Голові разової спеціалізованої
вченої ради **ДФ 35.051.261**
Львівського національного університету
імені Івана Франка
д. ф.-м. н., проф. Степану МУДРОМУ

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук,
старшого наукового співробітника, завідувача відділу фізики та хімії
наносистем Інституту хімії поверхні імені О.О. Чуйка НАН України
Семчука Олександра Юрійовича
на дисертаційну роботу **Макара Тараса Романовича** на тему:
"Електронні та структурні властивості поверхонь кристалічних халькогенідів індію", подану до захисту на здобуття ступеня доктора філософії
у галузі знань 10 "Природничі науки"
за спеціальністю 105 "Прикладна фізика та наноматеріали"

Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасна 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-підкладках 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 інші параметри наноструктур. Необхідні знання щодо стабільності одержуваних поверхонь- підкладок, для одержуваних на них низьковимірних нанообєктів як і самих наноструктур. Вирішення вказаних завдань дає можливість розробляти нове покоління високоефективних нанопристроїв – нанодіодів, нано-фото 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, яких 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. 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 (НВВ) (10^{-9}-10^{-10} Тор) та досліджених адекватними та взаємодоповнюючими методами: ДПЕ, ХФЕС, УФЕСКР, СТМ/СТС, а також з використанням методу Х-променевого структурного та фазового аналізу та методів теоретичних досліджень (теорія функціонала густини).

Актуальність теми дисертаційної роботи також підкреслює одержаний автором Патент України, що процитований у дисертаційній роботі на стор. 148. 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.

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

Потрібно відмітити, що дисертаційна робота Макара Т.Р. виконувалась згідно з 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.)

Структура та зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота Тараса Романовича є завершеним науковим дослідженням. Вона містить анотації українською та англійською мовами, вступ, п’ять розділів з результатами та висновками, загальні висновки, список літератури і додаток. Загальний обсяг роботи становить 147 сторінок, 64 рисунки, 8 таблиць, список літератури з 119 посилань.

Зміст анотації є достатньо інформативним та відповідає основним завданням дисертаційної роботи, де вказано, що 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 сколювання.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовані основні завдання та мета проведених досліджень, вказано наукову новизну та практичне значення одержаних експериментальних та модельних результатів, показано особистий внесок здобувача, апробацію результатів досліджень та кількість публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** наведено огляд літератури за темою дисертаційної роботи, зокрема структурні та електронно-енергетичні особливості шаруватих кристалів InTe та In_4Se_3. Напівпровідникові шаруваті кристали на основі халькогенідних сполук належать до квазідвовимірних матеріалів (2D), особливості електронних властивостей яких визначаються їх кристалічною будовою, зокрема, електронними взаємодіями в окремому шарі-пакеті як квазінезалежній структурній одиниці.

У результаті проведеного огляду літератури встановлено, що шаруваті (2D) кристали InTe та In_4Se_3 демонструють значний потенціал для використання в різних галузях функціональної електроніки. Завдяки своїм унікальним електронним та структурним властивостям, ці матеріали виявляються перспективними в якості елементів фото- чи оптоелектроніки, так і термоелектрики. Зокрема, для In_4Se_3 характерна висока термоелектрична ефективність, обумовлена низькою теплопровідністю та хорошою електропровідністю. InTe, у свою чергу, проявляє хороші фотоелектричні властивості, що робить його придатним для застосування у фотодетекторах чи сонячних елементах.

Попри зростаючий інтерес до InTe та In_4Se_3 як функціональних матеріалів, в літературі бракує експериментальних даних щодо можливості використання

поверхонь сколу напівпровідників (100) In_4Se_3 та (001) InTe в якості природніх шаблонів для створення низькорозмірних наногетеросистем, зокрема отриманих у надвисокому вакуумі методами вторинного твердотільного змочування або зміною стехіометрії поверхні сколювання та досліджених методами зондової мікроскопії *in situ*. Все ще недостатньо вивчено кінетику формування архітектури поверхні під час нанесення індію на шаблони з шаруватих халькогенідних кристалів A^3B^6, таких як InTe та In_4Se_3, із використанням аналізу параметрів шорсткості поверхні та їх елементно-фазового складу. Отримані в огляді знання були використані для формулювання завдань та рекомендацій щодо формування метал-напівпровідникових наносистем для класу 2D-матеріалів.

