

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.06.068>

УДК 548.736.15:531.748

Т.В. Коваленко¹, <https://orcid.org/0000-0003-4878-5161>
А.С. Ніколенко², <https://orcid.org/0000-0001-6775-3451>
С.О. Івахненко¹, <https://orcid.org/0000-0002-4796-3416>
В.В. Стрельчук², <https://orcid.org/0000-0002-6894-1742>
П.М. Литвин², <https://orcid.org/0000-0002-0131-9860>
І.М. Даниленко², <https://orcid.org/0000-0002-8740-204X>
О.О. Заневський¹, <https://orcid.org/0000-0002-6751-866X>

¹ Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

² Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ
E-mail: tetiana.v.kovalenko@gmail.com

Напівпровідникові НРНТ-алмази як активні елементи електронних приладів: їх структурні та електронні властивості

Представлено членом-кореспондентом НАН України С.О. Івахненком

Методом НРНТ-кристалізації вирошено структурно досконалі монокристали алмазу типу Пв, леговані бором з розвинутими секторами росту {113} і {110}. Односекторні пластини напівпровідникового алмазу одержані при прогнозованому розкріі кристалів шляхом механічної та лазерної обробки з використанням розробленого мікрофотограмметричного 3D моделювання секторальної структури. Методами раманівської та ІЧ-спектроскопії вивчено структурну досконалість, особливості дефектно-домішкового складу кристалів. Електронні властивості секторів росту та міжсекторальних меж охарактеризовано безконтактним методом силової кельвін-зонд-мікроскопії. Показано необхідність застосування визначених оптичних і електрофізичних діагностичних методів паспортизації напівпровідникового матеріалу р-типу і перспективність використання односекторних напівпровідникових пластин для розробки конструкцій діодів Шотткі.

Ключові слова: *легований бором НРНТ-алмаз, метод температурного градієнта, мікрофотограмметрія, раманівська спектроскопія, інфрачервона фур'є-спектроскопія, сканувальна кельвін-зондова мікроскопія, діод Шотткі.*

Алмаз завдяки своїм унікальним фізичним властивостям — високим значенням ширини забороненої зони ($\approx 5,5$ еВ), теплопровідності 22 Вт/(см · К) при $T = 300$ К, напрузі електричного пробоя (10 МВ/см), рухливості дірок і електронів (1800 і 2200 см² · В⁻¹ · с⁻¹) —

Цитування: Коваленко Т.В., Ніколенко А.С., Івахненко С.О., Стрельчук В.В., Литвин П.М., Даниленко І.М., Заневський О.О. Напівпровідникові НРНТ-алмази як активні елементи електронних приладів: їх структурні та електронні властивості. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2021. № 6. С. 68–77.
<https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.06.068>

є перспективним напівпровідниковим матеріалом для створення високочастотних і радіаційно-стійких електронних пристроїв високої потужності. На сьогодні продемонстровано можливості створення детекторів частинок і діодів Шоттки, сконструйовані та випробувані біполярні і польові транзистори [1, 2].

Найбільш перспективним методом отримання напівпровідникових монокристалів алмазу високої структурної досконалості є кристалізація з розчинів вуглецю в розплавах металів при високих тисках та температурах (НТНР-кристалізація). Напівпровідникові кристали алмазу при цьому можливо отримувати шляхом легування їх у процесі росту електрично активними домішками, насамперед бором, що дає можливість забезпечувати p -тип провідності. При цьому, як недавно показано [3], характерна особливість кристалічної будови монокристалів — їх секторіальна неоднорідність відносно вмісту домішок і дефектів — впливає на електричні властивості активних напівпровідникових елементів і потребує використання односекторних зразків з необхідним розподілом домішок. Так, найбільш перспективним напівпровідниковим матеріалом для використання в діодах Шоттки на основі алмазу є легований бором алмаз із дефектно-домішковою структурою секторів росту $\{100\}$ і $\{311\}$, що обумовлено більшою рухливістю носіїв заряду порівняно із сектором $\{111\}$. Тому для використання необхідно мати достатній розвиток таких секторів за умови їх локалізації шляхом механічної або лазерної обробки кристалів. У зв'язку з цим першочерговим завданням є необхідність вирощування кристалів потрібного габітусу з прогнозуванням їх внутрішньої секторальної будови та можливостей досягнення необхідних розмірів (об'ємів) для подальшого застосування.

Для напівпровідникових монокристалів алмазу, отриманих нами шляхом розчин-розплавної кристалізації в системі Fe—Al—B—C при високих тисках і температурах [3], задача аналізу форми кристалів та моделювання габітусу і секторальної будови була вирішена шляхом розвинутого нещодавно методу цифрової мікрофотограмметрії [4]. Використання методу субміліметрової/мікронної фотограмметрії на близьких відстанях (ФБВ) має значний потенціал в аналізі форми кристалів алмазів [5, 6].

Важливим використанням методу дистанційної мікрофотограмметрії є моделювання розкрою кристалів з урахуванням внутрішньої секторальної будови, яка дає можливість з отриманих кристалів вирізати пластини різної кристаліграфічної орієнтації (рис. 1).

