

## ВІДГУК

офіційного опонента

Чугая Олега Миколайовича

на дисертаційну роботу Хрипунової Ірини Василівни

«Термоелектричні і фоточутливі приладові структури на основі наноструктурованих шарів нелегованого і легovanого індієм оксиду цинку і їх нанокompозитів»,

яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали»

### **Актуальність теми**

В дисертації вирішується комплекс нагальних проблем фундаментального і прикладного характеру. Розроблено фізико-технологічні основи виготовлення гідрохімічними методами наноструктурованих плівкових шарів легovanого індієм і нелегованого оксиду цинку на твердих і гнучких підкладках та на поверхні тканин і створення їх композитів із наночастинками срібла і біополімером наноцелюлозою. Досліджено кристалічну структуру плівкових шарів ZnO і ZnO:In та нанокompозитів на їх основі методом рентген-дифрактометричного аналізу. Визначено морфологію поверхні і хімічний склад функціональних шарів приладових структур на основі ZnO і ZnO:In та їх нанокompозитів методами скануючої електронної мікроскопії в режимах вторинних і зворотно відбитих електронів та рентгенівського флуоресцентного мікроаналізу і енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії. Досліджено оптичні, електричні та термоелектричні властивості ZnO і ZnO:In і їх нанокompозитів. Визначено стійкість виготовлених гідрохімічними методами плівкових шарів ZnO і ZnO:In до впливу обробки водневою плазмою тліючого розряду, високих доз опромінення електронним пучком і опромінення жорстким ультрафіолетом. На основі виготовлених гідрохімічними методами плівок ZnO і ZnO:In створено ефективні гнучкі покриття для захисту від сонячного ультрафіолету в наземних умовах. Виготовлено стабільні в експлуатації та чутливі до ультрафіолетового опромінення супергідрофобні тканини з покриттям із наноструктурованих шарів ZnO:In. Розроблено приладові структури для гнучких широкополосних фотодетекторів фоторезистивного типу на основі

наноструктурованих шарів ZnO, ZnO:In та їх композитів із наночастинками срібла і біополімером наноцелюлозою. Проведено оцінку їх ампер-ватної чутливості, зовнішньої квантової ефективності і специфічної детективності в спектральній області від ультрафіолетового до видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів випромінення. Розроблено приладові структури для малопотужних гнучких термоелектричних елементів і модулів планарного типу на основі наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In, досліджено і оптимізовано їх вихідні параметри.

Тема дисертації пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт кафедри мікро- та наноелектроніки Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики НТУ «ХПІ». Основні результати дисертації було отримано під час виконання планової держбюджетної теми «Фізичні основи створення металевих матеріалів та напівпровідникових приладових структур для ядерної, термоядерної та позаатмосферної геліоенергетики» (номер державної реєстрації 0118U002049, строк виконання 01.01.2018 – 31.12.2020) і проекту конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених», який рекомендовано до реалізації за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України «Розробка експериментального зразка носимого тонкоплівкового термоелектричного генератора з наноструктурованими напівпровідниковими шарами p-CuI і n-ZnO на тканевій і полімерній гнучких основах» (номер державної реєстрації 0120U105127, строк виконання 02.11.20 – 15.12.21). У наведених вище науково-дослідних роботах авторка дисертації брала участь як виконавець.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій в дисертаційній роботі Хрипунової І.В. базується на інформованості про сучасний світовий рівень теоретичних знань і технічних розробок стосовно даної тематики, на комплексному підході до вивчення визначених об'єктів, а також на використанні новітніх експериментальних і аналітичних методів дослідження із застосуванням сучасної апаратури.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів експериментальних досліджень кристалічної структури і фізичних властивостей створених в роботі нових функціональних матеріалів, а саме наноструктурованих шарів нелегованого і легovanого індієм оксиду цинку і їх нанокомпозитів, підтверджується доповідями на міжнародних конференціях, публікаціями в зарубіжних журналах, що належать до 1 і 2 квартилів за пошуковою системою Scimago, а також експлуатаційними параметрами розроблених і виготовлених експериментальних зразків термоелектричних і фоточутливих приладових структур.

