# АНОТАЦІЯ

*Макар Т.Р.* Електронні та структурні властивості поверхонь кристалічних халькогенідів індію. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» (10 - Природничі науки). – Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, 2025.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню придатності використання поверхонь сколювання (100) $In_4Se_3$ та (001) InTe для формування наносистем $In^0$/(100) $In_4Se_3$, $In^0$/(001) InTe на основі халькогенідних напівпровідників з природними наноструктурованими матрицями та вивченню механізмів формування індієвих наноструктур на їх поверхнях.

Халькогенідні шаруваті напівпровідники такі як $In_4Se_3$ та InTe належать до класу матеріалів, які можуть відкрити перспективи для електроніки нового покоління. 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.

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.

Проведено дослідження електронної структури та елементно-фазового складу поверхонь сколювання кристалів (100) $In_4Se_3$ та (001) InTe методами ультрафіолетової та Х-променевої фотоелектронної спектроскопій (УФЕС і ХФЕС), а також методом моделювання в рамках теорії функціонала густини з використанням узагальненого градієнтного наближення (DFT-GGA). Увага приділена впливу обробки поверхонь іонним розпиленням та подальших змін, що виникають під час зберігання зразків навіть у надвисокому вакуумі (НВВ).

У рамках дослідження було проведено розрахунок електронно-енергетичної структури кристалу $In_4Se_3$, виходячи зі структурної інформації, методом функціонала електронної густини з узагальненим градієнтним наближенням (DFT-GGA) із застосуванням функціонала обміну-кореляції Пердью-Берка-Енцергофа. Одержані результати, дозволили з'ясувати які енергетичні стани і яких атомів визначають електронні властивості поверхні сколювання (100) $In_4Se_3$ і дають основний внесок в адсорбційні електронні процеси й формування інтерфейсного покриття. Згідно цих результатів зона провідності $In_4Se_3$ формується переважно In-p- та Se-p-орбіталями, збільшим внеском In-p, а валентна зона в діапазоні енергій зв'язку від -2,5 до -4,5 еВ формується переважно In-5p та Se-4p станами, з більшим внеском Se-p-орбіталі.

Встановлено, що УФЕС-спектри для поверхонь сколу (100) кристалів $In_4Se_3$, очищених іонним бомбардування $Ar^+$, суттєво відрізняються від спектрів атомарно чистих поверхонь. Іонне розпилення призводить до збагачення поверхні атомами індію, що викликає зміщення рівня Фермі, зміну роботи виходу, а також модифікацію густини електронних станів валентної зони. Продемонстровано, що повна густина станів $In_4Se_3$ розрахована методом DFT-GGA в цілому співпадає з УФЕС спектром для атомарно чистої поверхні. Тому вивчення зонної структури поверхні сколу (100) $In_4Se_3$ після іонного розпилення чи перебування у НВВ більше, ніж декілька годин, слід вважати неінформативним, і таких впливів на зразок слід уникати.

Експериментальні дослідження дисперсії $E(k_{//})$ на поверхні сколу (100) $In_4Se_3$ вздовж напрямків <001> та <010> показали анізотропію електронних

властивостей. Розраховано ефективні маси електронів поблизу $\bar{\Gamma}$ точки, що становлять 1,62$m_e$ та 0,43$m_e$ відповідно для напрямків $\bar{\Gamma}$–$\bar{X}$ та $\bar{\Gamma}$–$\bar{Y}$.

Х-променева фотоелектронна спектроскопія поверхонь сколювання (001) кристалів InTe виявила наявність значної кількості забруднюючих компонентів, зокрема вуглецю та кисню для кристалів сколених *ex situ*. Виявлено появу фази $TeO_2$ на неочищеній поверхні. Досліджено ефективність методів очищення поверхні: термічна обробка при 400 °C протягом десяти хвилин забезпечує десорбцію кисню та зникнення окисної фази телуру, але не усуває вуглецеві забруднення. Ефективне очищення досягається лише за умов іонного розпилення, що, однак, супроводжується зміною стехіометрії поверхні сколювання внаслідок різних коефіцієнтів розпилення основних компонент In і Te.

Досліджено процеси самоорганізації індієвих наносистем на поверхнях сколювання (100) $In_4Se_3$ та (001) InTe, що використовувались в якості шаблонів для формування нульвимірних (0D) і лінійних одномірних (1D) наноструктур. Запропоновано та експериментально реалізовано два підходи для формування наносистем $In^0$/(100) $In_4Se_3$ та $In^0$/(001) InTe, які базуються на процесах вторинного твердотільного змочування та цілеспрямованої зміни поверхневої стехіометрії іонним розпиленням.

Вперше отримано 0D наносистему $In^0$/(001) InTe на поверхні сколювання (001) шаруватого кристалу InTe за допомогою термічно активованого процесу вторинного твердотільного змочування. Встановлено, що форма та просторове розташування сформованих наноструктур визначається симетрією поверхневої ґратки InTe.

