

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЧАСТИЦ С КОНДЕНСИРОВАННЫМ ВЕЩЕСТВОМ

PACS numbers: 61.05.jd, 61.05.jm, 61.72.Dd, 61.72.Nh, 68.35.Gy, 82.80.Yc

Определение структурной неоднородности кристаллов по данным анализа картин Кикучи

М. Д. Борча, С. В. Баловсяк, И. М. Фодчук, В. Ю. Хоменко, В. Н. Ткач*

*Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2,
58012 Черновцы, Украина*

**Институт сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины,
ул. Автозаводская, 2,
03142 Киев, Украина*

Предложен новый подход к определению локальных деформаций в кристаллах по картинам дифракции обратно отражённых электронов (картинам Кикучи) с использованием метода гистограмм и метода дискретного двухмерного фурье-преобразования. Определена анизотропия в распределении локальных деформаций на поверхности образцов алмаза, полученных методом температурного градиента в системе Fe–Al–C и методом наращивания в среде Mg–C + бор на поверхности монокристалла алмаза статического синтеза (Ni–Mn–C).

Запропоновано новий підхід щодо визначення локальних деформацій у кристалах за картинами дифракції зворотно відбитих електронів (картинами Кікучі) з використанням методу гістограм та методу дискретного двовимірного Фур'є-перетвору. Визначено анізотропію в розподілі локальних деформацій на поверхні зразків алмазу, одержаних методом температурного градієнта в системі Fe–Al–C і методом нарощування в середовищі Mg–C + бор на поверхні монокристалу алмазу статичного синтезу (Ni–Mn–C).

A new approach to the local-strain determination in crystals from patterns of backscattered-electron diffraction (Kikuchi patterns) based on histogram method and discrete two-dimensional Fourier transformation is proposed. Anisotropy of local-strain distribution is determined on surface of diamond samples fabricated by the method of temperature gradient in Fe–Al–C system and by the method of growth on the surface of diamond single crystal of static synthesis (Ni–Mn–C) in the Mg–C + boron medium.

Ключевые слова: локальная деформация, дифракция отражённых электронов, линии Кикучи, фурье-преобразование, метод гистограмм, синтеза-

рованные алмазы.

(Получено 11 июля 2013 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Упругие деформации в кристаллах отображают структурные нарушения кристаллической решетки, которые, в свою очередь, проявляют себя через изменение межплоскостных расстояний. Эти изменения можно определять из картин дифракции отраженных электронов (картин Кикучи), в частности из ширины линии Кикучи, ее смещения, а также из угловых соотношений между определенными линиями [1, 2]. С помощью специальных компьютерных программ автоматически определяют положение каждой из полос Кикучи, сравнивают с теоретическими данными соответствующей кристаллической фазы и вычисляют трехмерную кристаллографическую ориентацию [3, 4]. Поскольку картина Кикучи является стереографической проекцией, то на проиндексированном изображении представлены индексы осей зон (точки пересечения линий Кикучи).

Сравнивая картины Кикучи, полученные от разных участков образца, с эталонной, можно определить степень его планарной структурной неоднородности. Высокая информативность метода Кикучи-линий обусловлена возможностью установления взаимосвязи между кристаллической структурой и направлением преимущественного роста естественных и искусственных алмазов [3–6], определения значений деформаций и их распределение по поверхности образца. В частности, в [4–5] определена зависимость между значениями деформаций и шириной линий Кикучи, а также, интегральными значениями интенсивности по сечению линии Кикучи [6]. Полученные данные дали возможность провести оценку деформированного состояния в каждом локальном участке образца.

Применение перечисленных методов ставит высокие требования к точности считывания профиля интенсивности [3, 4]. Поэтому, заслуживает внимания еще один подход определения деформаций, а именно, из анализа степени размытия картины (изменения ширины линии и максимального значения ее интенсивности) дифракции отраженных электронов [7, 8], реализуемого с помощью двумерного преобразования Фурье. Экспрессность подхода и его интегральный характер являются существенным дополнением к вышеперечисленным методикам определения деформаций из картин Кикучи.

В данной работе предложен новый подход определения локальных деформаций в кристаллах из картин дифракции обратно отраженных электронов (картин Кикучи) с использованием в комплексе методов гистограмм и дискретного двумерного фурье-преобразования.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ. КАРТИНЫ КИКУЧИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ АЛМАЗОВ

Дифракция обратно-отраженных электронов (метод Кикучи) реализуется с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа фирмы «Zeiss» EVO-50 с использованием CCD-детектора [1–5]. Для разных участков исследуемых образцов (рис. 1) картины Кикучи (рис. 2) получены с использованием пучка электронов диаметром ≈ 40 нм, падающего на поверхность кристалла под углом 70° [2, 3].

