

**П. М. Литвин¹, В. В. Стрельчук¹, С. О. Івахненко²,
А. С. Ніколенко¹, Т. В. Коваленко^{2,*}**

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова,

НАН України, м. Київ, Україна

²Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля,

НАН України, м. Київ, Україна

**tetiana.v.kovalenko@gmail.com*

Використання цифрової мікро-фотограмметрії для аналізу морфології вирощених монокристалів НРНТ-алмазу

Розглянуто можливість використання цифрової мікро-фотограмметрії для аналізу та моделювання габітусу і секторіальної будови монокристалів алмазу з розміром до 20 мм, що було отримано за високих тисків та температур (НРНТ-кристали алмазу). Показано перспективність такого методу для розробки карт розкрою для вирізання односекторних зразків та подальшого їх використання.

Ключові слова: *фотограмметрія на близьких відстанях, монокристали алмазу, секторіальна структура, морфологія.*

Визначення габітусу кристалів широко використовують в індустрії обробки алмазу для отримання зразків з потрібною формою та кристалічною структурою: в процесах отримання стандартних форм коштовного каміння, заготовок різців і правлячих олівців. Габітус кристалів визначають через сканування їхньої форми.

Традиційно в дослідженнях форми кристалів використовували побудову гномостереографічних проєкцій на базі чотирьохвісних гоніометрів для точного вимірювання кутів між гранями. Зараз для промислових потреб застосовують лазерні 3D-сканери із відповідним програмним забезпеченням для проєктування розкрою. З появою потужних графічних процесорів та зростанням чутливості і роздільної здатності цифрових засобів реєстрації зображень набув нового значення класичний метод стереофотограмметрії, що використовують як в задачах віддаленого геосканування, так і для 3D-реконструювання об'єктів, зображення яких отримано з близької відстані.

Метод фотограмметрії у найпростішому випадку визначає просторові координати точок об'єкта вимірюванням за двома або більшою кількістю зображень, отриманими з різних ракурсів, а на кожному зображенні визначають спільні точки. Вимірювання проводять у напрямку від місця розташування камери до точки на об'єкті. Перетин цих променів і визначає розташування точки в просторі. За допомогою алгоритмів, що застосовують в цифровій фотограмметрії, обробляють набори із сотень зображень для мінімізації суми квадратів множини помилок. Зазвичай це вирішують за допомогою алгоритму Левенберга–Марквардта (або методу зв'язок), який базується на розв'язанні нелінійних рівнянь методом найменших квадратів.

Субміліметрова/мікронна стереофотограмметрія на близьких відстанях має значний потенціал для аналізу форми кристалів НРНТ-алмазів. В літературі мало інформації про таке застосування методу, однак у наявних публікаціях результати дослідження фотограмметрією і лазерним скануванням є близькими [1–3].

Авторами адаптовано метод цифрової стереофотограмметрії для сканування форми НРНТ-алмазів на близьких відстанях; також розроблено методи аналізу, реконструювання і прогнозування їх секторальної структури. Реалізація методу не вимагає коштовного обладнання і програмного забезпечення, але з використанням якісних камер та оптики для реєстрації зображень, при дотриманні відповідних процедур калібрування та сканування, не поступається точністю результатам лазерного сканування.

Використання методу дистанційної мікро-фотограмметрії дозволяє проводити сканування форми і будувати цифрові 3D-моделі монокристалів НРНТ-алмазу. Окрім візуалізації форми кристалів, які було вирошено на затравці, та визначення конфігурації граней і ребер кристала, 3D-моделі можна використовувати для визначення напрямків механічної або лазерної обробки кристалів і локалізації односекторних областей напівпровідникових кристалів алмазу.

Побудову моделей і автоматизацію процесу 3D-моделювання виконували за допомогою програми Rhinoceros з використанням модуля візуального програмування графічних об'єктів Grasshopper. Систему було відкалібровано згідно відповідних процедур Agisoft Metashape та протестовано на різнотипних об'єктах відомої геометрії. Реалізований метод дозволяє проводити мікро-фотограмметрію кристалів алмазів розмірами від одного до кількох десятків міліметрів та забезпечує високу відповідність реконструйованих моделей реальним кристалом. Визначено, що оптимальне співвідношення між кількістю зображень, часом сканування та обробки, роздільною здатністю моделі можна досягти при реєстрації двох наборів кругових зображень, отриманих при різних нахилах вертикальної осі кристалу з кроком $3,6^\circ$ (200 зображень). Загальні витрати часу для сканування і розрахунку 3D-моделі склали ~ 20 хв. В режимі експрес-сканування (50 зображень і середнє налаштування якості моделі) загальні витрати часу складають ~ 6 хв.