Кристали на рис. 1, *а* являють собою напівпровідникові алмази типу ІІв масою 0,46, 0,38 і 0,49 кар (зліва направо); вони леговані бором у межах 10^{17} – 10^{18} см⁻³, мають темно-синій колір і отримані шляхом НРНТ-кристалізації. Шляхом експрес-сканування методом ФБВ можна розрахувати моделі і побудувати ідеалізовані габітусні форми, які в подальшому можливо використовувати для розкрою секторів і виготовлення пластин (див. рис. 1, *б*, товщина пластин становить 500 мкм). Зображені розкрої (див. рис. 1, *б*, *в*) паралельно грані $\{111\}$ та нормально і паралельно до напрямку росту кристала $\langle 001 \rangle$ (зліва направо). Сектори росту різної кристаліграфічної орієнтації мають різний ступінь входження домішки бору в них, при цьому октаедричний $\{111\}$ і тригон-триоктаедричний $\{113\}$ сектори є найбільш активними у захопленні домішок, що добре видно на зображених перерізах (див. рис. 1, *б*). Одержана картина ідеалізованих секторів (див. рис. 1, *в*) росту дає можливість з достатньою точністю здійснювати розкрій та порізку кристалів для подальшого застосування.

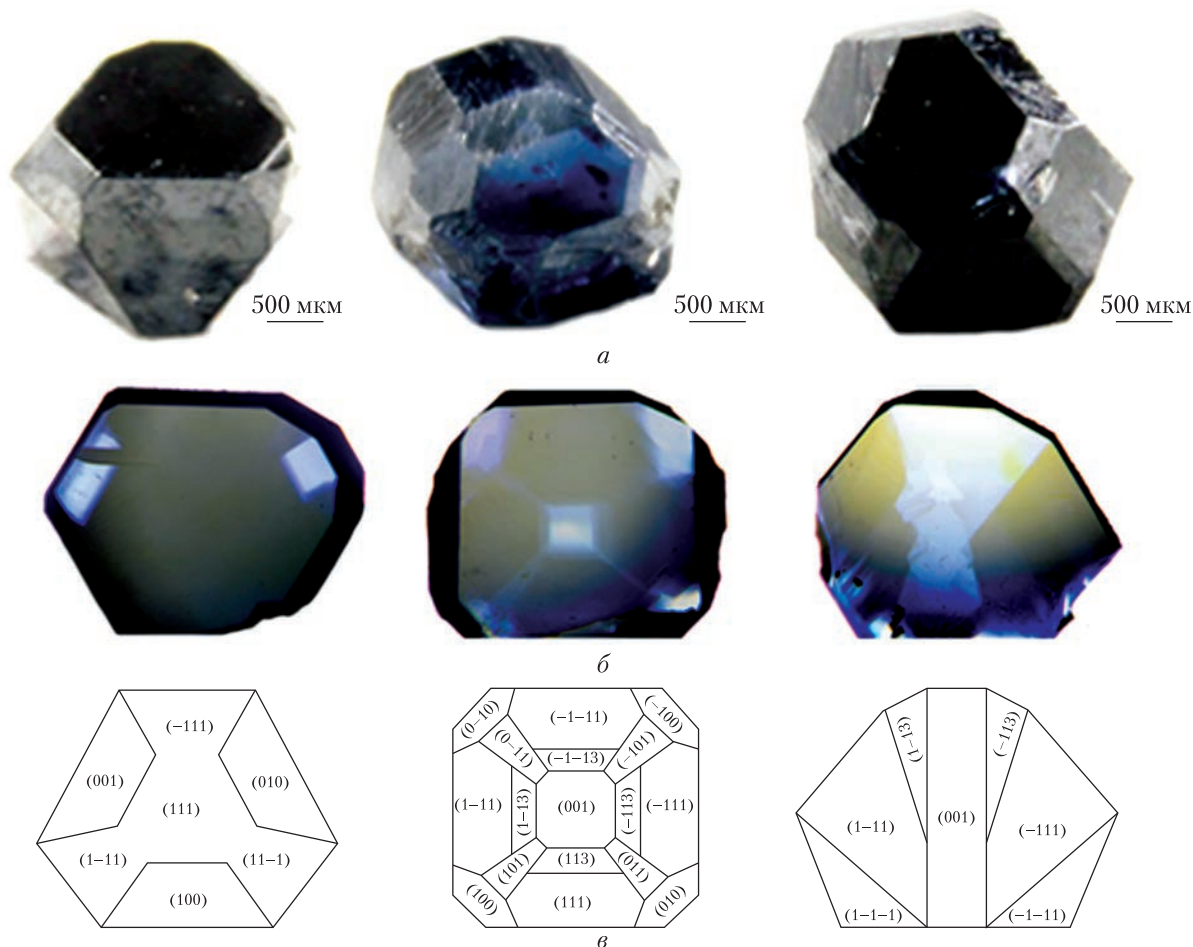


Рис. 1. Вирощені монокристали НРНТ-алмазу типу IIb (а), пластини завтовшки 500 мкм, вирізані із кристалів (б), ідеалізоване розташування секторів росту на пластинках відповідної орієнтації (в)

Другим головним фактором аналізу придатності використання напівпровідникових НРНТ-кристалів є визначення структурної досконалості кристалічної будови вирощених зразків алмазу, яке виконується за допомогою мікроскопії спектроскопії при кімнатній температурі в геометрії зворотного розсіювання від різних граней кристала або різних секторів росту пластин алмазу (рис. 2, а); сучасні дослідження ґрунтуються на застосуванні стандартних методик з використанням спектрометра Horiba Jobin-Yvon та Ar-Kr лазера з довжиною хвилі 488 нм.

