормана. Показано, что по изображению на секционной топограмме краевой и винтовой дислокаций, перпендикулярных поверхности кристалла, однозначно определяется знак вектора Бюргерса. Определение знака вектора Бюргерса винтовой дислокации возможно также по ее изображению, полученному методом проекционной топографии Ланга. Выявлен вклад дальнего поля деформаций в секционные изображения краевых и винтовых дислокаций, перпендикулярных поверхности кристалла. Проведено сопоставление экспериментального контраста, полученного методами секционной топографии и топографии на основе эффекта Бормана.

Работа поддержана РФФИ (грант № 06-02-16230-а).

PACS: 61.72.Ff, 61.72.Dd, 61.72.Lk

## 1. Введение

В методах рентгеновской топографии интерпретация экспериментальных топограмм проводится путем сопоставления полученных дифракционных изображений дефектов с уже идентифицированными изображениями и с результатами моделирования контраста. Сложность процессов дифракции рентгеновских лучей в неоднородных полях деформаций, создаваемых дефектами кристаллической решетки, обуславливает важность проведения экспериментов, направленных на изучение контраста от индивидуальных дефектов при различных условиях дифракции. Понимание механизмов, лежащих в основе формирования контраста, облегчает расшифровку рентгеновских топограмм. В работах [1–4] проводятся анализ с единой точки зрения различных типов контраста и выявление механизмов, определяющих формирование изображений. В этих работах при помощи моделирования по уравнениям Такаги анализируется контраст от винтовых и  $60^\circ$  дислокаций в монокристаллах кремния, полученный методом секционной топографии Ланга в геометрии прохождения (СТП).

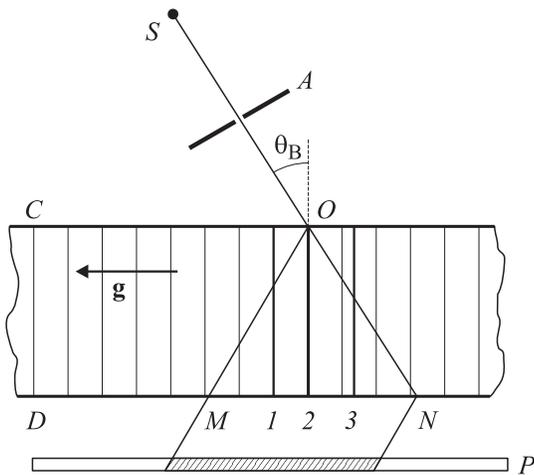
Перспективным материалом для исследования контраста от дефектов является карбид кремния. Монокристаллы SiC, выращенные методом Лели, часто имеют низкую плотность дислокаций ( $N_d < 10^2 \text{ cm}^{-2}$ ) и для них характерно наличие прямолинейных краевых и винтовых дислокаций с осями вдоль направления [0001] [5]. Применение метода рентгеновской топографии на основе эффекта Бормана (РТБ) [6] и поляризационно-оптического анализа (ПОА) [7] позволяет однозначно определить все основные параметры дислокаций — кристаллографическое направление линии дислокации, направление и знак вектора Бюргерса, мощность дислока-

ции. Образцы с расшифрованной дефектной структурой можно использовать для специальных дифракционных экспериментов, направленных на изучение контраста от отдельных дислокаций и позволяющих выявить его особенности, общие для любых кристаллов.

С другой стороны, SiC является перспективным материалом электронной техники, и разработка эффективных и неразрушающих методов анализа дефектов в этом материале имеет не только научную, но также практическую и методическую ценность. В дальнейшем метод СТП и РТБ могут быть использованы для исследования дефектов в SiC, выращенном модифицированным методом Лели. Секционные топограммы от краевых и винтовых дислокаций в SiC, расположенных в плоскости рассеяния перпендикулярно вектору дифракции, впервые были получены в работах [8–10].

## 2. Методика эксперимента

Для дифракционных экспериментов отобраны высоко совершенные кристаллы SiC политапа  $6H$ , выращенные методом Лели. Кристаллы были легированы азотом, имели  $n$ -тип проводимости и концентрацию нескомпенсированных доноров  $N_D - N_A = 8 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Образцы для исследований вырезались в виде пластинок, параллельных базисной плоскости (0001). Толщина образцов 450–500  $\mu\text{m}$  обеспечивала при использовании  $\text{MoK}_\alpha$ -излучения значение параметра  $\mu t$  в пределах 0.7–0.8, т.е. выполнялось так называемое в рентгеновской кристаллооптике условие „тонкого“ кристалла, необходимое для секционной топографии. Предварительно образцы были исследованы методами ПОА и РТБ и содержали краевые и смешанные дислокации системы скольжения  $\{1\bar{1}00\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$  с плотностью 10–100  $\text{cm}^{-2}$ ,



**Рис. 1.** Схема получения секционных топограмм.  $S$  — источник рентгеновских лучей,  $A$  — щель,  $P$  — фотопластинка,  $CD$  — след отражающей плоскости,  $ON$  и  $OM$  — направления падающего и дифрагированного пучка рентгеновских лучей,  $\theta_B$  — угол Брэгга,  $\mathbf{g}$  — вектор дифракции. Цифрами 1–3 обозначены различные положения исследуемых дислокаций в треугольнике Бормана  $OMN$ .

