Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0825U003061

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 21-07-2025

Статус: Захищена

Реквізити наказу МОН / наказу закладу:

II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Макар Тарас Романович
2. Taras R. Makar

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCHID ID: 0009-0006-8870-082X

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 105

Назва наукової спеціальності: Прикладна фізика та наноматеріали

Галузь / галузі знань:

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: Прикладна фізика та наноматеріали

Дата захисту: 24-07-2025

Спеціальність за освітою: Мікро- та наносистемна техніка

Місце роботи здобувача: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, буд. 1, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Сектор науки: Університетський

III. Відомості про організацію, де відбувся захист

Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради): PhD 9660

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, буд. 1, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Сектор науки: Університетський

IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, буд. 1, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Сектор науки: Університетський

V. Відомості про дисертацію

Мова дисертації: Українська

Коди тематичних рубрик: 29.41.01, 47.09.48

Тема дисертації:

1. Електронні та структурні властивості поверхонь кристалічних халькогенідів індію.

2. Electronic and structural properties of surfaces of crystalline indium chalcogenides.

Реферат:

1. У дисертаційній роботі досліджено процеси формування індієвих наноструктур на поверхнях сколювання шаруватих халькогенідних напівпровідників In4Se3 та InTe. Розглянуто можливість використання поверхонь (100) In4Se3 та (001) InTe як природних наноструктурованих матриць для створення наносистем In□/ In4Se3 та In□/InTe. У межах дослідження застосовано ультрафіолетову (УФЕС) та Х-променеву (ХФЕС) фотоелектронну спектроскопію, скануючу тунельну мікроскопію/спектроскопію (СТМ/СТС), а також моделювання в рамках теорії функціонала електронної густини (DFT-GGA). Проведено розрахунок електронно-енергетичної структури для In4Se3. Оцінено електронно-енергетичну структуру та елементно-фазовий склад поверхонь сколювання до і після очищення, в результаті впливу іонного бомбардування та термообробки на поверхню. Встановлено, що іонне розпилення змінює стехіометрію та електронну густину станів поверхні, а найбільш

достовірну інформацію про електронно-енергетичну структуру поверхні можна отримати для атомарно чистих поверхонь, які не піддаються тривалій експозиції у надвисокому вакуумі. Досліджено поверхню InTe після сколювання ex situ, на якій виявлено оксидні фази й органічні забруднення. Ефективним методом очищення є іонне розпилення, що, втім, супроводжується змінами стехіометрії поверхні. Уперше реалізовано створення 0D наносистем In□ на поверхні (001) InTe за допомогою термічно активованого вторинного твердотільного змочування. Встановлено, що густина електронних станів у забороненій зоні InTe зростає зі збільшенням кількості індію, що корелюється із збільшенням кількості металічного індію на поверхні. Для поверхні (100) In4Se3 запропоновано новий підхід до створення 1D наносистем In□ через контрольоване іонне розпилення. Виявлено орієнтацію лінійних наноструктур уздовж борозен на поверхні та можливість формування структур із чіткими геометричними параметрами. Досліджено кінетику росту індієвих наноструктур на обох підкладках. Показано, що ріст відбувається за механізмом Фольмера–Вебера, а послідовність процедур нанесення та нагріву впливає на морфологію покриття. Практична цінність роботи полягає в запропонованих технологіях формування стабільних наноструктур без необхідності попередньої обробки підкладки. Результати є перспективними для застосування в наноелектроніці, зокрема при створенні транзисторів, сенсорів, фотонних пристроїв та контактів на бар'єрі Шотткі. Таким чином, проведене дослідження сприяє глибшому розумінню процесів самоорганізації на атомному рівні та відкриває нові можливості в інженерії функціональних наносистем.