У раманівських спектрах структурно досконалих кристалів алмазу реєструється інтенсивна фононна F_{2g} -смуга алмазу з частотою $\omega = 1332 \text{ см}^{-1}$ та півшириною $\Gamma = 2 \text{ см}^{-1}$, зумовлена процесом непружного розсіювання світла першого порядку на оптичних фонах центру зони Бріллюена алмазу. Також реєструється серія додаткових фононних смуг поблизу 588, 920 та 1046 см^{-1} , які пов'язують з дефектно-індукованим розсіюванням, зумовленим вбудовуванням домішки бору в ґратку алмазу [7]. Відносна інтенсивність додаткових смуг корелює з концентрацією домішки бору, що дає можливість проводити якісний аналіз рівня легування домішкою бору в різних секторах росту монокристалів алмазу [3]. Спостережу-

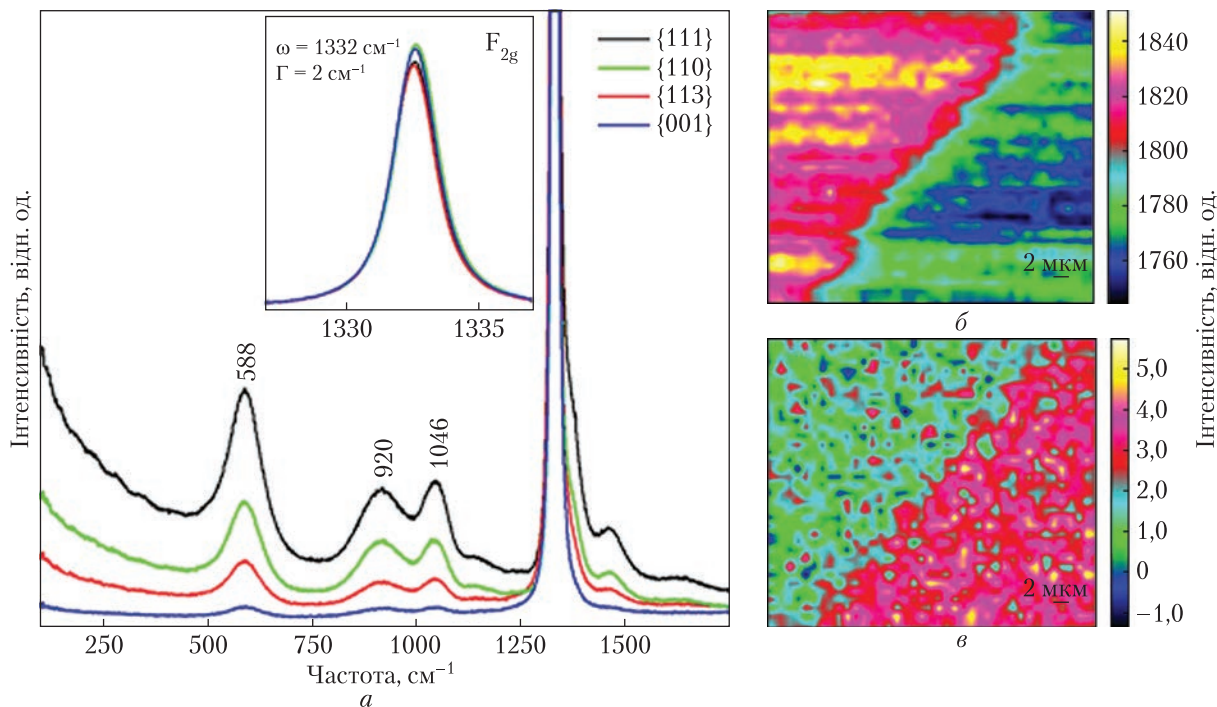


Рис. 2. Раманівські спектри легованих бором монокристалів НРНТ-алмазу типу ІІв (а), виміряні від граней {001}, {111}, {110} та {113}. Раманівські карти розподілу інтенсивності фононних смуг 1330 см^{-1} (б) та 580 см^{-1} (в) на границі секторів росту $\{-1-13\}$ та $\{-1-11\}$

ване поступове зменшення інтенсивності додаткових смуг у послідовності {111} – {110} – {113} – {001} відповідає зміні концентрації бору у відповідних секторах росту. Використання конфокального мікроскопа дає змогу візуалізувати просторовий розподіл бору в пластинках алмазу із субмікронною роздільною здатністю [8]. Аналіз типових раманівських просторових карт міжсекторальної області легованої бором пластини алмазу (див. рис. 2, б, в) свідчить про рівномірний розподіл інтенсивності фононних смуг у межах кожного сектора росту та наявність різкої межі переходу між секторами росту $\{-1-13\}$ та $\{-1-11\}$.