а также винтовые дислокации с осью  $[0001]$  (плотность  $1\text{--}6\text{ см}^{-2}$ ). В настоящей работе исследовался полученный методом СТП контраст от прямолинейных дислокаций, перпендикулярных поверхности образцов и пронизывающих их от одной поверхности до другой. При использовании симметричной съемки такие дислокации лежат в плоскости рассеяния перпендикулярно вектору дифракции. Схема дифракционного эксперимента показана на рис. 1.

В пределах области  $OMN$  (треугольник рассеяния или треугольник Бормана) распространяются, интерферируя между собой, как волны исходного волнового поля, возникающего при входе излучения в кристалл, так и новых волновых полей, порождаемых областью сильных искажений решетки вблизи ядра дефекта [11]. Для секционной топографии использовалась рентгеновская трубка БСВ-22, толщина щели перед образцом составляла  $20\text{ мкм}$ , расстояние фокус рентгеновской трубки–образец было  $\sim 120\text{ см}$ . Для регистрации топограмм применялись ядерные фотопластинки с эмульсией типа  $MP$ , обеспечивающие разрешение  $\sim 760\text{ лр}$ . Время съемки одной топограммы составляло при этом  $\sim 20\text{ ч}$ . Изображения дефектов оцифровывались непосредственно с негатива с использованием микроскопа МИН-8 и цифрового фотоаппарата Olympus C-5060. Топограммы приводятся так, как они видны со стороны падающего на кристалл рентгеновского пучка. Контраст на рисунках соответствует зафиксированному на фотопластинке, т.е. области с повышенной интенсивностью рентгеновского излучения имеют черный контраст, с пониженный — белый.

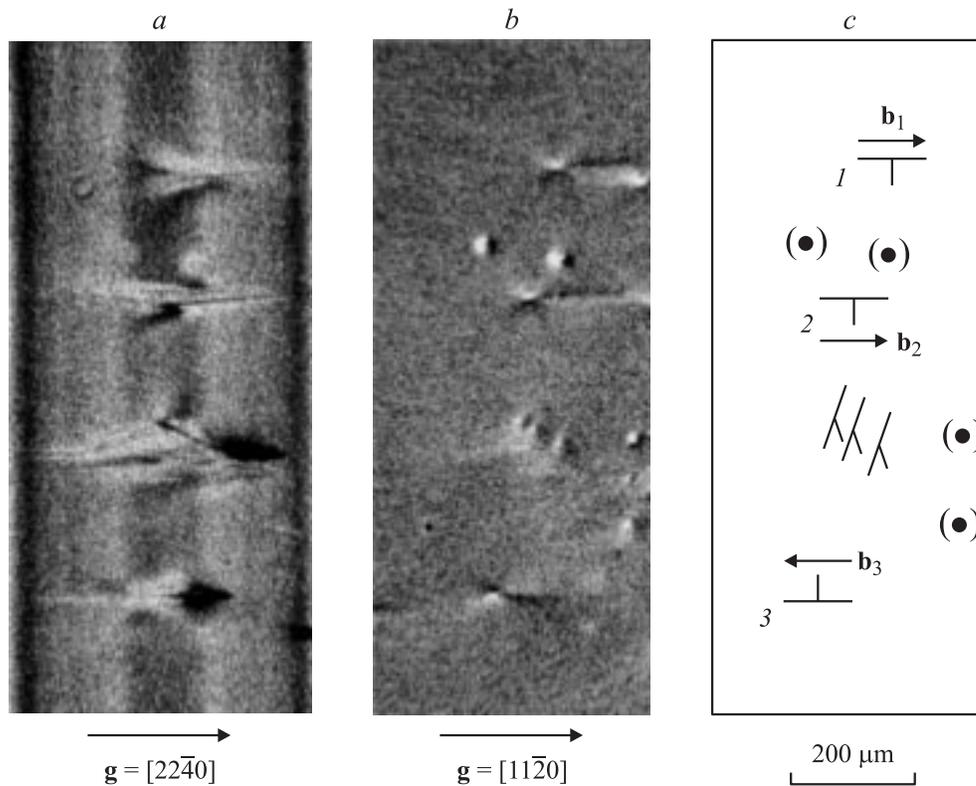
### 3. Экспериментальные изображения дислокаций, перпендикулярных поверхности образца