Алмаз СА синтезирован методом температурного градиента в системе Fe–Al–C при высоком статическом давлении ≈ 6 ГПа и высокой температуре ≈ 1700 К, время роста ≈ 48 часов [5, 6]. В качестве подложки использована поверхность (100) алмаза системы Ni–Mn–C. Образец СА_Bor получен в системе Mg–C + бор методом наращивания на монокристалл алмаза, синтезированный в системе Ni–Mn–C (спонтанный синтез), после его помещения в камеру высокого давления при температуре ≈ 1800 К и давлении ≈ 7 ГПа на протяжении 1 часа.

Дифракционная картина (рис. 2) состоит из множества пар линий Кикучи, возникающих в результате отражения электронов от кристаллографических плоскостей, и содержит количественную структурную информацию, которая еще до сих пор используется не в полной мере и требует поиска новых подходов для ее анализа и получения значений деформаций и параметров дефектов. Линия (полоса) Кикучи представляет собой пересечение конуса дифрагированных лучей от определенной кристаллографической плоскости с экраном детектирующего устройства [2]. Поскольку в случае дифракции быстрых электронов углы дифракции θ достаточно малы, то пересечения конусов отражений электронов с плоскостью детек-

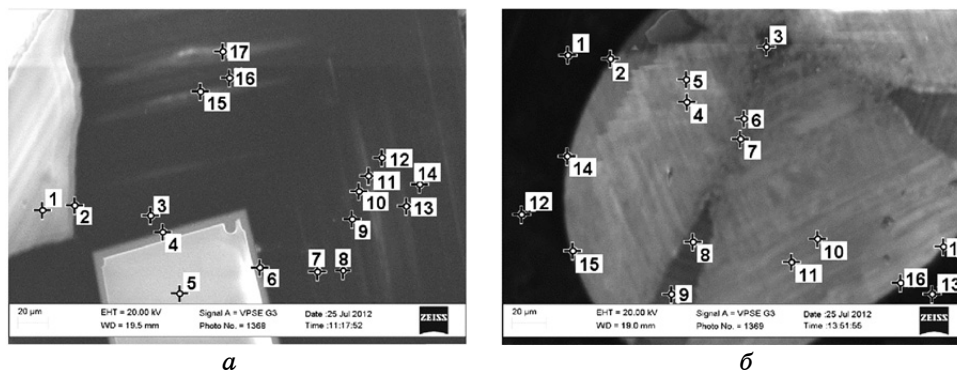


Рис. 1. Фрагменты (280×180 мкм) катодолуминесцентных изображений поверхностей алмазов: кристалл СА (а); кристалл СА_Bor (б). Маркерами указаны участки № 1–17, от которых получены картины Кикучи.

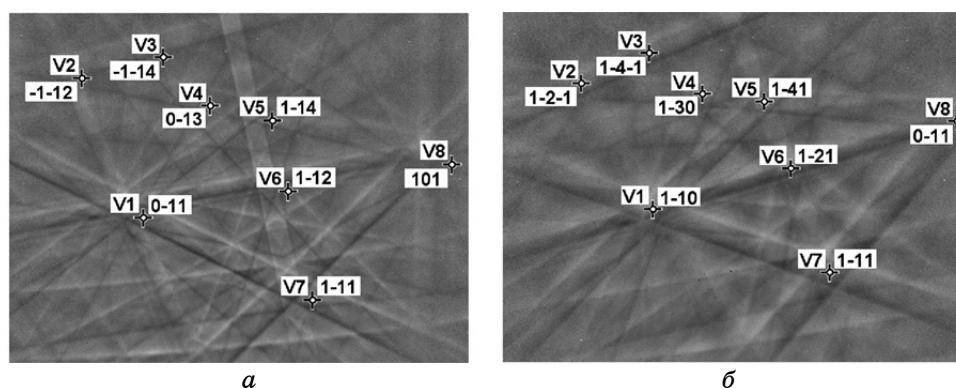


Рис. 2. Картины Кикучи: кристалл СА (а), кристалл СА_Вор (б). Возле маркеров показаны индексы осей соответствующих зон.

тора имеют вид прямых линий (вместо гипербол при рентгеновской дифракции), т.е. на дифракционной картине конусы проявятся как пара зеркально симметричных парабол, кривизной которых можно пренебречь. Эту пару Кикучи-линий также называют Кикучи-полосой, включая также область между линиями [2].

Исследованные участки алмазов отличаются по структурным характеристикам, о чем свидетельствуют различия в распределениях интенсивности на рис. 2. Для оценки среднего значения деформации ϵ в каждом локальном участке поверхности алмаза используется двумерное фурье-преобразование картин Кикучи.

3. ФУРЬЕ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КАРТИН КИКУЧИ

Различия картин Кикучи для разных участков образца (смещение и поворот одной картины относительно другой, масштаб, степень размытия линий и шумовая составляющая) (рис. 2) обусловлены не только структурной неоднородностью образца, но также инструментальной погрешностью. Для исключения последней дифракционные картины проходили несколько этапов цифровой обработки изображений: для устранения высокочастотного шума на исходных изображениях проведено размытие (свертка) изображений по Гауссу со средним квадратичным отклонением $\sigma = 3$ пикселя; с целью нормирования всех изображений установлен одинаковый (максимальный) контраст.

