ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації «Електронні та структурні властивості поверхонь кристалічних халькогенідів індію» здобувача ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»
Макара Тараса Романовича

1. Актуальність теми дисертації.

Сучасна мікро- та наноелектроніка потрібує глибоких знань фізичних процесів, що відбуваються в матеріалах та на їх поверхні, включаючи особливості формування різноманітних об’єктів пониженої вимірності та наноструктур. Особливе значення має розуміння механізмів утворення на поверхнях нанооб'єктів (наноточок (0D) та нанодротів (1D)), а також уміння керувати їх геометрією та вимірністю, що важливо, для створення пристроїв наноелектроніки із заданими електронно-енергетичними характеристиками.

Важливими є знання щодо властивостей нових матеріалів, які дозволяють покращити електронні, оптичні й хімічні параметри наноструктур. Також необхідні знання щодо стабільності одержуваних поверхонь, як підкладок, для одержуваних низьковимірних нанообєктів як і самих наноструктур. Взаємодії одержуваних наноструктур із зовнішнім середовищем, зокрема їхню стабільність, чутливість до адсорбції речовин та зміну характеристик під впливом навколишніх умов. Вирішення вказаних завдань дає можливість розробляти нове покоління високоефективних нанопристроїв – нанодіодів, нанофото та польових нанотранзисторів.

Халькогенідні шаруваті напівпровідники такі як In_4Se_3 та InTe належать до класу матеріалів, які можуть відкрити перспективи для електроніки нового покоління. Їх поверхні продовжують привертати увагу дослідників завдяки своїм нетривіальним анізотропним властивостям. Ці сполуки кристалізуються у шаруваті структури, окремі шари-пакети, які володіють високим ступенем індивідуальності. Це зумовлює не тільки анізотропію електронних спектрів їхніх поверхонь, багатьох фізичних властивостей, але також породжує певні особливості у структурі поверхні – борознистість з ланцюжково-подібними структурами для (100) In_4Se_3. Стабільність міжшарових поверхонь сколювання та перспективність використання борознистих анізотропних сколів в якості матриць, для формування поверхневих нанодротів та наноструктур, також викликає зацікавлення. Вирішення цих задач вимагає дослідження структури поверхонь

шаруватих кристалів, їхніх електронних властивостей, контролю міжфазних взаємодій з можливим формуванням інтерфейсів.

Анізотропія цих матеріалів зі слабкими міжшаровими зв'язками Ван-дер-Ваальса відіграє надзвичайно важливу роль. З точки зору одержання нанорозмірних електронних пристроїв це дає змогу отримувати тонкі шари-пакети таких матеріалів, так звані «пластівці», а також дозволяє легко отримувати атомарно чисті поверхні методом механічного сколювання навіть у надвисокому вакуумі. Напівпровідникові шаруваті кристали селенідів та телуридів індію, завдяки структурній стабільності поверхонь, вираженими анізотропними властивостями є перспективними для використання як шаблони чи матриці для створення низькорозмірних наногетеросистем (наноточок і нанодротів).

Таким чином, з точки зору подальшого розвитку нанорозмірних електронних пристроїв необхідно дослідити можливості формування просторово впорядкованих масивів металевих наноструктур на їхніх поверхнях, а також здійснити розробку та апробацію нових технологій формування наногетероструктур на їх поверхнях.

Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених вивченню властивостей халькогенідів індію, в літературі бракує експериментальних даних щодо можливості використання поверхонь сколу напівпровідників (100) In_4Se_3 та (001) InTe в якості природних шаблонів для створення низькорозмірних наногетеросистем, зокрема отриманих у надвисокому вакуумі та досліджених адекватними та взаємодоповнюючими методами – ДПЕ (кристалографія поверхонь); ХФЕС (елементно-фазовий склад поверхонь); УФЕСКР (електронні спектри поверхонь); зондової мікроскопії (СТМ/СТС – гетеронаноструктури та електронно-енергетична структура поверхонь, АСМ) *in situ*. Також використані метод Х-променевого структурного та фазового аналізу та методи теоретичних досліджень (теорія функціонала густини).

