

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Євдокименка Владислава Юрійовича

на тему «Оптимізація характеристик наночастинок та плівок сполук CuO, ZnO:Al, SnS для перетворювачів сонячної енергії», поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Характеристика особистості здобувача

Євдокименко Владислав Юрійович у 2018 році закінчив Сумський державний університет за спеціальністю «Електронні системи», освітній рівень «Бакалавр»; з 2018 по 2019 рр. навчався у Сумському державному університеті за спеціальністю «Електроніка» за освітнім рівнем «Магістр». З 2020 р. до 2024 р. включно був здобувачем наукового ступеню доктора філософії в Сумському державному університеті за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики. На даний час здійснює наукову діяльність у Сумському державному університеті на посаді молодшого наукового співробітника.

Тему дисертації у останній редакції затверджено на засіданні Вченої ради СумДУ (протокол № 10 від «14» березня 2024 р.).

За час навчання в аспірантурі Євдокименко В. Ю., зарекомендував себе сумлінним, відповідальним та високопрофесійним науковим працівником. Він опанував сучасні наукові методики та оволодів інноваційними підходами до здійснення наукових досліджень.

Євдокименко В. Ю. прийняв участь у таких всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях: «Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ)» (м. Суми, 2021, 2022, 2023, 2024 рр.), «Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем» MEICS» (м. Дніпро, 2020, 2022, 2023 рр.), «Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЕВРИКА» (м. Львів, 2021, 2022 рр.), «9-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (СЕМСТ-9)» (м. Одеса, 2021 р.), «IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON» (м. Львів, 2021 р.), «UkrMiCo 2021 - 2022 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics» (м. Київ, 2021 р.).

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Створення приладів геліоенергетики і гнучкої електроніки критично залежить від наявності недорогих матеріалів, які використовуються для їх виготовлення, та розробки дешевих і доступних технологій нанесення плівкових структур. Для створення активних шарів приладів мікро- та наноелектроніки у наш час широко використовуються оксиди металів, в тому числі, ZnO, Cu_xO. Складові оксидних сполук є дешевими та можуть бути отримані із необхідними електричними і оптичними характеристиками недорогими і доступними хімічними методами.

Серед оксидних напівпровідників оксид міді викликає особливий інтерес завдяки своїм унікальним електричним і фотоелектричним властивостям, нетоксичності та існуванню безпечних для навколишнього середовища методам осадження, широкій розповсюдженості і дешевизні компонентів. У той же час Cu₂O відноситься до невеликої групи відомих на цей час широкозонних сполук (NiO, MoO, Cu₂O) з дірковим типом провідності. Однак, на відміну від них сполука Cu₂O характеризується малою ефективною масою носіїв заряду і відповідно високою їх рухливістю ($100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ і вище). Тому цей матеріал відкриває нові можливості для розробки сонячних елементів та інших приладів електроніки.

Оптимізація властивостей ZnO при його використанні як віконного шару сонячного елемента відіграє важливу роль у збільшенні ефективності тонкоплівкових фотоперетворювачів. Саме тому велика увага приділяється легуванню цього матеріалу донорними та акцепторними домішками. Алюміній є традиційною донорною домішкою в оксиді цинку, яка збільшує провідність сполуки при цьому залишаючи матеріал прозорим, тому він є чудовим кандидатом у якості легуючої домішки для контролю оптичних і електричних характеристик оксиду.

Останнім часом методи друку, особливо такі, як розпилення наночорнил та крапельний друк за допомогою 3D принтерів, привертають значну увагу дослідників як потенційно ефективні способи виготовлення плівок напівпровідних матеріалів для приладового використання. Ці методи відзначаються своєю простотою, ефективністю та відносною доступністю, оскільки використовують безвакуумні процеси та дозволяють отримувати плівки великої площі з контрольованими характеристиками.