Расстояния между максимумом и минимумом распределений интенсивности по сечениям полос Кикучи, т.е. ширины полос Кикучи, соответствуют определенному диапазону частот (u, v) фурье-спектров, а значения интегральной интенсивности по сечению линии Кикучи — сумме амплитуд гармоник с соответствующими

щими пространственными частотами. Поэтому стояла задача проанализировать амплитуды гармоник $F(u, v)$ в зависимости от пространственных частот u и v и установить их взаимосвязь со значениями деформаций ϵ .

Фурье-спектры исследуемых картин Кикучи получены с помощью быстрого прямого дискретного двумерного преобразования Фурье в программной среде MatLab [9, 10]. Интенсивность каждого пикселя на картине Кикучи размером $M \times N$ пикселей описывается функцией $f(x, y)$, где $x = 0, 1, 2, \dots, M - 1$, $y = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

Двухмерное прямое дискретное фурье-преобразование функции $f(x, y)$, которое обозначается выражением $F(u, v)$, описывается уравнением

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp(-2\pi i [ux/M + vy/N]), \quad (1)$$

где u, v — пространственные частоты, $F(u, v)$ — амплитуда соответствующей им гармоники.

Минимальные и максимальные значения пространственных частот следующие:

для нечетных M, N

$$u_{\min} = -(M - 1)/2, u_{\max} = (M - 1)/2, v_{\min} = -(N - 1)/2, v_{\max} = (N - 1)/2, \quad (2)$$

для четных M, N

$$u_{\min} = -M/2, u_{\max} = M/(2 - 1), v_{\min} = -N/2, v_{\max} = N/(2 - 1). \quad (3)$$

На основании значений функции $f(x, y)$ в виде прямоугольной матрицы размером $M \times N$ вычисляются значения фурье-спектра $F(u, v)$ в виде матрицы размером также $M \times N$. Для дальнейшей обработки фурье-спектры картин Кикучи представлены в логарифмическом масштабе: $F_R(u, v) = |\ln(F(u, v))|$. Рассчитанный спектр $F_R(u, v)$ можно визуализировать в виде изображения (рис. 3, верхний ряд). Центру фурье-спектра $F_R(u, v)$ соответствуют нулевые пространственные частоты: $u = 0, v = 0$.

Из двумерного фурье-спектра $F_R(u, v)$ получено радиальное распределение амплитуды спектра $A(r)$. Радиальный спектр $A(r)$ рассчитывался как сумма значений амплитуд $F_R(u, v)$ для равноудаленных от центра фурье-спектра кругов радиусом $r = \text{int}([u^2 + v^2]^{1/2})$ [11]:

$$A(r) = \sum_{k=0}^{4Q-1} F_R(u_k, v_k) = \sum_{k=0}^{4Q-1} F_R(\text{int}(r \cos(\frac{2\pi k}{4Q-1})), \text{int}(r \sin(\frac{2\pi k}{4Q-1}))), \quad (4)$$

где r — радиальная пространственная частота, принимающая целочисленные значения $r = 0, 1, 2, \dots, Q$, где $Q = \min(u_{\max}, v_{\max})$. Для ис-