### **До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

1 Досліджено вплив обробки плазмою тліючого розряду  $H_2^+$  із великою щільністю потоку  $\sim 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$  на виготовлені методом SILAR шари оксиду цинку на підкладках FTO, показано незначне травлення переважно по краях пелюсткоподібних наноструктур ZnO без руйнування їх кристалічної структури. Після обробки плазмою тліючого розряду  $H_2^+$  відносний вміст Zn у нанесеній за допомогою SILAR плівці ZnO збільшується через її хімічну взаємодію з іонами водню, наслідком якої є створення кисневих вакансій Vo. Аналіз впливу плазми  $H_2^+$  на оптичні властивості ZnO виявив зниження прозорості та збільшення енергії Урбаха за рахунок виникнення дефектів Vo. В цілому дослідження впливу обробки плазмою тліючого розряду  $H_2^+$  вказують на високу стійкість отриманих методом SILAR шарів оксиду цинку до радіаційного та хімічного впливу плазми  $H_2^+$ .

2 Виявлено стійкість до опромінення електронами, дози якого перевищували умови довгострокових космічних застосувань, у нелегованих і легованих індієм наноструктурованих плівок оксиду цинку, що були осаджені методом SILAR на твердих скляних підкладках і на гнучких підкладках із поліетилентерефталату і полііміду. При густині електронного струму до  $5.7 \text{ А/м}^2$ , поглиненій дозі до  $2.6 \cdot 10^{10} \text{ Гр}$  і густині потоку до  $1.5 \cdot 10^{18} \text{ е/м}^2$  відбулося лише незначне травлення плівок ZnO і ZnO:In і невелике погіршення їх кристалічної структури радіаційним впливом, яке частково нівелювалося супутнім відпалом.

Разом з тим, високі дози електронного опромінення негативно вплинули на всі види використаних підкладок, призвівши до їх руйнування.

3 Дослідження впливу жорсткого ультрафіолетового світла УФС на виготовлені методом SILAR на скляних підкладках шари ZnO і ZnO:In показало, що їх кристалічна структура не зазнавала деградації. Оптичні дослідження показали, що після вакуумного відпалу при 200°C опромінених УФС зразків плівок ZnO і ZnO:In спостерігалось зменшення енергії Урбаха порівняно з неопроміненими зразками внаслідок зміни точкових дефектів. Дослідження впливу УФС на електричні властивості виготовлених методом SILAR наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In виявило збереження *n*-типу цих напівпровідників при збільшенні на порядок питомого опору і енергії активації електропровідності, що пояснюється змінами в природі точкових дефектів, зокрема скороченням кількості мілких донорів і створенням точкових дефектів з глибокими рівнями. Виявлено, що ці зміни дефектних станів можуть бути частково знівельованими шляхом вакуумного відпалу зразків при 200°C.

4 Доведено, що виготовлені гідрохімічними методами тонкі наноструктуровані плівки нелегованого та легovanого індієм оксиду цинку на гнучких дешевих поліетилентерефталатних підкладках є придатними для використання у якості гнучкого покриття для захисту від сонячного ультрафіолету в наземних умовах, оскільки відповідають категорії «відмінно» (50+) міжнародного стандарту ISO 2443:2012(E) «Визначення фотозахисту сонцезахисного покриття UVA *in vitro*». Найкращим виявився матеріал ZnO:In/PET із плівкою ZnO:In товщиною 0.1 мкм на підкладці PET товщиною 20 мкм.

5 Показано, що виготовлені гідрохімічними методами на поверхні поліестерової тканини наноструктуровані плівки ZnO:In після вакуумному відпалу при 200 °C мають супергідрофобну поверхню, про що свідчать характерні для стану змочування Кассі-Бакстера контактний кут 160° і гістерезис змочування 10°. Під впливом ультрафіолетового опромінювання цей супергідрофобний текстиль ZnO:In/Pe зворотно перетворюється на гідрофобний. Навіть після прання в ультразвуковій ванні супергідрофобний текстиль ZnO:In/Pe не втрачає своїх водовідштовхувальних властивостей.