Отже, для покращення характеристик електронних приладів на основі плівок CuO, ZnO:Al, SnS необхідно провести комплексне дослідження впливу фізико-технологічних умов нанесення та термічної обробки на структурні, субструктурні, морфологічні, електрофізичні та оптичні характеристики таких шарів. Також потрібно розробити концептуально нові підходи до створення

гетероструктур на основі обраних матеріалів. Таким чином, ці напрямки досліджень є надзвичайно актуальними у контексті пошуку та створення ефективних та стабільних матеріалів для виготовлення СЕ, фото- та газових детекторів, елементів гнучкої електроніки, тощо.

Зв'язок роботи з науковими програмами та темами

Дисертаційна робота виконана в науково-дослідній лабораторії оптоелектроніки та геліоенергетики кафедри електроніки і комп'ютерної техніки Сумського державного університету. Результати роботи одержані під час виконання держбюджетних тем № 0122U000787 (2022-2024 рр.) «Керування структурно-фазовим станом наночастинок і плівок нових оксидних матеріалів, нанесених хімічними методами, для потреб гнучкої електроніки і геліоенергетики» (виконавець); № 0124U000541 (2024 р.) «Синтез та оптимізація властивостей наноструктурованих плівок системи Cu-Sn-S легованої домішками Zn, Mg, Mn, Se для приладів геліоенергетики та термоелектроніки» (виконавець); науково-дослідної роботи за договором М/58-2023 від 25.08.2023 р. (2023-2024 рр.) «3D-друковані функціональні елементи для гнучких електронних пристроїв» (відповідальний виконавець); гранту НАТО SPS Project 5916 (2021-2022 рр.) «3D printed functional elements for flexible electronic devices» (виконавець).

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій, що сформульовані в дисертації.

Дисертаційне дослідження Євдокименка Владислава Юрійовича виконано на високому методичному рівні з використанням комплексу сучасних методів дослідження. Основні наукові положення та висновки, сформульовані в дисертації, логічно випливають із одержаних результатів та є достатньо обґрунтованими. Вони відповідають поставленій меті та завданням дослідження. Чітко структуровано основні напрямки дослідження, зокрема питання синтезу наночастинок та одержання плівкових структур з контрольованими властивостями. Результати досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях, а також опубліковані в наукових міжнародних та фахових виданнях. Про достовірність отриманих результатів свідчить їх взаємоузгодженість та відповідність літературним даним.

Наукова новизна результатів

1. Установлено фізико-технологічні умови отримання методом друку однофазних високотекстурованих та суцільних плівок CuO на скляних і гнучких підкладках. Ці умови забезпечують гарну адгезію, великі розміри областей когерентного розсіювання, низький рівень мікрореформацій, а також керовану стехіометрію матеріалу, що робить плівки придатними для використання в

електронних приладах і пристроях. Також, встановлено умови термічного післяростового відпалу, які покращують якість текстури плівок, дозволяють видалити сторонні органічні домішки та приводять до контрольованої зміни фазового складу з CuO до Cu_2O .

2. Реалізовано п'ять різних варіантів синтезу для отримання однофазних орторомбічних плівок SnS : 1 – синтез в триетаноламіні при 293 К з осаджувачем $\text{CH}_3\text{C}(\text{S})\text{NH}_2$; 2 – синтез в триетаноламіні при 293 К з осаджувачем Na_2S ; 3 – синтез в діетиленгліколі (ДЕГ) при 483 К з осаджувачем $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$; 4 – синтез в ДЕГ при 483 К з осаджувачем Na_2S ; 5 – синтез в ДЕГ при 483 К з осаджувачем $\text{CH}_3\text{C}(\text{S})\text{NH}_2$. У результаті вибрано метод, що дозволяє одержувати практично однофазні наночастинки сполуки SnS або SnS_2 .