2. The thesis examines the formation processes of indium nanostructures on the cleavage surfaces of layered chalcogenide semiconductors In4Se3 and InTe. The study examines the potential use of the (100) In4Se3 and (001) InTe surfaces as naturally nanostructured matrices for creating In□/ In4Se3 and In□/InTe nanosystems. Ultraviolet (UPS) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/STS), and density functional theory within the generalized gradient approximation (DFT-GGA) were employed. The electronic structure of In4Se3 was calculated, and the band structure and elemental-phase composition of the cleavage surfaces were evaluated before and after cleaning, including the effects of ion bombardment and thermal treatment. It was found that ion sputtering alters the stoichiometry and electron density of surface states, and the most reliable information on the electronic structure can be obtained from atomically clean surfaces not exposed to prolonged ultra-high vacuum (UHV). The surface of InTe cleaved ex situ was found to contain oxide phases and organic contaminants. Although ion sputtering effectively cleans the surface, it also alters stoichiometry. For the first time, the formation of 0D In□ nanosystems on the (001) InTe surface via thermally activated solid-state dewetting was achieved. An increase in the density of electronic states within the bandgap of InTe correlated with a higher amount of metallic indium. A new approach was proposed for creating 1D In□ nanosystems on the (100) In4Se3 surface via controlled ion sputtering. Linear nanostructures were found to align along the grooves of the substrate, forming structures with well-defined geometric parameters. The growth kinetics of indium nanostructures on both substrates was investigated. It was shown that the growth follows the Volmer–Weber mechanism, with the sequence of deposition and heating procedures influencing the coating morphology. The practical value of the work lies in the proposed technologies for forming stable nanostructures without the need for substrate pre-treatment. The results are promising for nanoelectronics applications, particularly in transistors, sensors, photonic devices, and Schottky barrier contacts. Thus, the conducted research contributes to a deeper understanding of atomic-level self-organization processes and opens new prospects in functional nanosystem engineering.

Державний реєстраційний номер ДіР:

Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки: Нові речовини і матеріали

Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності: Освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій

Підсумки дослідження: Нове вирішення актуального наукового завдання

Публікації:

- 1. Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Ciszewski, A., Mazur, P., Dzyuba, V. I., & Makar, T. R. (2021). InTe surface application as template for indium deposited nanosystem formation. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 721(1), 1–9.
- 2. Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Ciszewski, A., Mazur, P., Tsvetkova, O. V., Dzyuba, V. I., & Makar, T. R. (2021). Solid-state Dewetting Formation of In/InTe Nanosystem. J. Nano- Electron. Phys., 13(4), 04032.
- 3. Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Ciszewski, A., Mazur, P., Dzyuba, V. I., Makar, T. R., & Tsvetkova, O. V. (2023). Indium deposited nanosystems formation on 2D layered chalcogenide crystals' surfaces. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 768(1), 20–32.
- 4. Makar, T. R., Dzyuba, V. I, Nenchuk, T. M., Tuziak, O. Ya., & Galiy, P. V. (2024). Electronic energy structure of the (100) In4Se3 surfaces at different preparation and treatment in ultraviolet photoelectron spectroscopy study. Physics and Chemistry of Solid State, 25(1), 114–119.
- 5. Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Ciszewski, A., Mazur, P., Dzyuba, V. I., & Makar, T. R. (2024). Studies of indium nanostructures growth models on A3B 6 layered templates. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 768(15), 799– 808.
- 6. Галій, П. В., Ненчук, Т. М., Макар, Т. Р., Дзюба, В. І., & Цвєткова, О. В. (2024). Спосіб одержування лінійних (1D) індієвих структур на наноструктурованій поверхні In□Se□ (Патент на корисну модель № 155721). Україна. Заявл. 25.05.2023; опубл. 03.04.2024, Бюл. № 14.
- 7. Makar, T. R., Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Mazur, P., & Dzyuba, V. I. (2021, October 11–16). Solid state dewetting application in formation of In0 /InTe nanosystems. XVIII International Freik Conference on Physics and technology of Thin Films and Nanosystems, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 121.
- 8. Макар, Т. Р., Галій, П. В., Ненчук, Т. М., & Дзюба, В. І. (2022, 4 лютого). Елементно-фазовий склад та кристалографія поверхонь сколювання (0001) InTe у якості матриць для формування низьковимірних систем In0 /InTe(0001) методами електронних спектроскопій. Звітна наукова конференція університету за 2021 рік, Львів, Україна, 121.
- 9. Макар, Т. Р., Галій, П. В., Ненчук, Н. М., & Дзюба, В. І. (2022, 24–25 березня). Одержання наносистем In0 /In4Se3 на поверхні кристалічного In4Se3 при зміні її стехіометрії методом іонного травлення. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція з економіки, інформаційних систем і технологій, психології та педагогіки «Світ наукових досліджень», Тернопіль, Україна, 65–71.
- 10.Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Ciszewski, A., Mazur, P., Dzyuba, V. I., & Makar, T. R. (2022, May 30–June 3). 2D layered chalcogenide crystals' surfaces application as templates for indium deposited nanosystems formation. E-MRS 2022 Spring Meeting, Strasbourg, France.
- 11.Dzyuba, V. I., Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Ciszewski, A., Mazur, P., & Makar, T. R. (2022, June 7–9). Self-organized In0 -nanostructures on the (100) In4Se3 crystal surfaces induced by Ar□ ions' sputtering. 82nd Annual Physical Electronics Conference, Loyola University Chicago, Lakeshore Campus, Chicago, IL, USA, 55.
- 12.Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Ciszewski, A., Mazur, P., Dzyuba, V. I., & Makar, T. R. (2022, August 25–27). Solid indium deposited nanosystems formation on 2D layered chalcogenide crystals' surfaces. 10th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2022), Lviv, Ukraine, 298.
- 13.Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Mazur, P., Dzyuba, V. I., & Makar, T. R. (2022, October 19–20). Self-organization with In0 -nanostructures formation on the (100) In4Se3 crystal surfaces induced by Ar□ ions' sputtering. Ukrainian Conference with International Participation "Chemistry, Physics and Technology of Surface", Kyiv, Ukraine, 60.
- 14.Makar, T. R., Dziuba, V. I., Nenchuk, T. M., & Galiy, P. V. (2023, 16–17 березня). The surface segregation of indium on the (100) In4Se3 surface in the spectra of scanning tunneling spectroscopy (STS). Міжнародна мультидисциплінарна наукова інтернет-конференція «Світ наукових досліджень», Тернопіль, Україна – Переворськ, Польща, 257–263.

- 15.Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Ciszewski, A., Mazur, P., Dzyuba, V. I., & Makar, T. R. (2023, August 16–19). Studies of indium nanostructures growth models on A3B 6 layered template. 11th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2023), Bukovel, Ukraine, 376.
- 16.Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Dzyuba, V. I., & Makar, T. R. (2023, October 11– 12). UPS study of the preparation and treatment influence of (100) In4Se3 cleavage surfaces on their electronic energy structure. Ukrainian Conference with International Participation "Chemistry, Physics and Technology of Surface", Kyiv, Ukraine, 49.
- 17.Makar, T. R., Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Ciszewski, A., Mazur, P., & Dzyuba, V. I. (2023, September 18–21). Indium nanostructures growth mechanisms on A3B 6 layered templates. E-MRS 2023 Fall Meeting, Warsaw, Poland.
- 18.Makar, T. R., Dzyuba, V. I., Nenchuk, T. M., Tuziak, O. Ya., & Galiy, P. V. (2023, October 9–14). Electronic energy structure of the (100) In4Se3 surfaces by deferring preparation and treatment in UPS study. XIX International Freik Conference on Physics and technology of Thin Films and Nanosystems, IvanoFrankivsk, Ukraine, 51.
- 19.Макар, Т. Р., & Галій, П. В. (2024, 5 лютого). Формування індієвих наноструктур на поверхні сколу (100) In4Se3. Звітна наукова конференція університету за 2023 рік, Львів, Україна, 119.
- 20.Макар, Т. Р., Галій, П. В., Ненчук, Н. М., & Дзюба, В. І. (2024, 20–21 червня). Дослідження ефективних мас носіїв заряду в In4Se3методом фотоелектронної спектроскопії з кутовим розділенням. Міжнародна мультидисциплінарна наукова інтернет-конференція «Світ наукових досліджень», Тернопіль, Україна – Ополе, Польща, 133–137.
- 21.Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Mazur, P., Dzyuba, V. I., Makar, T. R., & Poplavskyy, O. P. (2024, August 21–24). Fractal analysis in the surface nano engineering of A3B 6 layered templates. 12th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2024), Uzhhorod, Ukraine.
- 22.Макар, Т. Р., Галій, П. В., & Дзюба, В. І. (2025, 5 лютого). Електронні спектри та ефективні маси носіїв заряду поверхонь сколювання (100) In4Se3 за результатами УФЕСКР. Звітна наукова конференція університету за 2024 рік, Львів, Україна, 143.