Стадії індексування граней кристалу проілюстровано на рисунку. Хмару точок орієнтованої за осями координат моделі, аналізували за допомогою програми Gwyddion як набір даних скануючої зондової мікроскопії (почергово верхня та нижня частини кристалу). Використовуючи стандартний алгоритм аналізу граней (аналізу кутів нахилу нормалей поверхні), отримуємо біваріативну гістограму кутів нормалей в полярних координатах (рисунок б), кути φ і θ позначають азимутальну та радіальну орієнтацію, а інтенсивність максимумів – кількість відповідних точок хмари. Якщо вибирати максимуми із заданим допуском за кутами, отримуємо таблицю орієнтації граней. Кожен максимум гістограми пов'язаний із картою рельєфу поверхні (цифри на рисунку в), де можна виділяти грані кристалу, що відповідають вибраному максимуму. Симетрія максимумів гістограми чітко корелює із розташуванням кристалографічних площин на стереографічній проекції кубічних кристалів, яка відповідає напрямку осі росту кристалу.

Запропонований метод цифрової мікрофотограмметрії відкриває перспективу використання цифрової стереомікрофотограмметрії для аналізу та моделювання габітусу і секторальної структури реальних кристалів алмазу. Прототип системи сканування, реалізований на базі напівпрофесійної дзеркальної цифрової камери, має роздільну здатність ~ 5 мкм, проте практично відсутні обмеження в розмірі поля сканування та глибині різкості.

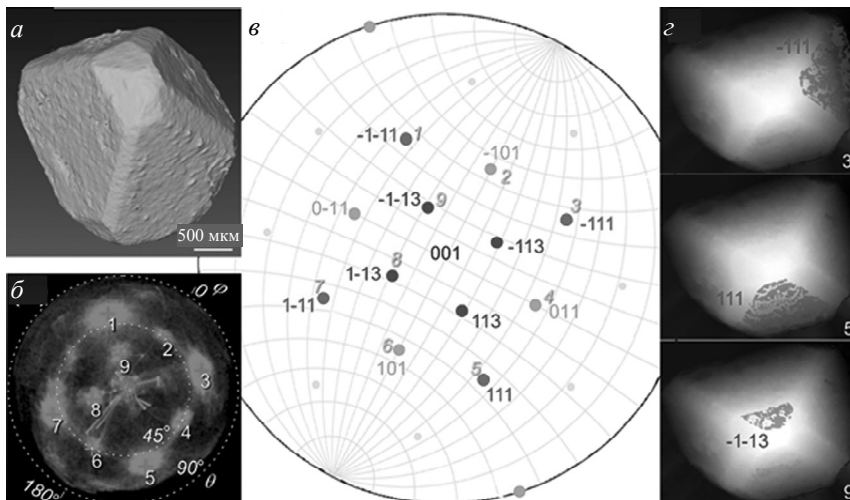


Рис. 1. Приклад фотограмметричного експрес-сканування кристалу алмазу та індексування граней: *a* – 3D-модель; *б* – відповідна біваріативна гістограма нормалей поверхні; *в* – стереограма кубічного кристалу в напрямку $\langle 001 \rangle$ (цифри вказують відповідність максимумів гістограми hkl индексам кристалографічних площин); *г* – приклади відповідності максимумів гістограми граням кристалу.

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт № 2020.02/0160 “Розробка нових складів розчинників вуглецю для вирощування монокристалів алмазу в області термодинамічної стабільності з контрольованим вмістом домішок азоту і бору з метою створення концепційних конструкцій електронних приладів”.

P. M. Lytvyn¹, V.V. Strelchuk¹, S. O. Ivakhnenko²,
A. S. Nikolenko¹, T. V. Kovalenko²

¹Lachkarev Institute of Semiconductor Physics
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Using digital microphotogrammetry for HPHT-diamond single
crystals morphology analysis

The possibility of using digital micro-photogrammetry for analysis and modeling of habitus and sectoral structure of diamond single crystals up to 20 mm obtained at high pressures and temperatures (HPHT diamond) is considered. The prospects of such a method for developing cutting maps to cut single-sector samples and their further use are shown.

Keywords: close range photogrammetry, diamond single crystals, sectoral structure, morphology.

1. Olkowicz M., Dabrowski M., Pluymakers A. Focus stacking photogrammetry for micro-scale roughness reconstruction: a methodological study. *Photogramm. Rec.* 2019. Vol. 34, no. 165. P. 11–35.
2. Wang X.Z., Roberts K.J., Ma C. Crystal growth measurement using 2D and 3D imaging and the perspectives for shape control. *Chem. Eng. Sci.* 2008. Vol. 63, no. 5. P. 1173–1184.
3. Pajerowski D.M., Ng R., Peterson N., Zhang Y., Stone M.B., dos Santos A.M., Bunn J., Fanelli V. 3D scanning and 3D printing AlSi10Mg single crystal mounts for neutron scattering. *Rev. Sci. Instrum.* 2020. Vol. 91, art. 053902.

Надійшов до редакції 06.07.21

Після доопрацювання 06.07.21

Прийнятий до опублікування 16.07.21