На рис. 2,  $a$  показана секционная топограмма области кристалла 6H-SiC, полученная при использовании отражения второго порядка от плоскостей типа  $(11\bar{2}0)$ . Топограмма того же места кристалла, полученная методом РТБ, представлена на рис. 2,  $b$ , взаимное расположение дислокаций показано на рис. 2,  $c$ . Секционная топограмма содержит (сверху вниз): изображения двух отрицательных краевых дислокаций, помеченных цифрами 1 и 2, изображения двух микродефектов, изображение группы из трех смешанных дислокаций с плоскостью скольжения  $(10\bar{1}0)$  и вектором Бюргерса  $\mathbf{b} = a/3[\bar{1}2\bar{1}0]$ , наклонных к поверхности кристалла, и изображение положительной краевой дислокации (отмечена цифрой 3). На топограмме, полученной методом РТБ помимо перечисленных выше дефектов с правой стороны видны еще фрагменты изображений двух краевых дислокаций, не попавших целиком в исследуемую область, и изображения двух микродефектов.

Краевые дислокации перпендикулярны поверхностям кристалла и вектору дифракции  $\mathbf{g}$ . Положительные и отрицательные дислокации имеют одинаковые плоскости скольжения  $(\bar{1}100)$  и отличаются направлением вектора Бюргерса: у положительной дислокации 3 экстроплоскость подходит к плоскости скольжения сверху, и соответственно вектор Бюргерса  $\mathbf{b}_3 = a/3[\bar{1}\bar{1}20]$  направлен влево; у отрицательных дислокаций 1 и 2 экстроплоскость расположена ниже плоскости скольжения, и векторы Бюргерса  $\mathbf{b}_1 = \mathbf{b}_2 = a/3[11\bar{2}0]$  направлены вправо.

На топограмме 2,  $b$  краевые дислокации формируют характерные черно-белые розетки контраста, антисимметричные относительно плоскости скольжения дислокации. Положение розеток контраста от краевых дислокаций соответствует точкам выхода дислокаций на поверхность кристалла. Основную зону контраста этих розеток составляют четыре лепестка — два черных, расположенных со стороны экстроплоскости и характеризующих зону сжатия, а также два белых по другую сторону плоскости скольжения, характеризующих зону растяжения [6]. Соответственно положительные и отрицательные дислокации на рис. 2,  $b$  имеют противоположную окраску лепестков розетки. Кроме того, розетки от краевых дислокаций имеют еще по два длинных лепестка (черный и белый), вытянутых вдоль вектора дифракции. Описанные изображения характерны для краевых дислокаций, когда вектор дифракции коллинеарен вектору Бюргерса. В данном случае выполняется равенство  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = \pm 2$ .

Зарегистрированные микродефекты по геометрическому критерию должны быть отнесены к микродефектам А-типа [5]. Их изображения на рис. 2,  $b$  имеют вид двухлепестковой розетки, черный лепесток которой рас-