Актуальність таких досліджень зумовлена потребою одержання просторово впорядкованих масивів металевих наноструктур на поверхнях сколювання халькогенідних кристалів A^3B^6 використаних в якості природного шаблону, з метою створення на їх основі низькорозмірних наногетеросистем.

Тему дисертації затверджено Вченою радою Львівського національного університету імені Івана Франка, протокол № 22/11 від 24 листопада 2021 року.

2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри

Дисертаційну роботу виконано згідно з основним напрямом досліджень кафедри сенсорної та напівпровідникової електроніки Львівського національного університету імені Івана Франка, а також у рамках спільних проектів з Центром передових мікроструктур і приладів (Center for Advanced Microstructures and Devices) Університету штату Луїзіани (Louisiana State University) (США): LU-PG1207 (2023) "The Anisotropy of Surface Structure and Electron Spectra the Cleavage Surface of Chalcogenides Semiconductor Crystals – In_4Se_3" та спільних досліджень у рамках наукової співпраці між Львівським національним університетом імені Івана Франка та Інститутом експериментальної фізики Вроцлавського університету (Польща) за темою досліджень "Мікро- та наноструктура поверхонь у багатофазних напівпровідникових халькогенідних системах". Частину результатів отримано в рамках наукових досліджень за тематикою: "Системний аналіз даних засобами штучного інтелекту та машинного навчання" (номер державної реєстрації № 0122U200688, 2022–2024 рр.)

3.Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Дисертація є самостійною науковою працею, в якій висвітлені власні думки та розробки автора , що дозволили вирішити поставлені задачі.

Постановку завдань дослідження здійснив науковий керівник роботи проф. П.В. Галій. Наведені в роботі результати досліджень отримані автором в період з 2021 по 2024 рр.

Основні експериментальні результати, які наведені в роботі, автор отримав у співробітництві з науковим керівником та іншими співавторами. Автор брав участь у плануванні дослідження та виборі його методів. Він самостійно опрацював і займався систематизацією наукових літературних даних; здійснив обробку і інтерпретацію результатів Х-променевої фотоелектронної спектроскопії для сполуки InTe; провів модельні розрахунки втрати маси елементів поверхні кристалу In_4Se_3 від часу розпилення для способу формування наносистеми In^0/(100) In_4Se_3 зміною стехіометрії поверхні сколювання іонним розпиленням; з отриманих методом УФЕСКР даних для поверхонь сколювання In_4Se_3 розрахував ефективні маси носіїв заряду; провів моделювання зонно-енергетичної структури для In_4Se_3 методом теорії функціонала густини; інтерпретував результати дослідження морфології та електронно-енергетичної структури поверхонь сколювання (100) In_4Se_3 та (001) InTe отриманих методом скануючої тунельної мікроскопії/спектроскопії;

сформулював висновки. Узагальнювали одержані результати спільно з науковим керівником д.ф.-м.н., професором Галієм П.В. та к.ф.-м.н., доцентом Т. М. Ненчуком.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором вирішень, висновків, рекомендацій

Достовірність та обґрунтованість отриманих в роботі результатів підтверджується апробацією даних на численних міжнародних наукових конференціях та семінарах, а також публікаціями в престижних міжнародних фахових виданнях. При проведенні досліджень використано як новітні, так і багаторазово перевірені, апробовані методи. Одержані результати повністю підтверджуються сучасними взаємодоповнюючими експериментальними методами та добре узгоджуються з результатами інших дослідників, порівняння з якими проводиться у даній роботі.

Результати роботи опубліковано у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus та/або Web of Science. При цьому здійснювалась їхня перевірка під час рецензування поданих публікацій у дані наукові видання. Також результати роботи апробовано на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

1. Отримано наногетеросистему In^0/(001) InTe на поверхні сколювання (001) шаруватого кристалу InTe та досліджено процеси росту низькорозмірних 0D наносистем та наноструктур на поверхні сколювання (001) InTe.