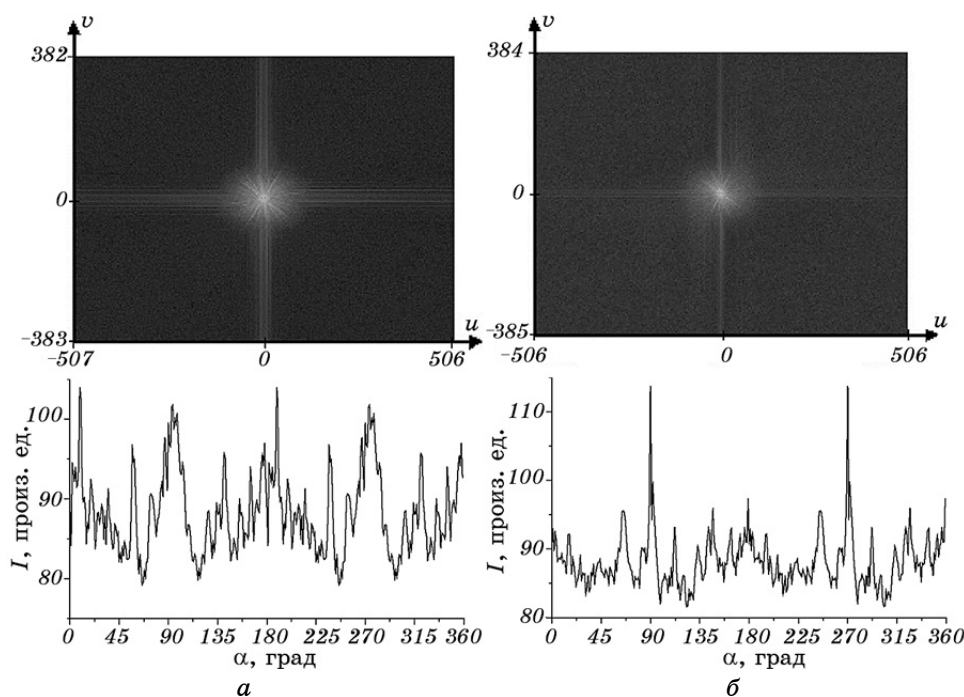


Рис. 3. Фурье-спектры $F_R(u, v)$ картин Кикучи в логарифмическом масштабе (верхний ряд), размер изображений $M \times N$ пикселей; угловое распределение (индикатриса) $I(\alpha)$ интенсивности фурье-спектра $F_R(u, v)$ (нижний ряд). Кристалл СА, участок № 1 (а); кристалл СА_Vor, участок № 1 (б).

следования степени размытия картин Кикучи выбраны пространственные частоты r в интервале от 1 до 150, поскольку более высокие частоты соответствуют шуму.

На рисунке 4 приведены характерные радиальные спектры $A(r)$ для трех областей каждого из кристаллов. Распределение интенсивности радиального спектра зависит от распределения интенсивности линий Кикучи, и, соответственно, от структурных параметров исследованной области кристалла. Диапазон пространственных частот от r_{\min} до r_{\max} , соответствующий именно линии Кикучи, определялся с учетом того, что пространственная частота r обратна периоду гармоник T в пространственной области: $r = Q/T$. Минимальная пространственная частота r_{\min} соответствует максимальной ширине линии Кикучи T_{\max} , а максимальная r_{\max} — ширине экстремума линии T_{\min} (рис. 5) [6, 10].

В результате получено: для кристалла СА $T_{\max} = 74$ пикселей, $r_{\min} \approx 10$, $T_{\min} = 16$ пикселей, $r_{\max} \approx 50$; для кристалла СА_Vor $T_{\max} = 64$ пикселей, $r_{\min} \approx 12$, $T_{\min} = 20$ пикселей, $r_{\max} \approx 35$.

Для определения локальной деформации по степени размытия

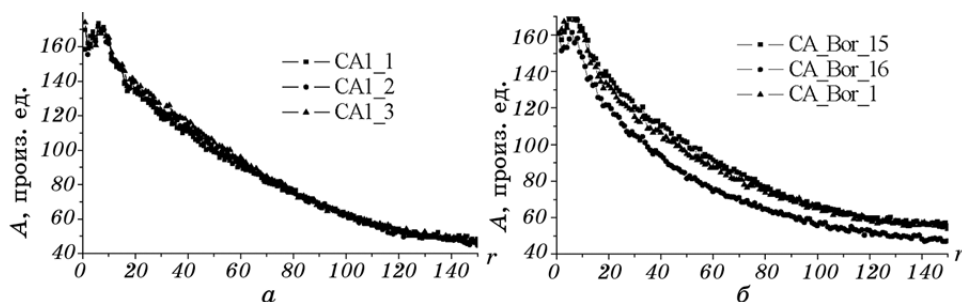


Рис. 4. Радиальное распределение амплитуд гармоник A в зависимости от пространственных частот r : кристалл СА, $Q = 382$ (а); кристалл СА_Vor, $Q = 384$ (б).

картины Кикучи, использовался подход, предложенный в работе [12]. В ней локальная деформация $\varepsilon_{hkl} = \Delta d_{hkl} / d_{hkl}$ (относительное изменение межплоскостного расстояния d_{hkl}) оценивалась с помощью анализа изменений площади под профилем интенсивности полосы Кикучи и определялась соотношением $\ln(S_0/S)$, где S_0 — площадь под кривой распределения интенсивности по профилю полосы Кикучи в области без деформации, а S — в деформированной области.

Степень размытия картин Кикучи в нашем случае определялась суммой (S_F) амплитуд (A) гармоник в соответствующем диапазоне пространственных частот. Полученные значения S_F нормированы по амплитуде первой гармоники $A_N(1)$ N -го участка относительно амплитуды первой гармоники 1-го участка, что позволяет учитывать форму распределения амплитуд $A(r)$, а не их абсолютные значения:

$$S_F(N) = \frac{A_1(1)}{A_N(1)} \sum_{r=r_{\min}}^{r_{\max}} A_N(r), \tag{5}$$

где N — номер участка кристалла, частоты $r = 10-50$ (для кристалла СА), $r = 12-35$ (для кристалла СА_Vor).