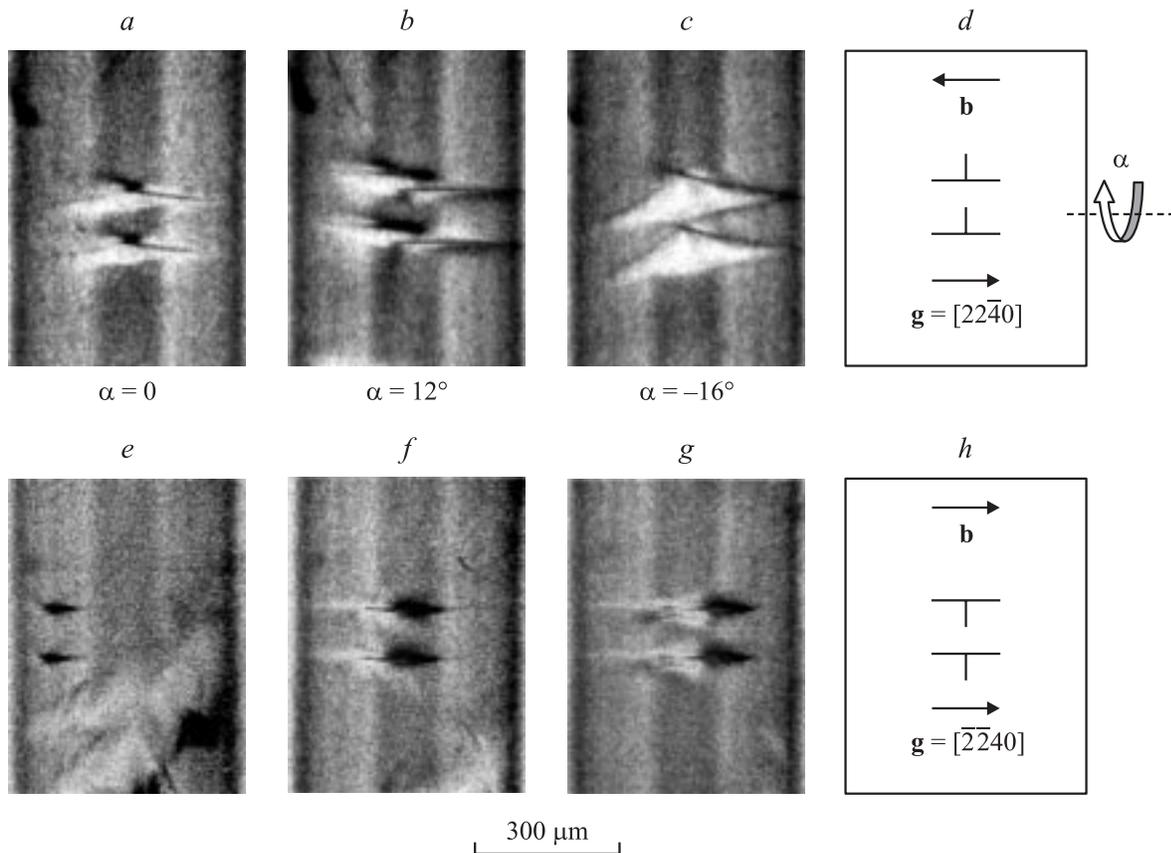


**Рис. 2.** Топограммы кристалла  $6H\text{-SiC}$ , полученные методом СТП (*a*), методом РТБ (*b*) и схема расположения дефектов в кристалле (*c*).

положен со стороны конца вектора дифракции  $\mathbf{g}$ . Линия нулевого контраста розетки параллельна отражающим плоскостям. Сопоставление с результатами моделирования контраста в методике РТБ [6] показывает, что эти микродефекты расположены вблизи выходной для рентгеновских лучей поверхности кристалла и деформируют решетку по типу „внедрения“. На секционной топограмме (рис. 2, *a*), полученной с использованием отражения второго порядка от того же семейства отражающих плоскостей, изображения этих микродефектов имеют вид светлых кругов примерно такого же размера без видимых деталей. Сопоставление изображений микродефектов и дислокаций на рис. 2, *a* и *b* позволяет уточнить расположение дислокаций относительно треугольника рассеяния на топограмме, полученной методом СТП. Дислокация 1 смещена в сторону дифрагированного пучка рентгеновских лучей, дислокация 2 расположена вдоль вертикальной биссектрисы треугольника Бормана, дислокация 3 смещена в сторону падающего пучка. Положение линий дислокаций в пределах треугольника рассеяния показано на рис. 1. Обращает на себя внимание принципиальное отличие изображений дислокаций 1 и 2 от изображения 3. Первые два представляют собой сложные асимметричные розетки контраста, в которых выделяется яркий лепесток положительного (черного) контраста, расположенный вблизи ядра дислокации со стороны экстроплоскости, тогда как изображение

дислокации 3 симметрично относительно плоскости скольжения дислокации.

Дополнительные эксперименты, проведенные на различных образцах, показали, что изображения дислокаций, показанные на рис. 2, *a*, являются типичными для краевых дислокаций с осью  $[0001]$  в  $6H\text{-SiC}$ . Если дислокация расположена вблизи биссектрисы треугольника рассеяния (как дислокация 2 на рис. 2, *a*), то характерными деталями изображения являются яркий короткий лепесток, наклонный к плоскости скольжения дислокации и расположенный вблизи середины основания треугольника рассеяния, а также длинный узкий лепесток, вытянутый вдоль вектора дифракции. Изображение положительной дислокации, т. е. имеющей противоположное направление вектора Бюргерса, является симметричным относительно плоскости рассеяния изображению отрицательной дислокации (рис. 3, *a–c*). Таким образом, по расположению ближайшего к оси дислокации лепестка контраста на секционной топограмме можно однозначно определить положение экстроплоскости и, следовательно, знак вектора Бюргерса дислокации. Наблюдающаяся асимметрия изображения дислокации не обусловлена отклонениями оси дислокации от направления  $[0001]$ . Для определения влияния на изображение отклонения оси дислокации от плоскости рассеяния были проведены съемки при повороте кристалла вокруг вектора обратной решетки на неболь-



**Рис. 3.** Секционные изображения двух краевых дислокаций в 6H-SiC, расположенных вдоль биссектрисы треугольника рассеяния (*a–c*) и пересекающих падающий пучок (*e–g*), а также соответствующие схемы расположения дислокаций в кристалле (*d, h*).