Аналіз спектрів густини електронних станів на поверхні наносистеми $In^0$/(001)InTe отриманих методом СТС показує 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. Значення величини забороненої зони InTe, визначене методом СТС рівне 1,16 еВ.

Запропоновано новий підхід для формування лінійних 1D наносистем $In^0$/(100) $In_4Se_3$ зміною стехіометрії поверхні сколювання (100) $In_4Se_3$ іонним розпиленням. Встановлено, що відмінність у коефіцієнтах розпилення атомів In і Se призводить до накопичення індію на поверхні з подальшим фазовим переходом та формуванням фази металічного індію $In^0$ на поверхні (100) $In_4Se_3$. Запропонована технологія не потребує попередньої модифікації підкладки чи нанесення провідного шару і дозволяє отримати лінійні індієві наноструктури з чітко визначеними параметрами: напрямом, поперечним перерізом, періодом і довжиною.

Проведено дослідження кінетики росту індієвих наноструктур на поверхнях сколювання шаруватих кристалів $A^3B^6$, зокрема (001) InTe та (100) $In_4Se_3$. Результати аналізу параметрів шорсткості поверхні: середньоквадратичної шорсткості (RMS), асиметрії (skewness) та ексцесу (kurtosis), вказують на подібність кінетичних закономірностей формування наноструктур на поверхнях сколювання цих шаруватих кристалів. Показано, що характер і механізми росту металевих наноструктур індію визначаються послідовністю експериментальних процедур, а саме: нанесенням індію, нагрівання нанесеного шару та кількістю нанесеного матеріалу на поверхню.

З’ясовано, що для поверхні сколювання (001) InTe зростання параметра середньоквадратичної шорсткості та зміни у PSD-спектрах, під час термообробки нанесеного шару індію, зумовлені активацією процесу вторинного твердотільного змочування та формуванням наноструктур за термічно активованим механізмом Фольмера-Вебера. Для поверхні сколювання (100) $In_4Se_3$ в експериментальній процедурі «послідовне нанесення індію – відпал ($T$>200 °C)» при низьких ступенях покриття спостерігається пошаровий ріст із середньою товщиною в один атомний шар. Активація процесу вторинного твердотільного змочування активізує ріст острівцевих наноструктур із середньою висотою до 2-х атомних шарів індію вище «базового» рівня навколишньої поверхні згідно механізму Фольмера-Вебера.

Досягнуто формування лінійних 1D-індієвих наносистем на поверхні (100) $In_4Se_3$, які орієнтуються борознистою поверхнею підкладки. Такий ріст відбувається за умов термічно активованого режиму росту Фольмера-Вебера, у експериментальних процедурах «послідовне нанесення індію – відпал ($T$>200 °C)» та «багаторазове нанесення – відпал ($T$>200 °C)». Однак з точки зору порівняння параметрів шорсткості поверхні перший потік експериментальних процедур вирізняється значно меншими значеннями невпорядкованості поверхонь за висотою за даними RMS, асиметрією та ексцесом.

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.

**Ключові слова:** шаруваті кристали, халькогеніди індію, наноструктури, наносистеми, скануюча тунельна мікроскопія та спектроскопія, X-променева фотоелектронна спектроскопія, ультрафіолетова фотоелектронна спектроскопія та спектроскопія з кутовим розділенням, теорія функціонала густини, вторинне твердотільне змочування, самоорганізація наноструктур.

## ABSTRACT

*Makar T.R.* Electronic and structural properties of surfaces of crystalline indium chalcogenides – Manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy degree, specialty 105 "Applied Physics and Nanomaterials" (10 - Natural Sciences). – Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, 2025.

This work is devoted to the investigation of the suitability of the cleaved surfaces (100) $In_4Se_3$ and (001) InTe for the formation of nanosystems $In^0$/(100) $In_4Se_3$ and $In^0$/(001) InTe based on chalcogenide semiconductors with natural nanostructured matrices, and to the study of the mechanisms of indium nanostructure formation on their surfaces.

Chalcogenide layered semiconductors such as $In_4Se_3$ and InTe belong to a class of materials that hold promise for next-generation electronics. These compounds crystallize in layered structures, where individual layer packets exhibit a high degree of independence. This leads not only to the anisotropy of the electronic spectra and various physical properties of their surfaces, but also to specific surface features – such as the grooved, chain-like structures observed on the (100) surface of $In_4Se_3$. The stability of interlayer cleavage surfaces and the potential use of grooved anisotropic cleavages as templates for the formation of surface nanowires and nanostructures also attract considerable interest. Addressing these challenges requires a thorough investigation of the surface structure of layered crystals, their electronic properties, and control over interfacial interactions, including the potential formation of interfaces.