6 Створено ефективні гнучкі фоточутливі приладові структури на основі наноструктурованих плівок легованого індієм оксиду цинку і тонкоплівкового нанокompозиту з наноцелюлозною матрицею та наповнювачем ZnO:In на поліімідних підкладках, який є перспективним для використання в новій конструкції біосумісного гнучкого широкосмугового фотодетектора. Показано, що наноцелюлозна матриця не тільки захищає функціональний напівпровідник ZnO:In від механічних пошкоджень і атмосферного впливу, але й покращує монохроматичну ампер-ватну чутливість  $R_\lambda$  і зовнішню квантову ефективність  $EQE$  фотодетектора. В діапазоні від ультрафіолету до видимого і ближнього інфрачервоного опромінення отримано  $R_\lambda$  від 2 до 0,1 А/Вт,  $EQE$  до 800 % при робочій напрузі 2 В. Специфічна детективність  $D^*$  приладових структур гнучких широкополосних фотодетекторів фоторезистивного типу ZnO:In/PI та NC/ZnO:In/PI на рівні  $10^{10}$ - $10^{12}$  Джонсів вказує на їх чутливість до слабкого освітлення.

7 Створено гнучкі фоточутливі приладові структури для фотодетекторів фоторезистивного типу з підвищеною ефективністю на основі виготовлених гідрохімічними методами на поліімідних підкладках наноструктурованих плівок оксиду цинку ZnO/PI і нанокompозиту із наночастинками срібла ZnO\_Ag/PI. Завдяки локалізованому поверхневому плазмонному резонансу та подвійним бар'єрам Шоттки на межі Ag-ZnO збільшено ультрафіолетову ампер-ватну чутливість  $R_\lambda$  до 275 А/Вт при робочій напрузі 2 В. В спектральній області від УФ до Vis-NIR дуже високими є зовнішня квантова ефективність  $EQE$  обох PD від  $1 \cdot 10^2$  % до  $9 \cdot 10^4$  % і специфічна детективність  $D^*$  від  $3.5 \cdot 10^{10}$  Джонсів до  $8.6 \cdot 10^{13}$  Джонсів, що вказує на придатність розроблених у цій роботі приладових структур фотодетекторів зі світлочутливими матеріалами ZnO/PI та ZnO\_Ag/PI для розпізнавання дуже слабких світлових сигналів.

8 Визначено етапи технологічного процесу, які забезпечують кращі термоелектричні властивості наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In на поліімідних підкладках: очищення поліімідних підкладок в ультразвуковій ванні, нанесення зародкових шарів ZnO гідрохімічним методом занурення у розчин, осадження плівок ZnO або ZnO:In методом SILAR, відпал у вакуумі при 300°C.

9 Показано, що необхідне для створення ефективних термоелектричних матеріалів зниження електричного опору досягається шляхом утворення компактних наноструктурованих шарів ZnO і ZnO:In на поліімідних підкладках, а також внаслідок вакуумного відпалу при 300°C за рахунок десорбції з поверхні кисню і створення додаткових кисневих вакансій та інших мілких донорних дефектних рівнів в кристалічній структурі ZnO і ZnO:In.

10 Створено гнучкі тонкоплівкові термоелектричні елементи планарного типу на основі смужок із відпалених у вакуумі при 300°C наноструктурованих шарів ZnO і ZnO:In на поліімідних підкладках і досліджено їх вихідні параметри. Виготовлено функціональну приладову структуру гнучкого тонкоплівкового термоелектричного модуля планарного типу, в якому чотири смужкові ТЕ елементи n-типу провідності на основі наноструктурованого шару ZnO на поліімідній підкладці поєднано електрично за допомогою тонкоплівкових срібних контактів із елементами p-типу провідності у вигляді тонких дротів із металу хромель. Досліджено вихідні термоелектричні параметри приладової структури гнучкого ТЕ модуля і показано переваги використання в ньому тонкоплівкових термопар із ТЕ елементами n-типу ZnO/PI і хромелевими ТЕ елементами p-типу.

11 Завдяки застосуванню оптимізованих гідрохімічних методів виготовлення наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In на поліімідних підкладках, а також через збільшення усередненої товщини напівпровідникових плівок ZnO і ZnO:In збільшено до восьми разів коефіцієнти термоелектричної потужності цих матеріалів.