У **другому розділі** описані об'єкти та експериментальні методики досліджень**.** Шаруваті кристали є класом матеріалів, у яких атоми у шарах-пакетах міцно зв'язані ковалентними, або іонно- ковалентними зв'язками, тоді як взаємодія між шарами-пакетами здійснюється за рахунок слабких Ван дер Ваальсових сил. Це надає їм унікальні фізико-хімічні властивості, серед яких анізотропія електронних, явищ переносу носіїв заряду та теплопровідності, можливість механічного розшарування на тонкі плівки методом сколювання, навіть у надвисокому вакуумі. Кристали In_4Se_3 вирощувались методом Чохральського у відновлювальній атмосфері водню з розплав-розчину In_4Se_3 + 10 ат.% In. Синтез сполук для вирощування монокристалів In_4Se_3 здійснювали шляхом сплавлення компонентів у вакуумованих кварцових ампулах, відкачаних до тиску 5×10^{-2} Торр. Після вирощування для одержування якомога рівноважних плоских поверхонь сколювання вони проходили термообробку. Монокристали InTe вирощували методом Бріджмена. Синтез сполук для вирощування монокристалів InTe здійснювали шляхом сплавлення компонентів у вакуумованих кварцових ампулах при 1000 °C.

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. Серед яких – ДПЕ (дифракція повільних електронів) – для дослідження кристалографія поверхонь; ХФЕС (Х-променева фотоелектронна спектроскопія) – дослідження елементно-фазового склад поверхонь); ультрафіолетова фотоелектронна спектроскопія (УФЕС) та ультрафіолетова фотоелектронна спектроскопія з кутовим розділенням (УФЕСКР), відповідно, дослідження густини електронних станів та електронних спектрів поверхонь сколювання; методи тунельної зондової мікроскопії (СТМ/СТС вихідних поверхонь-підкладок та гетеронаноструктури In^0/(100) In_4Se_3, In^0/(001)InTe – кристалографія та електронно-енергетична структура *in situ*. Також

використані метод Х-променевого структурного та фазового аналізу та методи теоретичних досліджень (теорія функціонала густини).

У **третьому розділі** подані результати експериментальних досліджень поверхонь сколювання (100)In_4Se_3, (001)InTe методами електронної спектроскопії – ХФЕС, та УФЕС і УФЕСКР. ХФЕС дослідження поверхні (001) сколу кристала InTe виявили максимуми хімічних елементів In $3d_{5/2}$, Te $3d_{5/2}$, C 1s, O 1s, що є реперними для атомів In та Te. Кількісний елементний аналіз поверхонь показав, що на неочищеній поверхні концентрація адсорбованих забруднюючих компонент (в основному вуглецю і в меншій мірі кисню) навіть у надвисокому вакуумі (НВВ) (10^{-9}-10^{-10} Тор) є набагато більшою за концентрацію основних хімічних елементів поверхні (001) InTe. При цьому на такій поверхні виявлено появу окисної фази телуру – TeO_2.

Виявлено, що прогрів кристала InTe до температури 400 С протягом десяти хвилин не дає задовільних результатів в очищенні поверхні від вуглецю. Однак з поверхні спостерігається десорбція кисню, яка супроводжується зникненням фази TeO_2. Лише застосування іонного бомбардування призводить до усунення відносно великої кількості вуглецевої забруднюючої компоненти з поверхні, хоч і викликає зміну стехіометрії поверхні, так як коефіцієнти розпилення для Te та In істотно відрізняються.

Встановлено, що УФЕС-спектри для поверхонь сколу (100) In_4Se_3, очищених від інтерфейсних нашарувань іонами Ar^+, суттєво відрізняються від спектрів, отриманих для атомарно чистих поверхонь методом сколювання *in situ*. Внаслідок іонного розпилення поверхня сколу (100) збагачується атомами індію, що призводить до змін в УФЕС-спектрі густини електронних станів валентної зони.

Одержано електронні спектри $E(k_{//})$ поверхні сколювання (100)In_4Se_3 вздовж напрямку <001> In-ланцюжків та перпендикулярно до них – <010>, тобто в напрямках $\bar{\Gamma}$–$\bar{X}$ та $\bar{\Gamma}$–$\bar{Y}$. З експериментально одержаних дисперсій $E(k_{//})$ визначені в околі точки $\bar{\Gamma}(k=0)$, ефективні маси електронів становлять $1{,}62m_e$ та $0{,}43m_e$ вздовж напрямків $\bar{\Gamma}$–$\bar{X}$ та $\bar{\Gamma}$–$\bar{Y}$ відповідно.

Розраховано, методом функціоналу електронної густини з узагальненим градієнтним наближенням (DFT-GGA) із застосуванням функціонала обміну-кореляції Пердью-Берка-Енцергофа, виходячи зі структурної інформації та шаруватості кристалу, електронні спектри та густини електронних станів для In_4Se_3. Одержані результати, дозволили з'ясувати які енергетичні стани і яких атомів визначають електронні властивості ПС (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.