2. Запропоновано новий підхід для одержання низькорозмірних лінійних індієвих 1D структур на поверхні сколювання (100) шаруватого кристала In_4Se_3 використаної в якості шаблону, шляхом зміни її стехіометрії іонним розпиленням. Запропонований метод дає змогу одержання, без необхідності проведення спеціальних попередніх процедур модифікації підкладки-шаблону та термічного нанесення відповідного провідного матеріалу.

3. Досліджено кінетику росту наносистем та наноструктур індію на поверхнях сколювання шаруватих кристалів A^3B^6 таких як (001) InTe та (100) In_4Se_3 отриманих методом вторинного твердотільного змочування. Встановлено, що моделі росту термічно нанесених шарів індію та утворення металевих наноструктур визначаються послідовністю експериментальних процедур.

4. Встановлено вплив методів очищення та умов зберігання у НВВ на електронно-енергетичну структуру та електронні спектри поверхонь сколювання (100) In_4Se_3. Отримані результати дозволяють стверджувати, що формування низькорозмірних структур на таких поверхнях необхідно виконувати одразу після сколювання *in situ*, так як за таких умов поверхня є найбільш придатною для використання в якості природного шаблону щодо одержання низьковимірних систем та наноструктур.

5. Встановлено залежність кінетики росту періодичності сформованих наноструктур на поверхні шаблону (001) InTe від ступеня покриття індієм з подальшим впливом процесу змочування.

6. Аналізом спектрів густини станів на поверхні наносистеми In^0/(001)InTe, отриманих методом СТС, встановлено кореляцію між процесами вторинного твердотільного змочування та збільшенням густини електронних станів наносистеми у забороненій зоні напівпровідника InTe, що відповідає металевій фазі In^0, при збільшенні ступеня покриття індієм.

6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

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. (Scopus, Q4)

https://doi.org/10.1080/15421406.2021.1905270

(Особистий внесок авторів: ***T. Makar:*** *обробка та інтерпретація результатів для сполуки InTe отриманих методом X-променевої фотоелектронної спектроскопії, участь в обговоренні встановлених висновків;* ***P. Galiy:*** *формулювання основних теоретичних положень та ідей;* ***T. Nenchuk:*** *обробка результатів морфології поверхні сколювання (001) InTe отриманих методом скануючої тунельної мікроскопії/спектроскопії, редагування тексту наукової публікації;* ***A. Ciszewski:*** *проведення дослідження елементно-фазового складу поверхні сколювання (001) InTe методом X-променевої фотоелектронної спектроскопії;* ***P. Mazur:*** *проведення дослідження морфології поверхні сколювання (001) InTe методом скануючої тунельної мікроскопії/спектроскопії;* ***V. Dzyuba:*** *участь в обговоренні встановлених висновків.)*

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 (Scopus, Q4)

https://doi.org/10.21272/jnep.13(4).04032

(Особистий внесок авторів: ***T. Makar:*** *обробка та інтерпретація результатів для сполуки InTe отриманих методом X-променевої фотоелектронної спектроскопії, участь в обговоренні встановлених висновків;* ***P. Galiy:*** *формулювання основних теоретичних положень та ідей;* ***T. Nenchuk:*** *обробка результатів морфології поверхні сколювання (001) InTe отриманих методом скануючої тунельної мікроскопії/спектроскопії, редагування тексту наукової публікації;* ***A. Ciszewski:*** *проведення дослідження елементно-фазового складу поверхні сколювання (001) InTe методом X-променевої фотоелектронної спектроскопії;* ***P. Mazur:*** *проведення дослідження морфології поверхні сколювання (001) InTe методом скануючої тунельної мікроскопії/спектроскопії;* ***V. Dzyuba:*** *участь в обговоренні встановлених висновків;* ***O. Tsvetkova:*** *підготовка зразків до експерименту.)*