12 Виготовлено тонкоплівкові алюмінієві омичні контакти до гнучких термоелектричних елементів планарного типу на основі наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In на поліімідних підкладках, які одночасно із застосуванням оптимізованих гідрохімічних методів виготовлення наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In забезпечили вихідні термоелектричні параметри ТЕ елементів, які не поступаються вихідним параметрам сучасних мініатюрних та гнучких термоелектричних приладів.

**Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

**Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Розроблено гідрохімічні методи виготовлення наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In із високою стійкістю до впливу обробки водневою плазмою тліючого розряду, високих доз опромінення електронним пучком і жорсткого ультрафіолетового опромінення.

2. Визначено етапи технологічного процесу, які забезпечують оптимальні термоелектричні властивості наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In на поліїмідних підкладках: очищення поліїмідних підкладок в ультразвуковій ванні, нанесення зародкових шарів ZnO гідрохімічним методом занурення у розчин, осадження плівок ZnO або ZnO:In методом послідовної адсорбції і реакції іонних шарів SILAR, відпал у вакуумі при 300°C.

3. Досліджено вплив обробок жорстким ультрафіолетовим опроміненням, водневою плазмою тліючого розряду, високими дозами опромінення електронним пучком та відпалами у вакуумі на точкові дефекти і їх комплекси в кристалічній решітці виготовлених гідрохімічними методами наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In.

4. Показано, що виготовлені гідрохімічними методами на поверхні поліестерової тканини наноструктуровані плівки ZnO:In після вакуумного відпалу при 200 °C мають супергідрофобну поверхню, про що свідчать характерні для стану змочування Кассі-Бакстера контактний кут 160° і гістерезис змочування 10°. Під впливом ультрафіолетового опромінювання цей супергідрофобний текстиль зворотно перетворюється на гідрофобний.

5. Досліджено вплив вакансій кисню  $V_O$ , які виникають внаслідок вакуумних відпалів в наноструктурах ZnO і ZnO:In, на фоточутливість до світла ультрафіолетового, видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів.

6. Досліджено вплив локалізованого поверхневого плазмонного резонансу та подвійних бар'єрів Шотткі на межі Ag-ZnO на фоточутливість виготовлених гідрохімічними методами гнучких приладових структур для фотодетекторів фоторезистивного типу відносно світла ультрафіолетового, видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів.

**Практичне значення отриманих результатів**

1. Створено гнучкі покриття для захисту від сонячного ультрафіолету в наземних умовах на основі виготовлених гідрохімічними методами тонких наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In на гнучких дешевих поліетилентерефталатних підкладках, які відповідають категорії «відмінно» (50+) міжнародного стандарту ISO 2443:2012(E) «Визначення фотозахисту сонцезахисного покриття UVA in vitro».

2. Виготовлено стабільний в експлуатації супергідрофобний текстиль на основі поліестерової тканини з покриттям із наноструктурованих шарів ZnO:In, який не втрачає своїх водовідштовхувальних властивостей після прання та/або опромінення ультрафіолетом у складі сонячного світла.

3. Створено ефективні гнучкі фоточутливі приладові структури на основі наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In на поліімідних підкладках, а також на основі тонкоплівкового нанокомпозиту з наноцелюлозною матрицею та наповнювачем ZnO:In, що є перспективним для використання в новій конструкції біосумісного гнучкого широкопалосного фотодетектора, в якому наноцелюлозна матриця не тільки захищає функціональний напівпровідник ZnO:In від механічних пошкоджень і атмосферного впливу, але також підвищує монохроматичну ампер-ватну чутливість, зовнішню квантову ефективність і специфічну детективність гнучкого широкопалосного фотодетектора фоторезистивного типу до рівня кращих сучасних зразків.

4. Створено гнучкі фоточутливі приладові структури для фотодетекторів фоторезистивного типу із підвищеною ефективністю на основі виготовлених гідрохімічними методами на поліімідних підкладках наноструктурованих плівок оксиду цинку ZnO/PI і нанокомпозиту із наночастинками срібла ZnO\_Ag/PI, в якому завдяки локалізованому поверхневому плазмонному резонансу та подвійним бар'єрам Шотткі на межі Ag-ZnO збільшено до рівня кращих сучасних зразків гнучких широкопалосних фотодетекторів ампер-ватну чутливість, зовнішню квантову ефективність і специфічну детективність.