Thus, in the context of further development of nanoscale electronic devices, it is essential to explore the possibilities of forming spatially ordered arrays of metallic nanostructures on these surfaces, as well as to develop and test new technologies for the fabrication of nanostructures and nanoheterostructures based on them.

The electronic structure and elemental-phase composition of the cleaved surfaces of (100) $In_4Se_3$ and (001) InTe crystals were investigated using ultraviolet and X-ray photoelectron spectroscopy (UPS and XPS), as well as density functional theory (DFT-GGA). Special attention was paid to the influence of ion sputtering and

subsequent changes during storage of the samples, even under ultra-high vacuum (UHV) conditions.

As part of the study, the electronic band structure of the $In_4Se_3$ crystal was calculated based on structural information using the density functional theory (DFT) within the generalized gradient approximation (GGA), employing the Perdew–Burke–Ernzerhof (PBE) exchange-correlation functional. The obtained results made it possible to determine which atomic states contribute most significantly to the electronic properties of the (100) cleavage surface of $In_4Se_3$ and play a key role in adsorption-related electronic processes and interface formation. According to these findings, the conduction band of $In_4Se_3$ is mainly formed by In-p and Se-p orbitals, with a predominant contribution from In-p. The valence band, in the binding energy range from –2.5 to –4.5 eV, is primarily composed of In-5p and Se-4p states, with a stronger contribution from Se-p orbitals.

It was established that the UPS spectra of (100) $In_4Se_3$ surfaces cleaned by $Ar^+$ ion bombardment significantly differ from the spectra of atomically clean cleaved surfaces. Ion sputtering leads to surface enrichment with indium atoms, resulting in a shift of the Fermi level, change in work function, and modification of the valence band density of states. It was shown that the total density of states of $In_4Se_3$ calculated using DFT-GGA generally corresponds to the UPS spectrum of the atomically clean surface. Therefore, studying the band structure of the (100) $In_4Se_3$ surface after ion bombardment or prolonged UHV exposure is uninformative and should be avoided.

Experimental studies of the $E(k_{//})$ dispersion on the (100) $In_4Se_3$ cleavage surface along the <001> and <010> directions revealed anisotropy in electronic properties. The effective electron masses near the $\bar{\Gamma}$ point were calculated to be $1.62m_e$ and $0.43m_e$ for the $\bar{\Gamma}$–$\bar{X}$ and $\bar{\Gamma}$–$\bar{Y}$ directions, respectively.

XPS studies of the (001) InTe cleavage surface revealed a significant presence of contaminants, particularly carbon and oxygen, for *ex situ* cleaved crystals. The $TeO_2$ oxide phase was detected on uncleaned surfaces. The efficiency of surface cleaning methods was investigated: thermal treatment at 400 °C for ten minutes enabled oxygen desorption and the disappearance of the oxide phase, but did not eliminate carbon

contamination. Effective cleaning was achieved only under ion sputtering, which however altered the surface stoichiometry due to different sputtering rates of In and Te.

The self-organization processes of indium nanosystems on the cleaved surfaces of (100) $In_4Se_3$ and (001) InTe were studied, which served as templates for the formation of 0D and linear 1D nanostructures. Two approaches for forming nanosystems $In^0$/(100) $In_4Se_3$ and $In^0$/(001) InTe were proposed and experimentally implemented, based on solid-state dewetting and intentional changes in surface stoichiometry via ion sputtering.

For the first time, a 0D nanosystem $In^0$/(001) InTe was obtained on the cleaved surface of the layered (001) InTe crystal using a thermally activated solid-state dewetting process. It was found that the shape and spatial arrangement of the resulting nanostructures are determined by the surface lattice symmetry of InTe.

Analysis of the density of states spectra of the $In^0$/(001) InTe nanosystem surface obtained by STS showed a correlation between the solid-state dewetting process and the increase in the density of states in the bandgap of InTe, corresponding to the metallic $In^0$ phase, with increased indium coverage. The bandgap of InTe, determined by STS, was 1.16 eV.

A new approach for forming linear 1D nanosystems $In^0$/(100) $In_4Se_3$ was implemented by modifying the surface stoichiometry of the (100) $In_4Se_3$ cleavage plane via ion sputtering. It was found that differences in the sputtering rates of In and Se atoms led to indium accumulation on the surface, followed by a phase transition and the formation of metallic $In^0$. The proposed technique does not require pre-modification of the substrate or deposition of a conductive layer and enables the formation of indium nanostructures with clearly defined direction, cross-section, spacing, and length.

The kinetics of indium nanostructure growth on the cleaved surfaces of layered $A^3B^6$ crystals, particularly (001) InTe and (100) $In_4Se_3$, were investigated. Surface roughness parameters (RMS), skewness, and kurtosis analysis indicated similar growth behavior on both surfaces. The growth mechanisms of metallic indium nanostructures

were shown to depend on the experimental sequence: indium deposition, heating, and the amount of material.