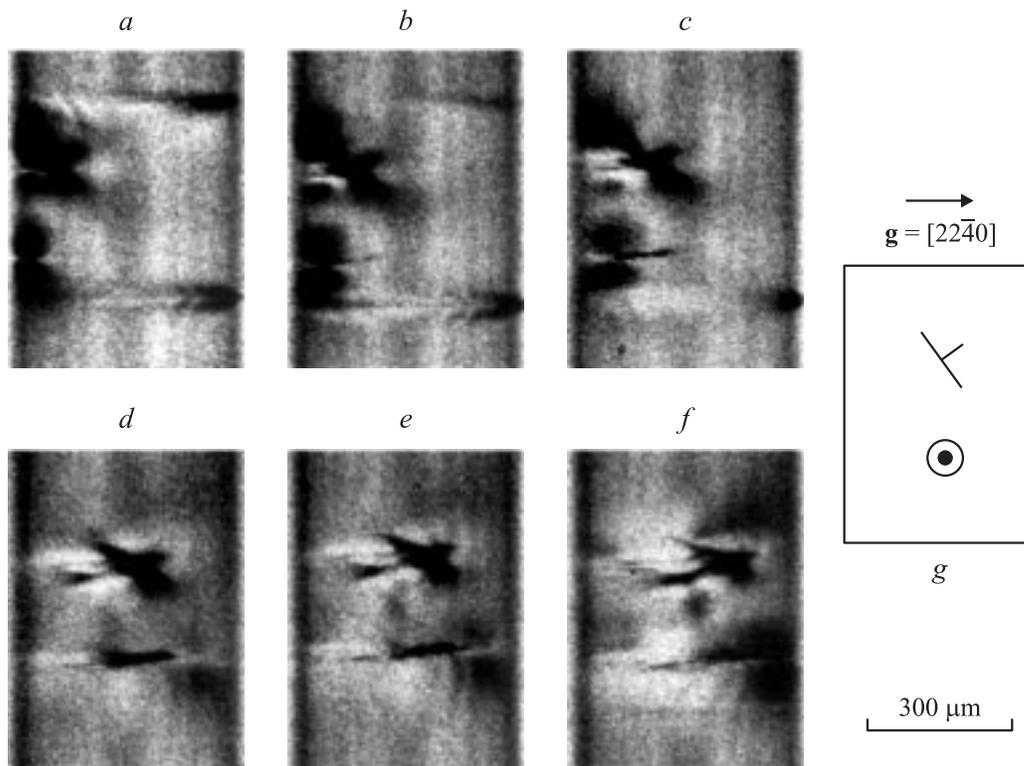
шие (до  $20^\circ$ ) углы (рис. 3, *a–c*). Сравнение топограмм показало, что основные особенности изображений при этом сохраняются.

Если дислокация пересекает прямой пучок (как дислокация 3 на рис. 2, *a*), то основной особенностью изображения является яркое прямое (кинематическое) изображение. На изображениях дислокации в этом случае отсутствуют особенности, позволяющие определить направление и знак вектора Бюргера. На рис. 3, *e–g* показано изменение изображения при перемещении линии дислокации от правого края (точка *N* на рис. 1) к середине треугольника рассеяния. Прямое изображение дислокации, формирующееся в области пересечения дислокации с падающим пучком, проектируется на выходную поверхность вдоль направления дифрагированного пучка, параллельного *OM*. По расположению прямого изображения можно определить глубину, на которой дислокация пересекает прямой пучок [1]. Так, на рис. 3, *f* прямое изображение расположено в центре основания треугольника Бормана и дислокация пересекает прямой пучок на глубине, равной половине толщины кристалла.

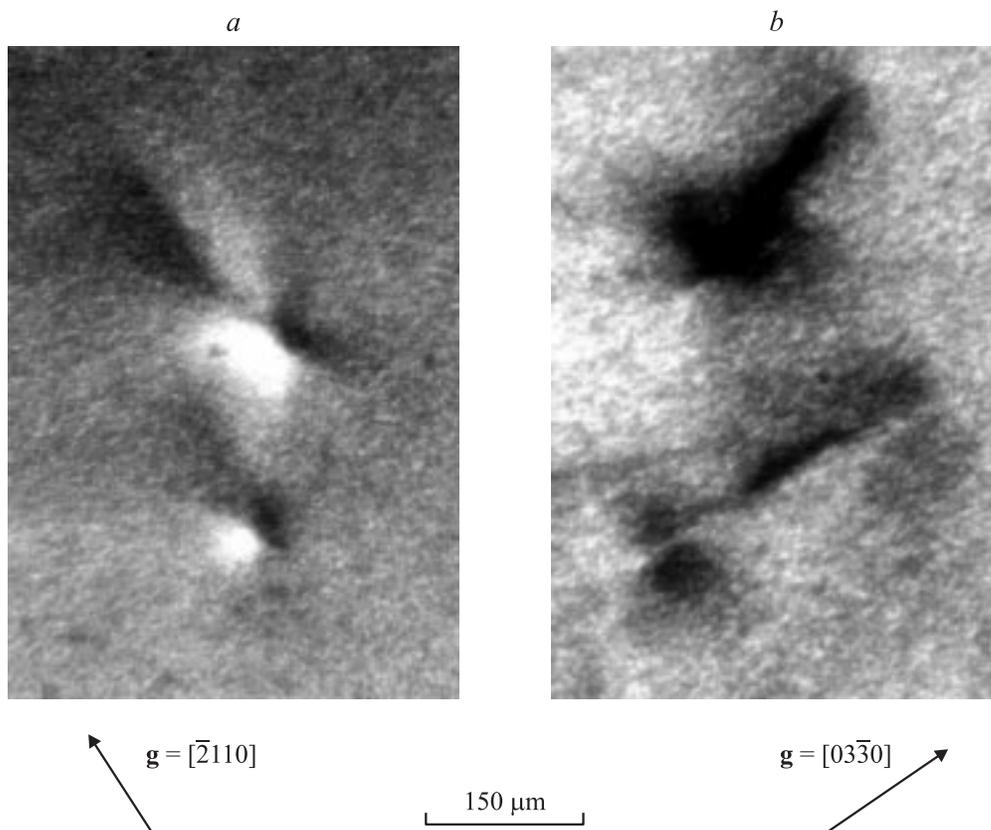
На рис. 4, *a–f* приведены секционные топограммы другого кристалла SiC с левовинтовой дислокацией