Поскольку сумма S_F амплитуд гармоник для соответствующего диапазона пространственных частот фурье-преобразования картины Кикучи является аналогией площади S под кривой профиля интенсивности линий Кикучи, то деформацию можно определить с помощью такого же соотношения, как и в работе [12]:

$$\varepsilon = k \ln(S_{F_0} / S_F), \tag{6}$$

где ε — среднее значение деформации для всех плоскостей hkl , которым соответствуют линии Кикучи, $k = 4,33 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент, определенный из экспериментальной зависимости ε_{hkl} от $\ln(S_0/S)$ в работе [12], S_{F_0} — среднее значение суммы амплитуд гармоник,

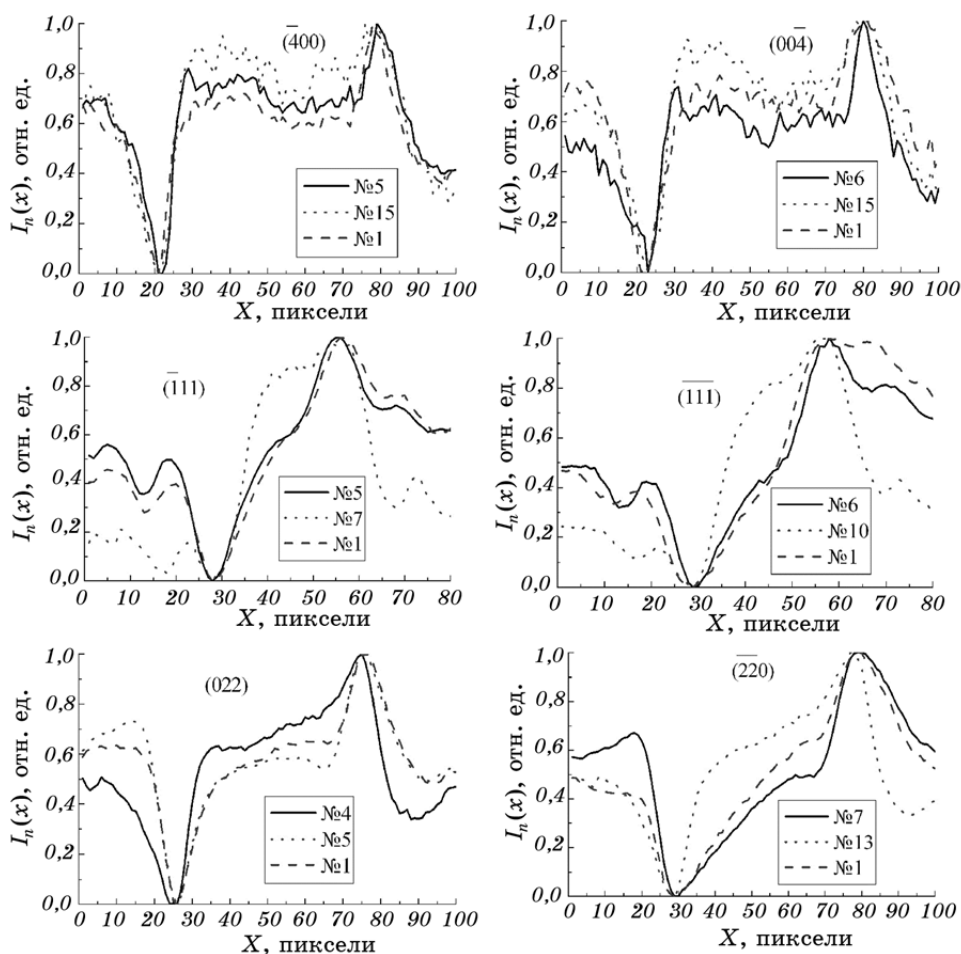


Рис. 5. Профили интенсивности $I_n(x)$.

S_F — то же, но для локального участка образца.

Полученные спектры на рис. 3 показывают, что, чем больше размыта картина Кикучи, тем более слабой будет центральная часть спектра, которая соответствует низким частотам и, соответственно, линиям Кикучи (а не шумовой составляющей).

4. МЕТОД ГИСТОГРАММ

Деформации, определенные в предыдущем параграфе, являются средними в рассмотренных участках. В то же время важно знать, как распределены деформации в зависимости от кристаллографических направлений (анизотропию распределения деформаций).

Один из методов определения изменений периодов решетки состоит в измерении расстояний между точками пересечения дифракционных линий на картинах Кикучи для соответствующих плоскостей отражения [5, 13]. Точность метода зависит от точности определения координат узлов пересечения линий [2, 3]. Аналогичную информацию можно получить из профиля линий Кикучи [12]. Такая возможность продемонстрирована в настоящей работе, где для определения локальных изменений периода решетки проведен анализ распределений интенсивности нескольких дифракционных полос на картинах Кикучи.

Для удобства анализа, т.е. для исключения возможных экспериментальных рассогласований, все профили линий на картинах Кикучи пронормированы с помощью соотношения

$$I_n(x) = (I(x) - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}), \quad (7)$$

где $I_n(x)$ — распределение интенсивности нормированного профиля, I_{\min} и I_{\max} — минимальное и максимальное значение интенсивности исходного профиля $I(x)$. Нормированные профили пригодны для сравнительного анализа и получения количественных параметров, характеризующих деформированное состояние решетки в локальном участке.