У **четвертому розділі** подані результати дослідження формування низьковимірних металевих наносистем**.** Досліджено процеси самоорганізації індієвих наносистем на поверхнях сколювання (100) In_4Se_3 та (001) InTe, які використовувалися як природні шаблони для формування 0D і 1D наноструктур. Автором використано два підходи для формування наноструктур та наносистем: термічно активоване вторинне змочування для отримання 0D наносистем на поверхні (001) InTe та асиметричне іонне розпилення для формування 1D структур на поверхні (100) In_4Se_3. Показано, що обидва методи забезпечують формування впорядкованих 0D та 1D наносистем відповідно до особливостей структури поверхні сколювання (підкладки).

Значним досягненням дисертанта є те, що встановлено, що для одержання наносистем In^0/(100)In_4Se_3 при розпиленні поверхні іонним пучком важливим є різниця у швидкості розпилення складових–компонент атомів In і Se зумовлене різними коефіцієнтами їх розпилення та масовими числами, що приводить до зміни стехіометрії поверхні у напрямку збільшення кількості атомів індію на поверхні (100) In_4Se_3 з подальшим фазовим переходом та формуванням фази металічного індію In^0 на поверхні (100) In_4Se_3.

Запропонована технологія отримання наносистем In^0/(100)In_4Se_3, захищена патентом України на корисну модель , (процитований у дисертаційній роботі на стор. 148), дає змогу одержання, без необхідності проведення попередніх процедур модифікації підкладки-шаблону та термічного нанесення відповідного провідного матеріалу, використовуючи для формування індієвих 1D-структур атоми In, які отримані з матриці підкладки в результаті несиметричного іонного травлення. Іонне травлення упродовж 20 хвилин з наступною термічною обробкою ($160°C$, 10 хвилин), призводить до формування упорядкованих лінійних провідних індієвих наноструктур з визначеними параметрами, такими як напрям, поперечний переріз, період розташування та довжина.

У **п'ятому розділі** подані результати дослідження кінетики росту індієвих наноструктур на поверхнях сколювання (001) InTe та (100) In_4Se_3. Проаналізовано параметри шорсткості поверхні, що вказують на спільні закономірності формування наносистем. З'ясовано моделі росту індієвих наноструктур на вказаних вище поверхнях (001) InTe та (100) In_4Se_3 Встановлено, що механізм росту наноструктур визначається послідовністю технологічних етапів, а ріст відбувається за термічно активованим механізмом Фольмера–Вебера з можливістю утворення впорядкованих нанооб'єктів, орієнтованих борознистим рельєфом підкладки.

Виходячи з експериментальних кінетик росту покриття індію на підкладці (100) In_4Se_3, зроблений однозначний висновок про те, що в процесі формування індієвого покриття на поверхні (100) In_4Se_3 кінетика параметрів поверхні явно відрізняється від модельної кінетики, характерної для пошарових режимів росту покриттів за механізмом Франка ван дер Мерве.

Дослідження кінетики архітектури поверхні (001) InTe при напилені індію проведено за допомогою інструменту аналізу шорсткості. Поведінка кінетики шорсткості та асиметрії лише частково вказує на механізм нанесення індію за моделлю Вольмера–Вебера, а не на пошаровий ріст, що описується моделями Франка ван дер Мерве чи Странскі–Крастанова.

Висновки як за розділами, так і загальні, відповідають змісту, поставленій меті та завданням дисертаційної роботи. Текст дисертаційної роботи викладений і оформлений у відповідності до вимог Наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (зі змінами від 31.05.2019 р. № 759)

Повнота викладу матеріалів у роботах, які опубліковані автором

Основні наукові результати дисертації Макара Т.Р. представлені у 22 публікаціях, зокрема 5 статтях у рецензованих журналах (3 — у виданнях, що індексуються в Scopus/Web of Science, та 2 — у фахових українських), 16 тезах доповідей на вітчизняних і міжнародних конференціях, а також у патенті України на корисну модель щодо одержання низьковимірних наносистем. Публікації повністю відображають зміст і основні результати дисертації.

Відсутність порушень академічної доброчесності

У дисертаційній роботі Макара Т.Р. «Електронні та структурні властивості поверхонь кристалічних халькогенідів індію», а також у наукових публікаціях здобувача за темою дисертації порушень академічної доброчесності *не виявлено*.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що вперше:

1. 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 систем 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.
2. 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.
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 залежність кінетики росту періодичності сформованих наноструктур на поверхні шаблону (001) InTe від ступеня покриття індієм з подальшим впливом процесу змочування.

5. 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. 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.

Практичне значення одержаних результатів

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-шаблони 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.