Головним, третім фактором аналізу напівпровідникових властивостей алмазу, є визначення дефектно-домішкового складу кристала методом інфрачервоної (ІЧ) спектроскопії. Зазвичай спектри ІЧ-поглинання вимірюються при кімнатній температурі в області $100\text{--}5000\text{ см}^{-1}$ в геометрії пропускання перпендикулярно до осі росту кристала або до площини алмазної пластини. У спектрах ІЧ поглинання реєструються смуги (рис. 3), обумовлені акцепторною домішкою бору, вбудованою в кристалічну ґратку алмазу – смуга однофононного поглинання в області $\sim 1300\text{ см}^{-1}$, та серія дискретних смуг домішкового поглинання, зумовлена електронними переходами, пов'язаними з акцепторами бору в алмазі (серія Лаймана, див. рис. 2, б) при ~ 2450 та ~ 2800 та $\sim 4088\text{ см}^{-1}$ [10]. Інтенсивність даних смуг має пряму пропорційність від концентрації некомпенсованої акцепторної домішки бору $[N_a - N_d]$, що дає змогу за спектрами ІЧ-поглинання проводити кількісну експресну оцінку концентрації носіїв заряду, що добре узгоджується з даними вимірів ефекту Холла [11].

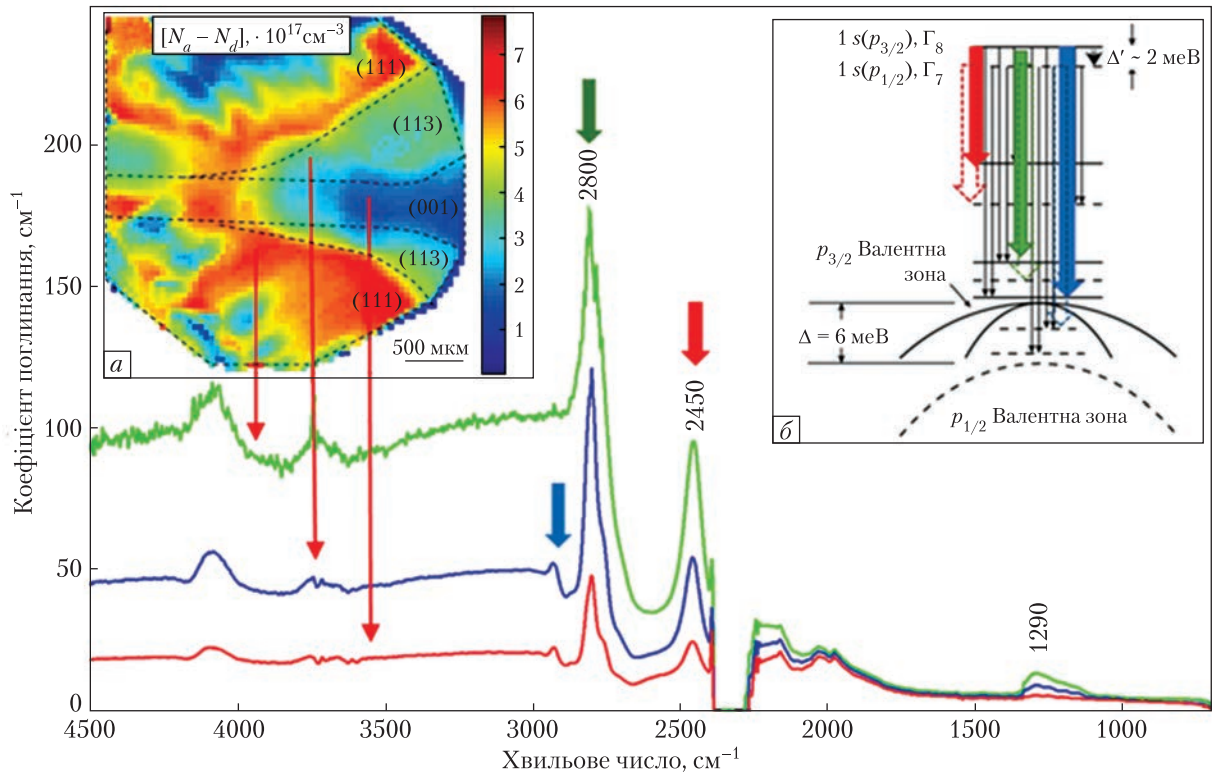


Рис. 3. Спектри ІЧ поглинання багатосекторної пластини монокристала алмазу типу ІІв. *a* – мікро-ІЧ-картографування просторового розподілу некомпенсованої домішки бору $[N_a - N_d]$; *б* – схема енергетичних рівнів дірки, обумовленої акцепторною домішкою бору [9]

Для багатосекторних пластин алмазу, вирізаних з монокристалів алмазу (див. рис. 1, б), оцінка концентрації домішки бору за коефіцієнтом поглинання в максимумі смуги однофоновного поглинання $\sim 1300 \text{ см}^{-1}$, проведена за методикою, описаною в роботі [10], дає усереднене значення концентрації некомпенсованої домішки бору $(3,64 \pm 0,55) \cdot 10^{18}$, $(4,77 \pm 0,72) \cdot 10^{18}$ та $(5,48 \pm 0,82) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Застосування мікро-ІЧ-картографування із автоматизованим ХУ скануванням дає можливість кількісно на мікрорівні аналізувати двовимірний розподіл домішки бору в площині алмазних пластин. Для багатосекторної пластини (див. рис. 3, *a*) чітко вирізняються сектори росту $\{001\}$, $\{113\}$ та $\{111\}$ і зональна неоднорідність у межах кожного із секторів. Найвищу концентрацію бору, $\sim 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, зареєстровано для сектора росту $\{111\}$, а найменшу, $\sim 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ – для сектора $\{001\}$.