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. (Scopus, Q4)

https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2231241

(Особистий внесок авторів: ***T. Makar:*** *інтерпретація результатів дослідження морфології поверхні сколювання (100) In_4Se_3 отриманих методом скануючої тунельної мікроскопії, участь в обговоренні встановлених висновків;* ***P. Galiy:*** *формулювання основних теоретичних положень та ідей;* ***T. Nenchuk:*** *обробка результатів дослідження морфології поверхні сколювання (100) In_4Se_3 отриманих методом скануючої тунельної мікроскопії/спектроскопії, редагування тексту наукової публікації;* ***A. Ciszewski:*** *участь в процесі порівняння отриманих результатів з даними літературних джерел;* ***P. Mazur:*** *дослідження морфології поверхні сколювання (100) In_4Se_3 методом скануючої тунельної мікроскопії/спектроскопії;* ***V. Dzyuba:*** *участь в обговоренні встановлених висновків;* ***O. Tsvetkova:*** *підготовка зразків до експерименту.)*

4. **Makar, T. R.**, Dzyuba, V. I, Nenchuk, T. M., Tuziak, O. Ya., & Galiy, P. V. (2024). Electronic energy structure of the (100) In_4Se_3 surfaces at different preparation and treatment in ultraviolet photoelectron spectroscopy study. *Physics and Chemistry of Solid State*, *25*(1), 114–119. (Scopus, Q3)

https://doi.org/10.15330/pcss.25.1.114-119

*(Особистий внесок авторів: **T. Makar:** досліджено електронно-енергетичну структуру кристалу In_4Se_3 з використанням першопринципних розрахунків у рамках теорії функціонала густини, участь в обговоренні встановлених висновків ; **P. Galiy:** формулювання основних теоретичних положень та ідей, дослідження поверхневої густини електронних станів методом ультрафіолетової електронної спектроскопії; **T. Nenchuk:** участь в процесі порівняння отриманих результатів з даними літературних джерел; **V. Dzyuba:** участь в процесі порівняння отриманих результатів з даними літературних джерел; **O. Tuziak:** редагування тексту наукової публікації, участь в обговоренні встановлених висновків.)*

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 A^3B^6 layered templates. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, *768*(15), 799–808. (Scopus, Q4)

https://doi.org/10.1080/15421406.2024.2361970

*(Особистий внесок авторів: **T. Makar:** інтерпретація результатів аналізу параметрів шорсткості поверхні, отриманих методом скануючої тунельної мікроскопії, в процесі формування архітектури поверхні під час нанесення індію на шаблони халькогенідних кристалів A^3B^6; участь в обговоренні встановлених висновків; **P. Galiy:** формулювання основних теоретичних положень та ідей; **T. Nenchuk:** аналіз параметрів шорсткості поверхні, отриманих методом скануючої тунельної мікроскопії, в процесі формування архітектури поверхні під час нанесення індію на шаблони халькогенідних кристалів A^3B^6, редагування тексту наукової публікації; **A. Ciszewski:** участь в процесі порівняння отриманих результатів з даними літературних джерел;**P. Mazur:** дослідження морфології поверхонь сколювання (001) InTe та (100) In_4Se_3 методом скануючої тунельної мікроскопії/спектроскопії; **V. Dzyuba:** участь в обговоренні встановлених висновків.)*

7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо

1. **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 In^0/InTe nanosystems [Poster presentation]. XVIII International Freik Conference on Physics and technology of Thin Films and Nanosystems, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 121.

2. **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 In^0/InTe(0001) методами електронних спектроскопій [Усна доповідь]. Звітна наукова конференція університету за 2021 рік, Львів, Україна, 121.

3. **Макар, Т. Р.**, Галій, П. В., Ненчук, Н. М., & Дзюба, В. І. (2022, 24–25 березня). Одержання наносистем In^0/In_4Se_3 на поверхні кристалічного In_4Se_3 при зміні її стехіометрії методом іонного травлення [Заочна доповідь]. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція з економіки, інформаційних систем і технологій, психології та педагогіки «Світ наукових досліджень», Тернопіль, Україна, 65–71.