Таким чином, одержані результати мають важливе значення для розвитку напрямів мікро- та наноелектроніки, відкриваючи нові можливості в інженерії функціональних наносистем. Роблять вагомий внесок у розвиток прикладних напрямів матеріалознавства та нанотехнологій, а запропоновані підходи для одержання наносистем та наноструктур базуються на простих експериментальних процедурах та не потребують складної попередньої підготовки підкладки, що робить їх технологічно привабливими.

Зауваження до дисертації

1. У дисертаційній роботі наведено електронні спектри *E(k)* для поверхні сколювання (100) In_4Se_3, однак не описано шлях їх експериментального одержання. Варто зауважити, що для побудови таких дисперсійних залежностей необхідно експериментально отримати серію УФЕС-спектрів (інтенсивність емісії залежно від кінетичної енергії електронів) при різних кутах емісії фотоелектронів. Лише за таких умов можливо коректно реконструювати залежність енергії від квазіімпульсу $E(k_{//})$. Було б доцільно чітко зазначити, чи така методика вимірювань дійсно застосовувалась у роботі, а також яким програмним забезпеченням здійснювалась обробка та побудова дисперсійних спектрів. Крім того, для повноти аналізу електронної

структури доцільно було б провести вимірювання у напрямку, перпендикулярному до поверхні, з урахуванням компоненти імпульсу $k_{\perp}$. Це дозволило б реконструювати тривимірну залежність енергії електрона від його квазіімпульсу, і більш повно охарактеризувати зонну структуру In_4Se_3.

2. У дисертації недостатньо детально описано процедуру отримання топографії поверхонь сколювання та густини електронних станів на поверхнях чистих кристалічних підкладок і кристалічних підкладок з осадженими атомами індію. Окрім того, доцільно уточнити параметри процесу напилення індію: метод осадження, густину потоку атомів, тривалість напилення та умови (температура, тиск), що дозволило б оцінити відтворюваність і контрольованість формування наносистем.
3. У дисертаційній роботі не вказано в повній мірі, які саме програмні пакети були використані для обробки та візуалізації результатів скануючої тунельної мікроскопії та спектроскопії (СТМ/СТС). З огляду на важливість коректної інтерпретації просторових та енергетичних характеристик наносистем, доцільно було б зазначити конкретне програмне забезпечення, що застосовувалося для побудови топографічних зображень, спектрів локальної густини станів, а також для їх фільтрації чи числової обробки. Це сприяло б підвищенню відтворюваності результатів і прозорості застосованих методик.
4. У розділі, присвяченому аналізу результатів порошкової дифрактометрії, відсутня інформація щодо джерела теоретичних референсних (еталонних) дифракційних даних, які використовувалися для ідентифікації фаз (наприклад, бази даних PDF-2 (ICDD), COD тощо). Також не вказано, за допомогою якого програмного забезпечення проводився аналіз експериментальних дифрактограм та порівняння з теоретичними даними. Наявність цієї інформації є необхідною для забезпечення прозорості та відтворюваності аналізу фазового складу досліджуваних зразків.
5. У дисертаційній роботі в окремих місцях трапляються описки, граматичні та стилістичні неточності, які не впливають на загальну наукову цінність роботи, проте потребують уважнішого редагування для забезпечення мовної та стилістичної цілісності тексту.

Проте зазначені недоліки і побажання у жодному разі не впливають на високу оцінку дисертації Макара Т. Р., не знижують її наукової і практичної цінності. Висловлені побажання і зауваження спрямовані на активізацію подальшого наукового пошуку автора.

Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам.

Дисертація **Макара Тараса Романовича** на тему: ***«Електронні та структурні властивості поверхонь кристалічних халькогенідів індію»***, подана на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», є завершеним дослідженням у межах поставлених завдань. Основні результати достатньо повно викладені в опублікованих працях автора. У роботі та наукових публікаціях немає порушень академічної доброчесності, наукові результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно.

Вважаю, що за новизною та актуальністю обраної теми, обсягом, достовірністю та рівнем апробації отриманих результатів, обґрунтованістю висновків і практичною цінністю дисертаційна робота ***«Електронні та структурні властивості поверхонь кристалічних халькогенідів індію»*** відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені Постановою КМУ № 44 від 12 січня 2022 року «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (зі змінами, внесеними згідно з постановами КМУ № 341 від 21 березня 2022 р., № 502 від 19 травня 2023 р. та № 507 від 3 травня 2024 р.), а її автор **Макар Тарас Романович** заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент:
доктор фізико-математичних наук,
завідувач відділу фізики та хімії наносистем
Інституту хімії поверхні
імені О.О. Чуйка НАН України,
старший науковий співробітник **Олександр СЕМЧУК**