Наукова (науково-технічна) продукція: технології; матеріали

Соціально-економічна спрямованість:

Охоронні документи на ОПІВ:

Впровадження результатів дисертації: Планується до впровадження

Зв'язок з науковими темами: № 0122U200688

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Галій Павло Васильович

2. Pavlo V. Galiy

Кваліфікація: д. ф.-м. н., професор, 01.04.18

Ідентифікатор ORCHID ID: 0000-0001-8347-2107

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 55901064700; Web of Science Researcher ID: KOH-4374-2024; https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=_hexKjgAAAAJ

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, буд. 1, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Сектор науки: Університетський

VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів

Офіційні опоненти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Семчук Олександр Юрійович
2. Oleksandr Y. Semchuk

Кваліфікація: д. ф.-м. н., старший науковий співробітник, 01.04.18

Ідентифікатор ORCHID ID: Не застосовується

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 6603561585; Web of Science Researcher ID: DRZ-6425-2022; https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=-Lxdz9kAAAAJ

Повне найменування юридичної особи: Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 03291669

Місцезнаходження: вул. Генерала Наумова, буд. 17, Київ, 03164, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Національна академія наук України

Ідентифікатор ROR:

Сектор науки: Академічний

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Коцюбинський Володимир Олегович
2. Volodymyr O. Kotsyubynsky

Кваліфікація: д. ф.-м. н., професор, 01.04.18

Ідентифікатор ORCHID ID: 0000-0001-6461-937X

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 9232955000; Web of Science Researcher ID: ABE-4912-2021; https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=QMJDShQAAAAJ

Повне найменування юридичної особи: Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

Код за ЄДРПОУ: 02125266

Місцезнаходження: вул. Шевченка, буд. 57, Івано-Франківськ, 76018, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Сектор науки: Університетський

Рецензенти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Оленич Ігор Богданович
2. Ihor B. Olenych

Кваліфікація: д. ф.-м. н., професор, 01.04.10

Ідентифікатор ORCHID ID: 0000-0002-6642-0222

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 6506030300; Web of Science Researcher ID: FNS-8396-2022; https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=BM6l9S0AAAAJ

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, буд. 1, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Сектор науки: Університетський

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Карбовник Іван Дмитрович
2. Ivan D. Karbovnyk

Кваліфікація: д. ф.-м. н., професор, 01.04.10

Ідентифікатор ORCHID ID: 0000-0002-3697-4902

Додаткова інформація: Scopus Author ID: 55911323100; Web of Science Researcher ID: B-8572-2009; https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=tZ5Kt34AAAAJ

Повне найменування юридичної особи: Львівський національний університет імені Івана Франка

Код за ЄДРПОУ: 02070987

Місцезнаходження: вул. Університетська, буд. 1, Львів, 79000, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Сектор науки: Університетський

VIII. Заключні відомості

Власне Прізвище Ім'я По-батькові голови ради	Мудрий Степан Іванович
Власне Прізвище Ім'я По-батькові головуючого на засіданні	Мудрий Степан Іванович
Відповідальний за підготовку облікових документів	Жак Ольга Володимирівна
Реєстратор	УкрІНТЕІ
Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є відповідальним за реєстрацію наукової діяльності	Юрченко Тетяна Анатоліївна