и группой краевых дислокаций, перпендикулярных поверхности образца. Взаимное расположение дефектов показано на рис. 4, *g*. Определение типов и знаков дислокаций проводилось методом РТБ. Винтовая дислокация имеет минимально возможное для кристаллов 6H-SiC значение вектора Бюргера  $|\mathbf{b}| = 1.51 \text{ nm}$ . На топограмме, полученной методом РТБ (рис. 5, *a*), она формирует изображение в виде двухлепестковой розетки контраста, причем слева, если смотреть вдоль вектора дифракции, располагается лепесток с отрицательным (белым) контрастом. Это позволяет определить знак дислокации — дислокация является левовинтовой [6]. Группа краевых дислокаций состоит примерно из семи близко расположенных дислокаций с плоскостью скольжения  $(01\bar{1}0)$  и вектором Бюргера, направленным вдоль оси  $[\bar{2}110]$ . Угол между плоскостью скольжения этих дислокаций и вектором дифракции составляет  $60^\circ$ . Отдельные изображения дислокаций методами рентгеновской топографии не разрешаются. Суммарное поле деформаций этих дислокаций формирует на рис. 5, *a* одну большую розетку контраста.

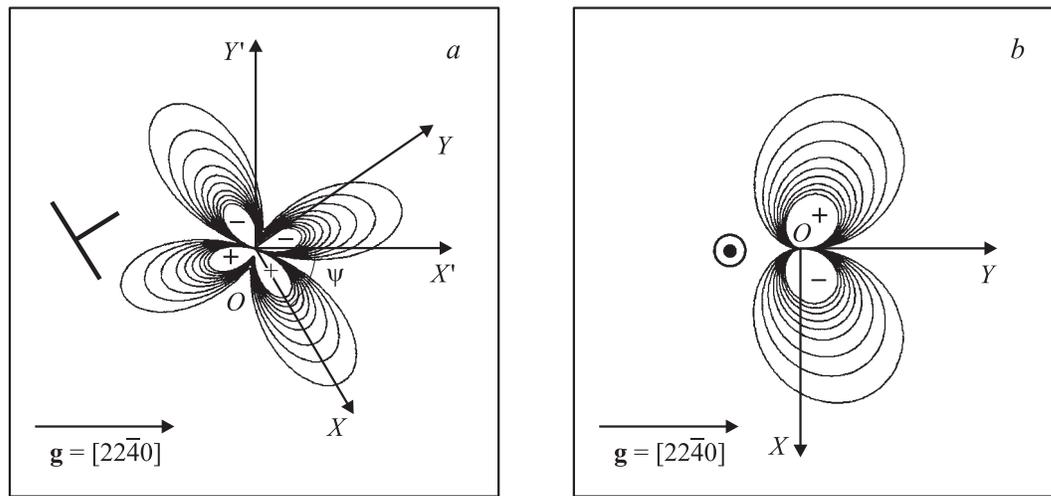
Рис. 4, *a–f* демонстрируют изменение контраста при перемещении этих дефектов в пределах треугольника Бормана. Изображение группы краевых дислокаций в



**Рис. 4.** Секционные изображения группы краевых дислокаций и винтовой дислокации, перпендикулярных поверхности образца  $6H\text{-SiC}$  (*a–f*), и схема их расположения в кристалле (*g*).



**Рис. 5.** Изображения группы краевых дислокаций и винтовой дислокации, перпендикулярных поверхности образца  $6H\text{-SiC}$ , полученные методом РТБ (*a*) и методом проекционной топографии Ланга (*b*).



**Рис. 6.** Розетки эффективной разориентации отражающих плоскостей вокруг краевой (а) и левовинтовой (b) дислокаций в 6H-SiC. В случае (а) учитывалось только собственное поле дислокации, в случае (b) — только релаксационное поле на поверхности выхода лучей.

основном описывается четырехлепестковой розеткой положительного (черного) контраста. Винтовая дислокация формирует изображение в виде двух кругов черного контраста в том случае, когда пересекает прямой или дифрагированный пучок вблизи выходной для рентгеновских лучей поверхности кристалла.