Електронні властивості міжсекторальних границь досліджувались безконтактним методом силової кельвін-зонд-мікроскопії (СКЗМ) [12, 13]. Це прямий метод вимірювання локального поверхневого потенціалу через картографування контактної різниці потенціалу між металізованим зондом мікроскопа та поверхнею:

$$CPD(V) = (\phi_{tip} - \phi_{BDD}) / -e,$$

де ϕ_{BDD} – робота виходу з легованого бором кристала алмазу, ϕ_{tip} – робота виходу зонда мікроскопа. У даному випадку PtIr зонда (4,8 eV). У свою чергу величина ϕ_{BDD} визнача-

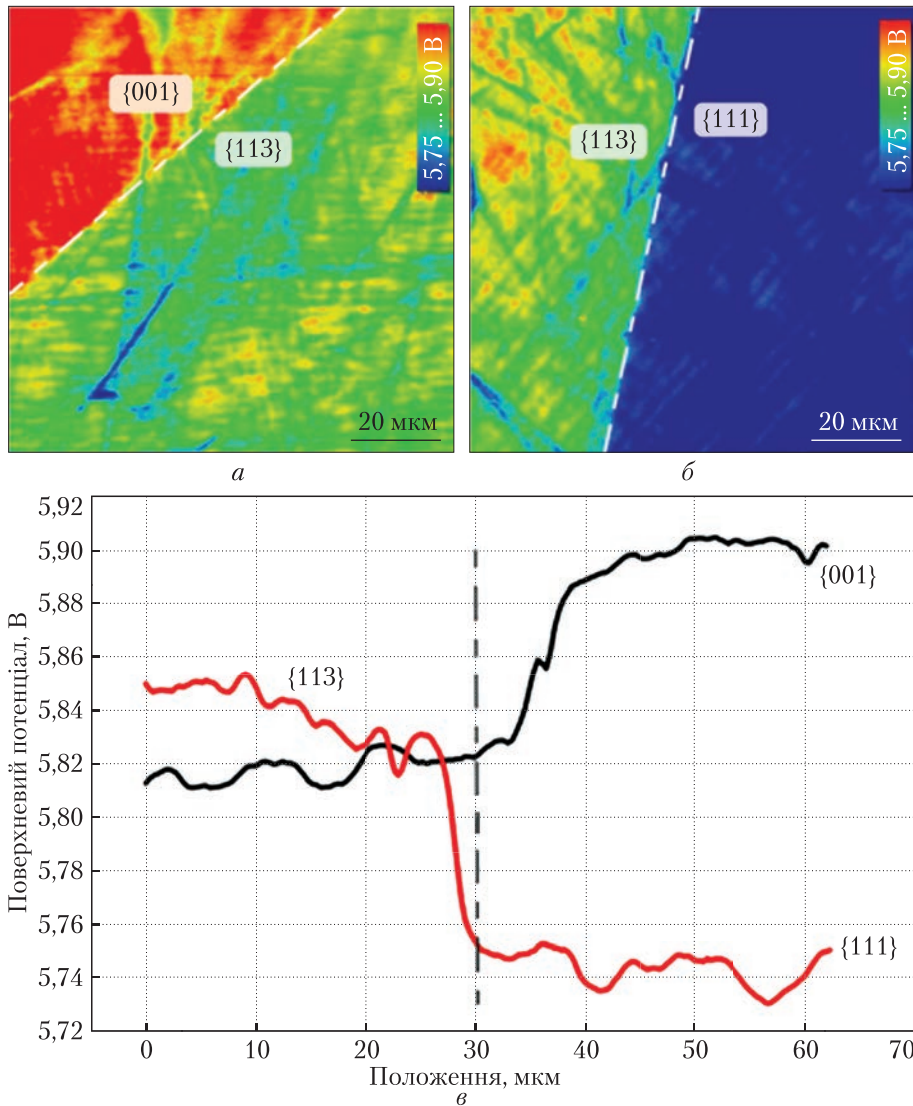


Рис. 4. СКЗМ-карти поверхневого потенціалу в околі міжсекторальних границь (штрихові лінії) {113}/ {001} (а) та {113}/ {111} (б) на алмазній пластині, вирізаній вздовж напрямку <001>. Відповідні профілі міжсекторальних перепадів потенціалу (в)