4. 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 [Poster presentation]. E-MRS 2022 Spring Meeting, Strasbourg, France.

5. Dzyuba, V. I., Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Ciszewski, A., Mazur, P., & **Makar, T. R.** (2022, June 7–9). Self-organized In^0-nanostructures on the (100) In_4Se_3 crystal surfaces induced by Ar^+ ions' sputtering [Poster presentation]. 82nd Annual Physical Electronics Conference, Loyola University Chicago, Lakeshore Campus, Chicago, IL, USA, 55.

6. 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 [Poster presentation]. 10th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2022), Lviv, Ukraine, 298.

7. Galiy, P. V., Nenchuk, T. M., Mazur, P., Dzyuba, V. I., & **Makar, T. R.** (2022, October 19–20). Self-organization with In^0-nanostructures formation on the (100) In_4Se_3 crystal surfaces induced by Ar^+ ions' sputtering [Poster presentation]. Ukrainian Conference with International Participation "Chemistry, Physics and Technology of Surface", Kyiv, Ukraine, 60.

8. **Makar, T. R.**, Dziuba, V. I., Nenchuk, T. M., & Galiy, P. V. (2023, 16–17 березня). The surface segregation of indium on the (100) In_4Se_3 surface in the spectra of scanning tunneling spectroscopy (STS) [Заочна доповідь]. Міжнародна мультидисциплінарна наукова інтернет-конференція «Світ

наукових досліджень», Тернопіль, Україна – Переворськ, Польща, 257–263. http://www.economy-confer.com.ua/full-article/4370

9. 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 A^3B^6 layered template [Poster presentation]. 11th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2023), Bukovel, Ukraine, 376.

10. 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) In_4Se_3 cleavage surfaces on their electronic energy structure [Poster presentation]. Ukrainian Conference with International Participation "Chemistry, Physics and Technology of Surface", Kyiv, Ukraine, 49.

11. **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 A^3B^6 layered templates [Poster presentation]. E-MRS 2023 Fall Meeting, Warsaw, Poland.

12. **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) In_4Se_3 surfaces by deferring preparation and treatment in UPS study [Poster presentation]. XIX International Freik Conference on Physics and technology of Thin Films and Nanosystems, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 51.

13. **Макар, Т. Р.**, & Галій, П. В. (2024, 5 лютого). Формування індієвих наноструктур на поверхні сколу (100) In_4Se_3 [Усна доповідь]. Звітна наукова конференція університету за 2023 рік, Львів, Україна, 119.

14. **Макар, Т. Р.**, Галій, П. В., Ненчук, Н. М., & Дзюба, В. І. (2024, 20–21 червня). Дослідження ефективних мас носіїв заряду в In_4Se_3методом фотоелектронної спектроскопії з кутовим розділенням [Заочна доповідь]. Міжнародна мультидисциплінарна наукова інтернет-конференція «Світ наукових досліджень», Тернопіль, Україна – Ополе, Польща, 133–137. https://www.economy-confer.com.ua/full-article/5630/

15. 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 A^3B^6 layered templates [Poster presentation]. 12th International

Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2024), Uzhhorod, Ukraine.

16. **Макар, Т. Р.,** Галій, П. В., & Дзюба, В. І. (2025, 5 лютого). Електронні спектри та ефективні маси носіїв заряду поверхонь сколювання (100) In_4Se_3 за результатами УФЕСКР [Усна доповідь]. Звітна наукова конференція університету за 2024 рік, Львів, Україна, 143.

8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати

Наукове значення виконаного дослідження полягає в отриманні нових знань про електронні та структурні властивості поверхонь сколювання кристалічних халькогенідів індію (In_4Se_3, InTe) та механізми формування наносистем індію на цих поверхнях. Вперше встановлено закономірності самоорганізації нульвимірних (0D) та одномірних (1D) індієвих наносистем і наноструктур з використанням природних наноструктурованих матриць, що відкриває нові перспективи для розробки приладів функціональної наноелектроніки на основі халькогенідних напівпровідників.