Форма экспериментальных изображений на секционных топограммах была сопоставлена с расчетными розетками эффективной разориентации отражающих плоскостей. Эффективная или результирующая разориентация отражающих плоскостей  $hkil$  определяется выражением

$$\beta_{hkil} = \frac{dU_g}{dz} + \frac{dU_g}{dx_g} \cdot \operatorname{tg} \theta_B, \quad (1)$$

где  $U$  — вектор смещения,  $\theta_B$  — угол Брэгга. Первое слагаемое в формуле (1) учитывает кривизну отражающих плоскостей вблизи дефекта, второе — изменение межплоскостного расстояния.

Эффективная разориентация отражающих плоскостей вокруг краевой дислокации в SiC, расположенной так же, как краевые дислокации на рис. 4, описывается четырехлепестковой розеткой (рис. 6, а). Знаками „+“ и „-“ указаны соответственно области положительных и отрицательных значений  $\beta_{hkil}$ .

Расчетная розетка эффективной разориентации отражающих плоскостей  $(11\bar{2}0)$  вблизи точки выхода левовинтовой дислокации на поверхность кристалла изображена на рис. 6, b. Расчет проводился для дислокации, перпендикулярной поверхности, и учитывалась анизотропия кристаллов 6H-SiC. Розетка содержит два круглых лепестка, соответствующие областям различных знаков разориентации решетки, разделенным линией нулевых значений  $\beta_{hkil}$ , параллельной вектору  $g$ .

#### 4. Обсуждение результатов

Дислокация 2 на рис. 2, а, а также дислокация на рис. 3, а расположены вдоль вертикальной биссектрисы треугольника рассеяния, и яркие лепестки в центре изображения находятся вблизи проекции линии дислокации на поверхность кристалла. В работе [4] подобные изображения были получены на секционных топограммах  $60^\circ$  дислокаций, перпендикулярных поверхности кристалла Si. В соответствии с результатами моделирования по уравнениям Такаги, яркое ядро изображения было объяснено в работе [4] концентрацией волнового поля в сильно искаженной области дефекта. В этом случае имеет место дифракционный эффект каналирования волнового поля в упругом ближнем поле дислокации. Выявленные в настоящей работе тонкая структура ядра изображения и его зависимость от взаимного расположения векторов  $g$  и  $b$  свидетельствуют о влиянии на контраст, формируемый в этой области, характера деформации кристаллической решетки.

Изображение группы краевых дислокаций на рис. 4 по форме подобно розетке эффективной деформации отражающих плоскостей и может быть объяснено в рамках геометрической оптики. В методе РТБ черно-белая окраска четырех основных лепестков розеток от краевых дислокаций объясняется образованием волноводов для блоховских волн разных типов в областях с различными знаками кривизны функции локальных разориентаций и поглощением волн нормального типа [2]. При этом контраст формируется дальним полем дислокации, где градиенты деформаций невелики, и волновое поле успевает подстраиваться под изменения решетки. Очевидно, в случае „тонкого“ кристалла волновые поля обоих типов достигают выходной для рентгеновских лучей поверхности кристалла и повышенная интенсивность

будет наблюдаться в областях как с пониженным, так и повышенным значением  $\beta_{hkil}$ .

Из рис. 4, *a–f* следует, что наибольший вклад в изображение винтовой дислокации вносит релаксационное поле деформаций вблизи поверхности выхода рентгеновских лучей из кристалла. Двухлепестковая розетка контраста, повторяющая по форме розетку эффективной разориентации отражающих плоскостей, формируется, когда дислокация пересекает выходную поверхность вблизи точки *N* (рис. 4, *a–f*) или точки *M* (рис. 4, *d–e*). В первом случае интенсивность розетки контраста выше, чем во втором. В каждой розетке лепестки отличаются между собой по интенсивности. Измерения плотности почернения для розетки, формируемой дислокацией вблизи точки *N* (т.е. релаксационным полем на поверхности выхода лучей вблизи прямого пучка), показали, что лепесток, расположенный на топограмме ниже (справа, если смотреть вдоль вектора дифракции), характеризуется более высокой интенсивностью, чем верхний. Как показало сопоставление изображений винтовых дислокаций, зарегистрированных методами проекционной топографии Ланга и РТБ, для правовинтовой дислокации, наоборот, в соответствующей паре лепестков интенсивность выше у того, который расположен слева, если смотреть вдоль вектора дифракции. Это позволяет по секционной топограмме определить знак вектора Бюргера винтовой дислокации.

На проекционных топограммах происходит суммирование контраста, и изображение винтовой дислокации приобретает вид, показанный на рис. 5, *b*. Длина изображения соответствует длине основания треугольника Бормана. Как и на секционных топограммах, у двух лепестков, расположенных на изображении дислокации со стороны начала вектора дифракции (на рис. 5, *b* слева), интенсивность различна. Из этой пары лепестков контраст сильнее у лепестка, расположенного справа по направлению вектора дифракции. Более детально особенности контраста от винтовой дислокации в методах РТБ и проекционной топографии Ланга с применением цифровой обработки были рассмотрены в работе [12].