5. Створено гнучкі тонкоплівкові термоелектричні елементи планарного типу на основі відпалених у вакуумі при 300°C наноструктурованих шарів ZnO і ZnO:In на поліімідних підкладках. Виготовлено функціональну приладову структуру

гнучкого тонкоплівкового термоелектричного модуля планарного типу на основі наноструктурованого шару ZnO на поліїмідній підкладці і показано переваги використання в ньому тонкоплівкових термопар із ТЕ елементами n-типу ZnO/Pi і металічними хромелєвими ТЕ елементами p-типу. Виготовлено гнучкі термоелектричні елементи планарного типу на основі наноструктурованих плівок ZnO і ZnO:In на поліїмідних підкладках із тонкоплівковими омичними контактами, вихідні термоелектричні параметри яких відповідають сучасним мініатюрним та гнучким термоелектричним приладам, але мають значну перевагу у собівартості.

Практичні результати роботи захищено патентом України на корисну модель № 150983 («Спосіб виготовлення гнучкого текстильного термоелектричного модуля» Опубл. Бюл. № 20 від 18.05.2022).

Результати дисертації впроваджено у технологічний процес Товариством з обмеженою відповідальністю «МИНЕНЕРГОКОМ» (м. Харків). Це підтверджено Актом передачі та використання науково-технічних результатів дисертаційного дослідження, який міститься в Додатку А дисертації.

#### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Результати досліджень було представлено та обговорено на шести міжнародних конференціях і опубліковано в 19 роботах, з яких 11 є статтями в наукових фахових виданнях, що входять до міжнародної науково-метричної бази Scopus, 7 робіт є матеріалами міжнародних конференцій. Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

#### **Оцінка змісту дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота Хрипунової І.В. складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показана її наукова і практична цінність, сформульовані мета і задачі дослідження, які необхідно

вирішити для її досягнення, описано зв'язок дисертації з науковими планами та темами, приведена апробація дисертаційної роботи і публікації.

В першому розділі подано огляд сучасної літератури стосовно фоточутливості наноструктурованих матеріалів на основі оксиду цинку відносно ультрафіолетового, видимого і ближнього інфрачервоного випромінення, радіаційної стійкості наноструктурованих матеріалів на основі оксиду цинку до позаземного сонячного опромінення та космічних променів, використання властивостей наноструктурованих матеріалів на основі оксиду цинку для створення малопотужних термоелектричних приладів. Здійснено постановку завдання.

У другому розділі наведено описання методів виготовлення та дослідження об'єктів. Наноструктуровані плівки легованого індієм і нелегованого оксиду цинку на твердих і гнучких підкладках та їх композити із наночастинками срібла і біополімером наноцелюлозою виготовлено гідрохімічними методами. Кристалічну структуру плівкових шарів ZnO і ZnO:In та їх нанокompозитів досліджено методом рентген-дифрактометричного аналізу. Морфологію поверхні і хімічний склад наноструктурованих шарів ZnO і ZnO:In та їх нанокompозитів досліджено методами скануючої електронної мікроскопії в режимах вторинних і зворотно відбитих електронів та рентгенівського флуоресцентного мікроаналізу і енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії. Оптичні властивості плівкових шарів ZnO, ZnO:In, їх нанокompозитів, а також приладових структур на їх основі досліджено за допомогою спектрофотометричного аналізу. Для створення приладових структур гнучких широкополосних фотодетекторів і планарних гнучких термоелектричних елементів і модулів методом вакуумного термічного випаровування створено тонкоплівкові омичні контакти до плівок ZnO, ZnO:In і нанокompозитів на їх основі. Електричні властивості функціональних шарів приладових структур визначено методом термозонду, їх термоелектричні властивості досліджено шляхом створення термоелектричної напруги. Вихідні параметри приладових структур гнучких широкополосних фотодетекторів оцінено за параметрами їх фотовідгуків у реальному часі. Для визначення вихідних параметрів приладових структур планарних гнучких термоелектричних елементів і модулів на основі ZnO і ZnO:In застосовано навантажувальні вольт-амперні характеристики.