ється електронною спорідненістю χ , шириною енергетичної зони E_g , енергією Фермі E_F , максимумом валентної зони E_V та величиною вигину зон $\Delta\phi$ [14]:

$$\phi_{BDD} = E_V + E_g - E_F + \chi - \Delta\phi.$$

На рис. 4 показано приклад 2D карт потенціалу поверхні багатосекторної пластинки алмазу ІІв, вирізаній вздовж напрямку <001>, в околі міжсекторальних границь {111}/ {113} та {113}/ {001}. Електросилові вимірювання СКЗМ виявляють чіткі когерентні міжсекторальні границі на межах секторів {111}/ {113} та {113}/ {001}. Отримані значення потенціалів корелюють із літературними даними для непасивованих поверхонь алмазу та положенням

рівня Фермі в об'ємі матеріалу, легованого акцепторною домішкою бору в різній концентрації [15]. Так, для сектора {001} із низьким вмістом бору поверхневий потенціал є найвищим і відповідає потенціалу іонізації чистих поверхонь нелегованого алмазу, а зі збільшенням вмісту бору в секторах {113} та {111} спостерігається зменшення його величини відповідно різниці $E_V - E_F$ та відсотка іонізованої домішки в об'ємі кристала.

Дані, отримані методами сканувальної зондової мікроскопії щодо локальних електронних властивостей багатосекторних пластин синтетичних Пв алмазів, створюють підґрунтя для проведення кількісних оцінок концентрації вільних носіїв, вивчення особливостей зонної структури та відкривають нові можливості для локальної характеристики бар'єрних контактів. Отримані результати тісно пов'язані з оптимізацією методів підготовки та модифікації поверхонь для застосування монокристалічних алмазів в електронних приладах.

Висновки. Напівпровідникові монокристали НРНТ-алмазів p -типу вирощені методом розчин-розплавної кристалізації в ростовій системі Fe—Al—B—C. В одержаних багатосекторних пластинках алмазу концентрація легуючої домішки бору змінюється в різних секторах росту в межах $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що вказує на необхідність використання односекторного матеріалу кристала алмазу для виготовлення елементів електронних пристроїв.

Попередні наші дослідження показали перспективність використання секторів росту {100} і {311} напівпровідникових алмазів для активних елементів діодів Шоттки, які мають високі функціональні параметри. Шляхом оптимізації режимів вирощування з використанням розчинника на основі Fe—Al—B—C отримано зразки монокристалів алмазу зі значним об'ємом секторів росту {113} і {110}. Проблема порізки кристалів з метою отримання односекторних пластин вирішувалася за допомогою розробленого методу мікрофотограмметрії, який ґрунтується на побудові цифрових 3D-моделей. Це дає змогу здійснювати експресну візуалізацію форми кристалів, індексування граней і прогнозований вибір оптимальної односекторної структури пластинки, перспективної для приладного використання.

Методом раманівської спектроскопії встановлено високу структурну якість вирощених кристалів НРНТ-алмазу. Аналіз інтенсивності індукованих бором раманівських смуг показав зменшення концентрації домішки бору в різних секторах росту кристалів у послідовності {111} — {110} — {113} — {001}. На підставі виконаних за допомогою ІЧ-спектроскопії кількісних оцінок концентрації некомпенсованої домішки бору $[N_a - N_d]$ у пластинках алмазу рівень бору визначено в межах від $\sim 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ до $\sim 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Методом сканувальної кельвін-зондової мікроскопії виконано кількісну оцінку розподілу поверхневого потенціалу на нанорівні в різних секторах росту та виявлено стрибокове зміння потенціалу на їх межі. Отримані дані сканувальної мікроскопії добре узгоджуються з даними кельвін-зондової мікроскопії та мікро-ІЧ-картографування і свідчать про істотну відмінність розподілу легуючої домішки бору в різних секторах росту.

Показано необхідність використання неруйнівних діагностичних методів для характеристики та паспортизації домішкового складу і електричних параметрів односекторного алмазного матеріалу p -типу під час конструювання та виготовлення діодів Шоттки.