При определенном выборе кристаллографической системы координат из анализа распределения интенсивности для разных систем линий на одной картине Кикучи можно определить компоненты тензора деформаций ε_{ij} по соотношению (6). Причем, как показано в [12], данное соотношение применимо при деформациях, не превышающих 0,3%.

На рисунке 5 приведено характерное распределение интенсивности профилей линий Кикучи для плоскостей (400), (111) и (022) образцов алмазов СА и СА_Vor. Как следует из распределений интенсивности, профили одной и той же полосы Кикучи на различных локальных участках сильно отличаются по форме и, соответственно, отличаются площадью под кривой распределения интенсивности. Такое изменение значения интегральной интенсивности линий Кикучи может быть использовано в качестве показателя изменения величины деформации.

В данном параграфе предлагается подход для определения анизотропии деформаций из анализа изменений профиля интенсивности полос Кикучи, основанный на использовании метода гистограмм (рис. 6). Известно [14], что построение гистограмм используется для получения оценки плотности распределения ρ определенной величины w . Этой величиной является площадь под профилем одной и той же линии Кикучи для каждого из участков образца.

Для построения гистограммы определяют диапазон изменения

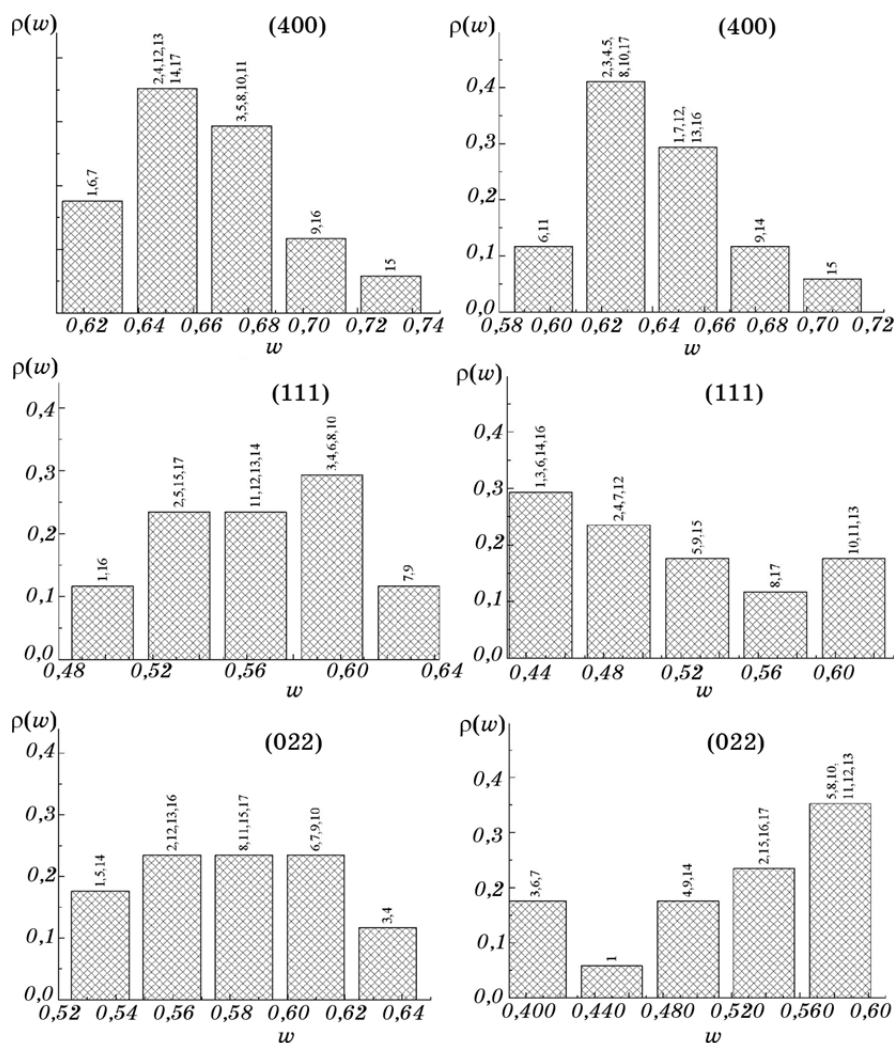


Рис. 6. Гистограммы распределения плотности $\rho(w)$ на соответствующем интервале изменения w .

величины w , который разбивают на несколько (n) интервалов (бинов) и рассчитывают долю всех измерений, которая попадает в каждый из интервалов. Значения каждой доли и являются значениями, которые считаются оценкой плотности распределения $\rho(w)$ на соответствующем интервале.

Для построения гистограммы существенным является выбор оптимального разбиения, поскольку при увеличении интервалов снижается детализация оценки, а при их уменьшении падает точность оценки значения плотности распределения. Для выбора оптималь-

ного количества интервалов n использовано правило Стерджеса [14]:

$$n = \log_2 N + 1, \quad (8)$$

где N — общее количество полученных значений w , т.е. количество исследованных участков образца. Таким образом, при $N = 17$ $n = 5$.