В третьому розділі досліджено радіаційну стійкість наноструктурованих шарів ZnO і ZnO:In. Проаналізовано вплив обробки плазмою тліючого розряду  $H_2^+$  на шари оксиду цинку на підкладках FTO, вплив високих доз опромінення електронним пучком на структуру та хімічний склад плівок ZnO і ZnO:In на твердих і гнучких підкладках та вплив жорсткого ультрафіолетового опромінення на структуру та властивості шарів ZnO і ZnO:In.

В четвертому розділі досліджено фоточутливі приладові структури на основі виготовлених гідрохімічними методами плівкових шарів ZnO і ZnO:In і їх нанокompозитів. Серед них гнучкі покриття для захисту від сонячного ультрафіолету в наземних умовах із виготовленими методом SILAR плівками ZnO і ZnO:In, чутливі до ультрафіолетового опромінення супергідрофобні тканини з покриттям із виготовлених гідрохімічним методом SILAR наноструктурованих шарів ZnO:In, приладові структури для фотодетекторів фоторезистивного типу на основі наноструктурованого шару ZnO:In та нанокompозиту NC/ZnO:In на гнучких поліімідних підкладках, приладові структури для фотодетекторів фоторезистивного типу на основі наноструктурованого шару ZnO та нанокompозиту ZnO\_Ag на гнучких поліімідних підкладках.

В п'ятому розділі описано використання термоелектричних властивостей плівкових шарів ZnO і ZnO:In для створення малопотужних тонкоплівкових термоелектричних елементів і модулів. А саме, оптимізація гідрохімічних методів виготовлення наноструктурованих шарів ZnO і ZnO:In на поліімідних підкладках та розробка приладових структур тонкоплівкових термоелектричних елементів і модуля планарного типу на їх основі, а також розробка ефективних приладових структур гнучких тонкоплівкових термоелектричних елементів планарного типу із омичними контактами на основі наноструктурованих шарів ZnO і ZnO:In на поліімідних підкладках.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані чітко та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел із 183-х найменувань повний, сучасний і включає переважно зарубіжні публікації світового рівня.

Анотація відображає основний зміст дисертації та повно розкриває наукові

результати та практичну цінність роботи.

#### **Академічна доброчесність**

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків дисертанта.

#### **По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:**

В дисертації не висвітлено способи запобігання негативним впливам дифузійних процесів в матеріалах і приладових структурах протягом їх експлуатації. Такі впливи є досить ймовірними, враховуючі нанокристалічну структуру виготовлених шарів оксиду цинку.

В роботі не досліджено механічні властивості виготовлених матеріалів, зокрема це важливо для шарів оксиду цинку на поверхні гнучких підкладок.

Текст дисертації містить певну кількість друкарських і стилістичних помилок.

Разом з тим, вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертація є актуальною і має високу наукову цінність та практичну значущість.

### **ВИСНОВОК**

Дисертаційна робота Хрипунової Ірини Василівни «Термоелектричні і фоточутливі приладові структури на основі наноструктурованих шарів нелегованого і легovanого індієм оксиду цинку і їх нанокомпозитів» за своїм змістом відповідає спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали». Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка сприяє розробці нанотехнологій для розвитку сучасної тонкоплівкової гнучкої і носимої електроніки.

Подана дисертаційна робота «Термоелектричні і фоточутливі приладові структури на основі наноструктурованих шарів нелегованого і легovanого індієм оксиду цинку і їх нанокомпозитів». відповідає спеціальності 105 – «Прикладна

фізика та наноматеріали», відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44, а здобувачка - Хрипунова І.В. - заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент -

доктор технічних наук,  
професор кафедри фізики  
Національного аерокосмічного  
університету ім. М.Є. Жуковського  
"Харківський авіаційний інститут"



Олег ЧУГАЙ

*Лідше професоре кафедри фізики здобувачку  
Директору з НДР Національ-  
ного аерокосмічного універси-  
тету ім. М.Є. Жуковського  
Володимир ТАВЛІКОВ*