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”.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Bormashov V.S., Tarelkin S.A., Buga S.G., Kuznetsov M.S., Terentiev S.A., Semenov A.N., Blank V.D. Electrical properties of the high quality boron-doped synthetic single-crystal diamonds grown by the temperature gradient method. *Diam. Relat. Mater.* 2013. **35**. P. 19–23. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2013.02.011>
2. Blank V.D., Bormashov V.S., Tarelkin S.A., Buga S.G., Kuznetsov M.S., Teteruk D.V., Kornilov N.V., Terentiev S.A., Volkov A.P. Power high-voltage and fast response Schottky barrier diamond diodes. *Diam. Relat. Mater.* 2015. **57**. P. 32–36. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.01.005>
3. Strelchuk V.V., Nikolenko A.S., Lytvyn P.M., Ivakhnenko S.O., Kovalenko T.V., Danylenko I.M., Mal'yuta S.V. Growth-sector dependence of morphological, structural and optical features in boron-doped HPHT diamond crystals. *Semicond. Physics, Quantum Electron. Optoelectron.* 2021. **24**, № 3. P. 261–271. <https://doi.org/10.15407/spqeo24.03.261>
4. Литвин П.М., Стрельчук В.В., Івахненко С.О., Ніколенко А.С., Коваленко Т.В. Використання цифрової мікро-фотограмметрії для аналізу морфології вирощених монокристалів HPHT-алмазу. *Надтверді матеріали*. 2021. № 6. С. 102–104.
5. Li R.F., Thomson G.B., White G., Wang X.Z., Calderon De Anda J., Roberts K.J. Integration of crystal morphology modeling and on-line shape measurement. *AICHE J.* 2006. **52**, № 6. P. 2297–2305. <https://doi.org/10.1002/aic.10818>
6. 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. **91**, Iss. 5. 053902. <https://doi.org/10.1063/5.0008599>
7. Blank V.D., Denisov V.N., Kirichenko A.N., Kuznetsov M.S., Mavrin B.N., Nosukhin S.A., Terentiev S.A. Raman scattering by defect-induced excitations in boron-doped diamond single crystals. *Diam. Relat. Mater.* 2008. **17**, Iss. 11. P. 1840–1843. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2008.07.004>
8. Nikolenko A.S., Strelchuk V.V., Lytvyn P.M., Mal'yuta S.V., Danylenko I.M., Gontar O.G., Starik S.P., Kovalenko T.V., Ivakhnenko S.O. Intersectoral boron-impurity-related fluctuations of local electrical properties in semiconductor HPHT diamond plates of different orientations. *Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2021): Proceedings of the 9th International research and practice conference (Lviv, 25–27 August 2021)*. Lviv, 2021. P. 389–390.
9. Kim H., Vogelgesang R., Ramdas A.K., Rodriguez S., Grimsditch M., Anthony T.R. Electronic Raman and infrared spectra of acceptors in isotopically controlled diamonds. *Phys. Rev. B.* 1998. **57**. P. 15315–15327. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.57.15315>
10. Howell D., Collins A.T., Loudin L.C., Diggie P.L., D'Haenens-Johansson U.F.S., Smit K.V., Katrusha A.N., Butler J.E., Nestola F. Automated FTIR mapping of boron distribution in diamond. *Diam. Relat. Mater.* 2019. **96**. P. 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.02.029>
11. Collins A.T., Williams A.W.S. The nature of the acceptor centre in semiconducting diamond. *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1971. **4**, № 13. P. 1789–1800. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/4/13/030>
12. Weaver J.M.R., Abraham D.W. High resolution atomic force microscopy potentiometry. *J. Vac. Sci. Technol. B: Microelectron. Nanom. Struct.* 1991. **9**. P. 1559–1561. <https://doi.org/10.1116/1.585423>
13. Nonnenmacher M., O'Boyle M.P., Wickramasinghe H.K. Kelvin probe force microscopy. *Appl. Phys. Lett.* 1991. **58**, Iss. 25. P. 2921–2923. <https://doi.org/10.1063/1.105227>
14. Rodriguez B.J., Yang W.-C., Nemanich R.J., Gruverman A. Scanning probe investigation of surface charge and surface potential of GaN-based heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* 2005. **86**, Iss. 11. P. 112–115. <https://doi.org/10.1063/1.1869535>
15. Bandis C., Pate B.B. Photoelectric emission from negative-electron-affinity diamond (111) surfaces: Exciton breakup versus conduction-band emission. *Phys. Rev. B.* 1995. **52**. P. 12056–12071. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.12056>