Первичный анализ гистограмм на рис. 6 дает качественное представление об анизотропии распределения деформаций в разных кристаллографических направлениях, а также о влиянии наращенного слоя алмаза на деформационное состояние исходного кристалла алмаза. В частности, наиболее деформированными в образце алмаза СА являются плоскости $(\bar{1}11)$, а наименее деформированными — (400) . В то же время, наращивание слоя алмаза, легированного бором (образец СА Бор), приводит к увеличению деформаций во всех направлениях, но наиболее существенный прирост наблюдается в направлении $[022]$.

Что касается дифракции от плоскостей $(\bar{4}00)$, то характер $\rho(w)$ практически одинаков для обоих образцов. Это свидетельствует о том, что нанесение полупроводникового слоя существенно не повлияло на изменение межплоскостных расстояний для данного типа плоскостей, а для плоскостей $(\bar{1}11)$ увеличилось количество участков с меньшей площадью под профилем интенсивности линий Кикучи. Из этого следует, что для большинства участков возникают деформации сжатия в соответствующем направлении согласно соотношению $\varepsilon_{hkl} = \beta \ln(S_0/S)$ [12]. Для плоскостей (022) , наоборот, увеличилось количество участков с большим значением w , т.е. в направлении $[022]$ имеет место растяжение.

Для образца, синтезированного в системе Fe–Al–C, можно сказать, что область, охватывающая участки 12 и 13, является почти однородной, поскольку эти участки входят в один и тот же бин на рис. 6 для всех трех плоскостей дифракции. В то же время участок 11 (область между зонами 12 и 13) существенно отличается от участка 12 и характеризуется такими деформациями: $\varepsilon_{400} \cong 1,98 \cdot 10^{-4}$, $\varepsilon_{\bar{1}11} \cong 0,31 \cdot 10^{-4}$, $\varepsilon_{022} \cong -0,81 \cdot 10^{-4}$.

Максимальные значения $|\Delta d/d|_{\max}$ для разных плоскостей (hkl) и образцов представлены в табл. 1.

На рисунке 7 приведены значения средних объемных деформаций в каждом участке обоих образцов, определенные обеими методами. Анализ рис. 7 показывает хорошее согласие между значениями деформации ε_0 , полученными непосредственно из анализа профилей интенсивности линий Кикучи и с помощью фурье-преобразования картин Кикучи. В целом существует корреляция между положением локальной области кристалла (рис. 1) и значениями деформации: для образца СА (рис. 7, а) деформации максимальны для участков № 1, 5 (выращенные кристаллы алмаза), для образца

ТАБЛИЦА 1. Максимальные значения $|\Delta d/d|_{\max}$ для исследованных образцов алмаза.

Образец	$ \Delta d/d _{\max}$ для плоскостей		
	($\bar{4}00$)	($\bar{1}11$)	(022)
СА (Fe–Al–C)	$8,55 \cdot 10^{-4}$ между 7 и 15*	$12,24 \cdot 10^{-4}$ между 1 и 7*	$9,13 \cdot 10^{-4}$ между 5 и 4*
СА_Vor (Ni–Mn–C + слой системы Mg–C + бор)	$9,16 \cdot 10^{-4}$ между 6 и 15*	$16,19 \cdot 10^{-4}$ между 6 и 10*	$18,95 \cdot 10^{-4}$ между 7 и 13*

* Участки, указанные на рис. 1.

СА_Vor (рис. 7, б) деформации максимальны для центра выращенного кристалла (участки № 3, 6).

Разницу между значениями ε_0 , полученными на основании фурье-спектра и профиля интенсивности линий Кикучи, можно объяснить тем, что в случае анализа профиля сначала определяются значения ε_{hkl} отдельно для разных плоскостей дифракции (hkl), а потом — средняя объемная деформация ε_0 , тогда как при использовании фурье-спектра сразу определяется ε_0 . Удовлетворительное согласие между значениями ε_0 свидетельствует о корректности предложенной методики с использованием фурье-преобразования картины Кикучи.

К преимуществам методики с использованием фурье-преобразования можно отнести минимизацию субъективных факторов в процессе автоматической обработки изображений картин Кикучи. Однако, если необходимо получить значения деформаций ε_{hkl} в разных кристаллографических направлениях, то следует использовать зна-