Таким образом, большие размеры экспериментальных изображений, а также соответствие их формы розеткам эффективной разориентации решетки свидетельствуют о большом вкладе в изображение дальнего поля деформаций вокруг дефекта.

Известно, что видимость интерференционных полос на секционных топограммах является критерием совершенства исследуемого материала [13]. При одинаковой толщине образцов качество изображений полос изменяется от образца к образцу, что, несомненно, свидетельствует о разной степени совершенства кристаллов на микроуровне, в частности разной плотности выделений и предвыделений примеси. Метод Лели (метод сублимации в условиях спонтанного образования зародышей) в отличие от модифицированного метода Лели не дает возможности контроля содержания примесей в растущем кристалле. Но модифицированный метод Лели

не позволяет получить кристаллы с низкой плотностью дислокаций, необходимые для исследования рентгено-топографического контраста от отдельных дефектов. В целом плохая видимость интерференционных полос может быть также объяснена относительно большими значениями параметра  $\mu t$  и размера фокуса рентгеновской трубки в плоскости рассеяния.

## 5. Выводы

Совместное применение методов СТП и РТБ позволяет получить более полную информацию о механизмах формирования экспериментального контраста, создаваемого краевыми и винтовыми дислокациями. В рамках метода СТП можно однозначно определить знак вектора Бюргера краевой дислокации, перпендикулярной поверхности кристалла, но только в том случае, когда ось дислокации расположена вблизи вертикальной биссектрисы треугольника Бормана. Таким образом, можно определить положение экстраплоскости и областей растяжения и сжатия кристаллической решетки вокруг дислокации. Существует принципиальная возможность определения знака вектора Бюргера (направления изгиба отражающих плоскостей вблизи поверхности) винтовой дислокации, перпендикулярной поверхности кристалла, по изображениям, полученным методами СТП и проекционной топографии Ланга. Контраст интенсивности от перпендикулярных поверхности дислокаций в методе СТП в значительной степени определяется видом поля деформаций вокруг этих дислокаций и большой вклад в изображение вносит область слабых искажений решетки вокруг дефекта. Обнаруженные особенности секционных изображений краевых и винтовых дислокаций, по-видимому, должны наблюдаться для любых кристаллических материалов. Анализ экспериментального контраста, полученного методами СТП и РТБ, свидетельствует, что изображения дефектов в методе РТБ являются более простыми и удобными для идентификации.

Авторы выражают благодарность И.Л. Шульпиной за обсуждение результатов и высказанные замечания.

## Список литературы

- [1] E.V. Suvorov, V.I. Polovinkina, V.I. Nikitenko, V.L. Indenbom. Phys. Stat. Sol. (a) **26**, 385 (1974).
- [2] Э.В. Суворов. Физические основы современных методов исследования реальной структуры кристаллов. Черноголовка (1999). 232 с.
- [3] Э.В. Суворов, И.А. Смирнов, Е.В. Шулаков. Поверхность **4**, 100 (2004).
- [4] В. Суворов, И.А. Смирнов, Е.В. Шулаков. Поверхность **9**, 64 (2004).
- [5] Л.Н. Данильчук, А.О. Окунев, В.Е. Удальцов, Е.Н. Потапов, В.А. Ткаль. Сб. докл. нац. конф. по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов. Т. 3. М.—Дубна (1997). С. 177.

- [6] Л.Н. Данильчук, Ю.А. Дроздов, А.О. Окунев, В.А. Ткаль, И.Л. Шульпина. Завод. лаб. **68**, 24 (2002).
- [7] Ю.А. Дроздов, А.О. Окунев, В.А. Ткаль, И.Л. Шульпина. Завод. лаб. **69**, 24 (2003).
- [8] А.О. Окунев, И.Л. Шульпина, Л.Н. Данильчук, В.А. Ткаль, Ю.А. Дроздов. Тез. докл. второго науч. семинара „Современные методы анализа дифракционных данных (рентгенотопография, дифрактометрия, электронная микроскопия“. Великий Новгород (2004). С. 97.
- [9] А.О. Окунев, Л.Н. Данильчук, В.А. Ткаль, Ю.А. Дроздов. Материалы 2-й Украинской научной конференции по физике полупроводников. Т. 2. Рута, Черновцы (2004). С. 403.
- [10] А.О. Окунев, И.Л. Шульпина. Письма в ЖТФ. **31**, 1 (2005).
- [11] V.L. Indenbom, V.I. Nikitenko, E.V. Suvorov, V.M. Kaganer. Phys. Stat. Sol. (a) **46**, 379 (1978).
- [12] А.О. Окунев, В.А. Ткаль, Ю.А. Дроздов, Л.Н. Данильчук. Поверхность **9**, 58 (2004).
- [13] A. Authier. Dynamical theory of X-ray diffraction. University Press, Oxford (2004). 674 p.