Надійшло до редакції 25.10.2021

REFERENCES

1. Bormashov, V. S., Tarelkin, S. A., Buga, S. G., Kuznetsov, M. S., Terentiev, S. A., Semenov, A. N. & Blank, V. D. (2013). Electrical properties of the high quality boron-doped synthetic single-crystal diamonds grown by the temperature gradient method. *Diam. Relat. Mater.*, 35, pp. 19-23. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2013.02.011>
2. Blank, V. D., Bormashov, V. S., Tarelkin, S. A., Buga, S. G., Kuznetsov, M. S., Teteruk, D. V., Kornilov, N. V., Terentiev, S. A. & Volkov, A. P. (2015). Power high-voltage and fast response Schottky barrier diamond diodes. *Diam. Relat. Mater.*, 57, pp. 32-36. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.01.005>
3. Strelchuk, V. V., Nikolenko, A. S., Lytvyn, P. M., Ivakhnenko, S. O., Kovalenko, T. V., Danylenko, I. M. & Maljuta, S. V. (2021). Growth-sector dependence of morphological, structural and optical features in boron-doped HPHT diamond crystals. *Semicond. Physics, Quantum Electron. Optoelectron.*, 24, No. 3, pp. 261-271. <https://doi.org/10.15407/spqeo24.03.261>
4. Lytvyn, P. M., Strelchuk, V. V., Ivakhnenko, S. O., Nikolenko, A. S. & Kovalenko, T. V. (2021). Using digital microphotogrammetry for HPHT-diamond single crystals morphology analysis. *Superhard Mater.*, No. 6, pp. 102-104 (in Ukrainian).
5. Li, R. F., Thomson, G. B., White, G., Wang, X. Z., Calderon De Anda, J. & Roberts, K. J. (2006). Integration of crystal morphology modeling and on-line shape measurement. *AIChE J.*, 52, No. 6, pp. 2297-2305. <https://doi.org/10.1002/aic.10818>
6. Pajeroski, D. M., Ng, R., Peterson, N., Zhang, Y., Stone, M. B., dos Santos, A. M., Bunn, J. & Fanelli, V. (2020). 3D scanning and 3D printing AlSi10Mg single crystal mounts for neutron scattering. *Rev. Sci. Instrum.*, 91, Iss. 5, 053902. <https://doi.org/10.1063/5.0008599>
7. Blank, V. D., Denisov, V. N., Kirichenko, A. N., Kuznetsov, M. S., Mavrin, B. N., Nosukhin, S. A. & Terentiev, S. A. (2008). Raman scattering by defect-induced excitations in boron-doped diamond single crystals. *Diam. Relat. Mater.*, 17, Iss. 11, pp. 1840-1843. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2008.07.004>
8. Nikolenko, A. S., Strelchuk, V. V., Lytvyn, P. M., Maljuta, S. V., Danylenko, I. M., Gontar, O. G., Starik, S. P., Kovalenko, T. V. & Ivakhnenko, S. O. (2021, August). Intersectoral boron-impurity-related fluctuations of local electrical properties in semiconductor HPHT diamond plates of different orientations. *Proceedings of the 9th International Research and Practice Conference Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2021)* (pp. 389–390), Lviv.
9. Kim, H., Vogelgesang, R., Ramdas, A. K., Rodriguez, S., Grimsditch, M. & Anthony, T. R. (1998). Electronic Raman and infrared spectra of acceptors in isotopically controlled diamonds. *Phys. Rev. B.*, 57, pp. 15315-15327. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.57.15315>
10. Howell, D., Collins, A. T., Loudin, L. C., Diggle, P. L., D'Haenens-Johansson, U. F. S., Smit, K. V., Katrusha, A. N., Butler, J. E. & Nestola, F. (2019). Automated FTIR mapping of boron distribution in diamond. *Diam. Relat. Mater.*, 96., pp. 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.02.029>
11. Collins, A. T. & Williams, A. W. S. (1971). The nature of the acceptor centre in semiconducting diamond. *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 4, No. 13, pp. 1789-1800. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/4/13/030>
12. Weaver, J. M. R. & Abraham, D. W. (1991). High resolution atomic force microscopy potentiometry. *J. Vac. Sci. Technol. B: Microelectron. Nanom. Struct.*, 9, pp. 1559-1561. <https://doi.org/10.1116/1.585423>
13. Nonnenmacher, M., O'Boyle, M. P. & Wickramasinghe, H. K. (1991). Kelvin probe force microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 58, No. 25, pp. 2921-2923. <https://doi.org/10.1063/1.105227>
14. Rodriguez, B. J., Yang, W.-C., Nemanich, R. J. & Gruverman, A. (2005). Scanning probe investigation of surface charge and surface potential of GaN-based heterostructures. *Appl. Phys. Lett.*, 86, Iss. 11, pp. 112-115. <https://doi.org/10.1063/1.1869535>
15. Bandis, C. & Pate, B.B. (1995). Photoelectric emission from negative-electron-affinity diamond (111) surfaces: Exciton breakup versus conduction-band emission. *Phys. Rev. B.*, 52, pp. 12056-12071. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.12056>

Received 25.10.2021

T.V. Kovalenko¹, <https://orcid.org/0000-0003-4878-5161>

A.S. Nikolenko², <https://orcid.org/0000-0001-6775-3451>

S.O. Ivakhnenko¹, <https://orcid.org/0000-0002-4796-3416>

V.V. Strelchuk², <https://orcid.org/0000-0002-6894-1742>

P.M. Lytvyn², <https://orcid.org/0000-0002-0131-9860>

I.M. Danylenko², <https://orcid.org/0000-0002-8740-204X>

O.O. Zanevskiy¹, <https://orcid.org/0000-0002-6751-866X>

¹ V. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine, Kyiv

² V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv

E-mail: tetiana.v.kovalenko@gmail.com

SEMICONDUCTOR HPHT-DIAMONDS AS ACTIVE ELEMENTS OF ELECTRONIC DEVICES: THEIR STRUCTURAL AND ELECTRONIC PROPERTIES

Structurally perfect diamond single crystals of type IIb doped with boron with developed growth sectors {113} and {110} are grown by the HPHT- crystallization method. Single-sector semiconductor diamond plates are obtained by the predicted cutting of crystals by mechanical and laser treatments using the developed micro-photogrammetric 3D modeling of the sector structure. Raman and IR spectroscopies have been used to study the structural perfection and peculiarities of the defect-impurity composition of crystals. The electronic properties of growth sectors and intersectoral boundaries are characterized by the non-contact method of force Kelvin probe microscopy. The necessity of using certain optical and electrophysical diagnostic methods of p-type semiconductor material certification and the prospects of using single-sector semiconductor wafers for the development of Schottky diode designs are demonstrated.

Keywords: boron-doped HPHT diamond, temperature gradient method, micro-photogrammetry, Raman spectroscopy, FTIR spectroscopy, KPFM microscopy, Schottky diode.