For the (001) InTe surface, increases in RMS and PSD spectrum changes during thermal treatment of the deposited indium layer were associated with the activation of solid-state dewetting and nanostructure formation via a thermally activated Volmer–Weber mode. For (100) $In_4Se_3$, under the "sequential deposition–annealing ($T$>200 °C)" procedure at low coverage, layer-by-layer growth was observed with an average thickness of one atomic layer. Activation of dewetting initiated island growth of indium nanostructures with an average height of two atomic layers above the base surface.

Formation of linear 1D indium nanosystems was achieved on the (100) $In_4Se_3$ surface, oriented by the grooved substrate pattern. Such growth followed a thermally activated Volmer–Weber mode under "sequential deposition – annealing ($T$>200 °C)" and "multiple deposition – final annealing ($T$>200 °C)" procedures. However, the former showed significantly lower surface roughness and disorder based on RMS, skewness, and kurtosis.

The practical significance of the research results lies in the identification of the mechanisms of indium nanostructure formation on the cleavage surfaces of chalcogenide crystals $In_4Se_3$ and InTe. This enables considering these materials as promising templates for the creation of stable nanosystems and opens up prospects for their application in the production of nanoscale electronic components. In particular, the results can be applied in the development of field-effect transistors and semiconductor devices based on Schottky barriers, where stable and controllable metal–semiconductor contact morphology is essential. These materials are also promising candidates for the development of sensor elements and photonic devices.
Thus, the obtained results are of considerable importance for the advancement of applied research in micro- and nanoelectronics, offering new opportunities in the engineering of functional nanosystems.

**Keywords:** layered crystals, indium chalcogenides, nanostructures, nanosystems, scanning tunneling microscopy and spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, ultraviolet photoelectron spectroscopy and angle-resolved spectroscopy, density functional theory, solid-state dewetting, self-assembly of nanostructures.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

***Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові 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

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

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

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

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

***Патенти, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

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 $In_4Se_3$* (Патент на корисну модель № 155721). Україна. Заявл. 25.05.2023; опубл. 03.04.2024, Бюл. № 14.

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

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 $In^0$/InTe nanosystems. XVIII International Freik Conference on Physics and technology of Thin Films and Nanosystems, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 121. [*Дистанційна участь, стендова доповідь*]

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

9. **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. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція з економіки, інформаційних систем і технологій, психології та педагогіки «Світ наукових досліджень», Тернопіль, Україна, 65–71. [*Заочна участь, публікація тез*]

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. [*Дистанційна участь, стендова доповідь*]

11. 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. 82nd Annual Physical Electronics Conference, Loyola University Chicago, Lakeshore Campus, Chicago, IL, USA, 55. [*Дистанційна участь, стендова доповідь*]

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. [*Очна участь, стендова доповідь*]

13. 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. Ukrainian Conference with International Participation "Chemistry, Physics and Technology of Surface", Kyiv, Ukraine, 60. [*Дистанційна участь, стендова доповідь*]

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) $In_4Se_3$ surface in the spectra of scanning tunneling spectroscopy (STS). Міжнародна мультидисциплінарна наукова інтернет-конференція «Світ наукових досліджень», Тернопіль, Україна – Переворськ, Польща, 257–263. http://www.economy-confer.com.ua/full-article/4370 [*Заочна участь, публікація тез*]

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 $A^3B^6$ layered template. 11th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2023), Bukovel, Ukraine, 376. [*Очна участь, стендова доповідь*]

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) $In_4Se_3$ cleavage surfaces on their electronic energy structure. Ukrainian Conference with International Participation "Chemistry, Physics and Technology of Surface", Kyiv, Ukraine, 49. [*Дистанційна участь, стендова доповідь*]

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 $A^3B^6$ layered templates. E-MRS 2023 Fall Meeting, Warsaw, Poland. [*Дистанційна участь, стендова доповідь*]

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

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

20. **Макар, Т. Р.**, Галій, П. В., Ненчук, Н. М., & Дзюба, В. І. (2024, 20–21 червня). Дослідження ефективних мас носіїв заряду в $In_4Se_3$методом фотоелектронної спектроскопії з кутовим розділенням. Міжнародна мультидисциплінарна наукова інтернет-конференція «Світ наукових досліджень», Тернопіль, Україна – Ополе, Польща, 133–137. https://www.economy-confer.com.ua/full-article/5630/ [*Заочна участь, публікація тез*]

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 $A^3B^6$ layered templates. 12th International Conference

"Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2024), Uzhhorod, Ukraine. [*Очна участь, стендова доповідь*]

22. **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. Звітна наукова конференція університету за 2024 рік, Львів, Україна, 143. [*Очна участь, усна доповідь*]