Запропоновані підходи до формування наноструктур через процеси вторинного твердотільного змочування та контрольованого іонного розпилення створюють підґрунтя для подальших досліджень в галузях фізики поверхні, нанофізики, матеріалознавства та прикладної фізики.

Отримані результати розширюють теоретичну базу щодо росту наноструктур в умовах термічно активованого режиму, зокрема за механізмом Фольмера-Вебера, та мають значення для вивчення низьковимірних явищ у 2D-матеріалах.

Результати виконаного дослідження також можуть бути використані у навчальних курсах для підготовки фахівців спеціальностей 176 «Мікро- та наносистемна техніка» та 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» зокрема, при вивченні дисциплін «Наноінженерія та електронна спектроскопія поверхні», «Наносистеми та нанотехнології», «Технології мікро- і наноелектроніки», а також у спеціальних курсах, присвячених інженерії функціональних наносистем.

9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі, де вони можуть бути застосовані

Практична цінність результатів дослідження полягає у встановленні механізмів формування індієвих наноструктур на поверхнях сколювання

халькогенідних кристалів In_4Se_3 та InTe, що дозволяє розглядати ці матеріали як перспективні матриці для створення стабільних наносистем і відкриває перспективи використання цих систем у виробництві нанорозмірних електронних компонентів. Зокрема, результати можуть бути застосовані при розробці польових транзисторів та напівпровідникових приладів на бар'єрі Шотткі, де важливою є стабільна й керована морфологія контакту метал-напівпровідник. Також ці матеріали є перспективними для створення сенсорних елементів і фотонних пристроїв.

Таким чином, одержані результати мають важливе значення для розвитку прикладних напрямів мікро- та наноелектроніки, відкриваючи нові можливості в інженерії функціональних наносистем.

10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам МОН України.

Дисертацію заслухано та обговорено на фаховому семінарі кафедри сенсорної та напівпровідникової електроніки Львівського національного університету імені Івана Франка (протокол № 9/25 від 19 травня 2025 р).

У ході обговорення дисертації суттєвих зауважень, які стосуються суті роботи, не було висунуто.

В цілому дисертаційна робота Макара Тараса Романовича «Електронні та структурні властивості поверхонь кристалічних халькогенідів індію» є завершеною науковою працею в межах поставлених завдань, у якій розв’язана наукова проблема щодо встановлення закономірностей формування наноструктур та наносистем на основі халькогенідних шаруватих матеріалів використаних в якості природного шаблону.

Основні результати наукового дослідження відображено у 5 наукових статтях, опублікованих у фахових виданнях України та закордонних наукових виданнях, що проіндексовані у наукометричних базах Scopus та/або Web of Science.

На основі вищесказаного можна зробити такі висновки щодо поданої дисертаційної роботи:

1. За актуальністю обраної теми, обсягом, достовірністю та рівнем апробації отриманих результатів, науковою новизною, обґрунтованістю висновків, практичною цінністю дисертаційна робота «Електронні та структурні властивості поверхонь кристалічних халькогенідів індію» відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та п. 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу

вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року №44 (із змінами).

2. Дисертація відповідає спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали (галузь знань 10 «Природничі науки»).

3. Наукові праці Макара Т.Р., опубліковані за результатами дисертаційної роботи, за кількістю та якістю відповідають п.п. 8-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (із змінами).

4. Дисертація «Електронні та структурні властивості поверхонь кристалічних халькогенідів індію» Макара Тараса Романовича рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

Головуючий на засіданні фахового семінару,
завідувач кафедри сенсорної та напівпровідникової
електроніки ЛНУ імені Івана Франка,
д-р фіз.-мат. наук, доцент Андрій ЛУЧЕЧКО

«19» травня 2025 року

Підпис доц. Андрія ЛУЧЕЧКА засвідчую.

Вчений секретар
Львівського національного
університету імені Івана Франка,
доцент Ольга ГРАБОВЕЦЬКА