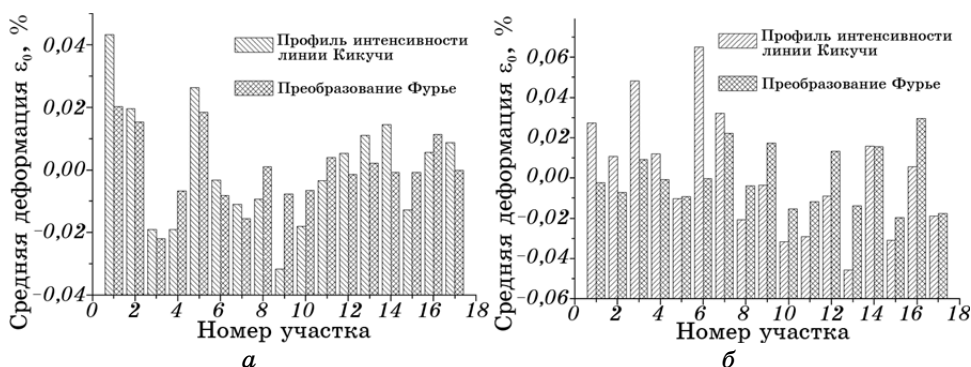


Рис. 7. Зависимость локальной деформации ε от номера области N : кристалл СА (а), кристалл СА_Vor (б). Результаты получены на основании анализа фурье-спектра и профиля интенсивности линии Кикучи.

чения интегральных интенсивностей по профилю полос Кикучи.

Таким образом, использование комплекса методов определения локальных деформаций и разработанное соответствующее программное обеспечение, позволяют проводить сравнительный анализ распределения деформаций в локальных участках кристаллических объектов и, одновременно, определять распределение деформаций по кристаллографическим направлениям в каждом из них.

5. ВЫВОДЫ

1. Предложена комплексная методика определения деформаций из картин дифракции отраженных электронов (картин Кикучи), полученных на сканирующем растровом электронном микроскопе «Zeiss» EVO-50 с использованием CCD-детектора. Использование двухмерного прямого дискретного фурье-преобразования картин Кикучи одновременно с анализом интегральных значений интенсивности по различным полосам Кикучи с применением метода гистограмм, позволило провести сравнительный анализ распределения деформаций в локальных участках кристаллов алмаза и, одновременно, определить распределение деформаций по кристаллографическим направлениям в каждом из них.

2. Определено распределение деформаций в двух образцах алмаза, один из которых получен методом температурного градиента в системе Fe–Al–C, а второй — в системе Mg–C + бор методом наращивания на монокристалл алмаза, синтезированный в системе Ni–Mn–C. Наиболее деформированными в первом образце алмаза являются плоскости (111), а наименее деформированными — (400). В то же время, наращивание слоя алмаза, легированного бором (второй образец), приводит к увеличению деформаций по всем направлениям, но наиболее существенный прирост наблюдается в направлении [022].

3. Использование фурье-преобразования картин Кикучи для определения локальных деформаций позволяет минимизировать субъективные факторы автоматической обработки изображений. В то же время, анализ значений интегральных интенсивностей по профилю полос Кикучи дает значения деформаций ε_{hkl} в разных кристаллографических направлениях. Получено удовлетворительное согласие между значениями деформации ε , полученными непосредственно из анализа профилей интенсивности линий Кикучи и с использованием метода дискретного двухмерного фурье-преобразования картин Кикучи.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Т. В. Britton and A. J. Wilkinson, *Ultramicroscopy*, **114**: 82 (2012).
2. A. J. Wilkinson and T. В. Britton, *Materials Today*, **15**, No. 9: 366 (2012).

3. I. M. Fodchuk, V. M. Tkach, V. G. Ralchenko, A. P. Bolshakov, E. E. Ashkina-zi, I. I. Vlasov, Y. D. Garabazhiv, S. V. Balovsyak, S. V. Tkach, and O. M. Kutsay, *Diamond Relat. Mater.*, **19**: 409 (2010).
4. I. Fodchuk, S. Balovsyak, M. Borchа, Ya. Garabazhiv, and V. Tkach, *physica status solidi (a)*, **208**, No. 11: 2591 (2011).
5. I. Fodchuk, S. Balovsyak, M. Borchа, Ya. Garabazhiv, and V. Tkach, *Semicond. Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, **13**, No. 1: 262 (2010).
6. М. Д. Борча, С. В. Баловсяк, И. М. Фодчук, В. Ю. Хоменко, В. М. Ткач, *Сверхтвердые материалы*, № 4: 34 (2013).
7. D. L. Davidson, *J. Mater. Sci. Lett.*, **1**, No. 6: 236 (1982).
8. Y. Yoshitomi, K. Ohta, J. Harase, and Y. Suga, *Textures and Microstructures*, **22**: 199 (1994).
9. Р. Гонсалес, Р. Вудс, *Цифровая обработка изображений* (Москва: Техносфера: 2005).
10. Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс, *Цифровая обработка изображений в среде MatLab* (Москва: Техносфера: 2006).
11. *SPIP (Scanning Probe Image Processor)*, www.ImageMet.com
12. Y. Sasaki, M. Igushi, and M. Hino, *Key Eng. Mater.*, **326–328**: 237 (2006).
13. A. Olsen, *Lattice Parameter Determination Using Kikuchi-Line Intersections: Application to Olivine and Feldspar* (Oslo: Institute of Physics, University of Oslo: 1975), p. 9.
14. D. W. Scott, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, **1**, No. 3: 303 (2009).