3. Уперше з використанням наночастинок методом розпилення чорнил були отримані однофазні плівки SnS . Проведено комплексне дослідження хімічного складу, текстури, структурних, субструктурних та оптичних характеристик після їх відпалу у широкому діапазоні температур. Встановлені оптимальні умови одержання таких плівок з контрольованими і відтворюваними характеристиками.

Визначено вплив структурно-фазового стану плівок $\text{ZnO}:\text{Al}$, CuO , SnS на їх оптичні та фотоелектричні характеристики (спектри пропускання, відбивання, поглинання, фотопровідності, ширина забороненої зони матеріалу тощо). На основі плівок ZnO , AZO та CuO з оптимізованими характеристиками виключно хімічними методами створено прототип СЕ з конструкцією $\text{ITO}/\text{AZO}/n\text{-ZnO}/p\text{-CuO}/\text{Cu}$, виміряні його оптичні, фотоелектричні та електричні характеристики після різних температур відпалу.

Практичне значення отриманих результатів

Запропоновані дешеві хімічні методи одержання однофазних наночастинок та плівок сполук CuO , $\text{ZnO}:\text{Al}$, SnS можуть бути використані при створення приладів геліоенергетики, сенсорики та гнучкої електроніки. Проведені комплексні дослідження надали нові дані про морфологію поверхні, текстуру, кристалічну структуру, субструктурні особливості плівок CuO , $\text{ZnO}:\text{Al}$, SnS , їх оптичні та фотоелектричні характеристики в залежності від фізико- та хіміко-технологічних умов отримання, що сприяє подальшому розвитку матеріалознавства оксидних та сульфідних сполук.

Створений прототип СЕ з конструкцією $\text{ITO} / \text{ZnO}:\text{Al} / n\text{-ZnO} / p\text{-CuO} / \text{Cu}$ на основі гетеропереходу $n\text{-ZnO} / p\text{-CuO}$ може бути використаний у подальшому для виготовлення дешевих ФЕП та фотодетекторів великої площі.

Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях, персональний внесок здобувача

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 19 працях, з яких 3 статті у журналах, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web

of Science Core Collection та належать до кварталів Q1–Q2, та 3 статті у матеріалах Міжнародних наукових конференцій, що індексуються наукометричною базою Scopus, 13 тез доповідей. В опублікованих працях автором в повному обсязі висвітлені основні наукові положення, результати та висновки дисертації. Наукові положення та результати досліджень, що отримані дисертантом, проходили апробацію та доповідалися на наукових конференціях різного рівня, як національного, так і міжнародного.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. The effect of annealing treatment on the structural and optical properties of nanostructured Cu_xO films obtained by 3D printing / Yevdokymenko V., Dobrozhan O., Pshenychnyi R., Opanasyuk A., Gnatenko, Yu., Bukivskii A., Bukivskij P., Gamernyk R., Klymov O., Muñoz-Sanjosé V., Ibañez-Romero P., Gacevic Z. // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2023. – V. 161. № 107472, IF 4.644, Q1.

2. Study of optical and photoelectric properties of copper oxide films / Gnatenko Yu.P., Bukivskij P.M., Gamernyk R.V., Yevdokymenko V.Yu., Opanasyuk A.S., Bukivskii A.P., Furyer M.S., Tarakhan L.M. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2023. – V. 307. № 128175, IF 4.778, Q1.

3. Effect of thermal annealing on the optical properties of 3D-printed nanostructured CuO films for flexible photovoltaic solar cells / Gnatenko Yu.P., Bukivskij P.M., Yevdokymenko V.Yu., Opanasyuk A.S., Bukivskii A.P., Vertygel I.G., Ovcharenko O.I // *Physica B: Physics of Condensed Matter*. – 2024. – V. 677. № 415737, IF 2.988, Q2.

4. The Annealing Effect on the Structure and Microstructure of Three-Dimensional Printed Zinc Oxide Films / Yevdokymenko V., Dobrozhan O., Pshenychnyi R.; Kakherskyi S., Opanasyuk A., Gnatenko Y. // *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2021 - Proceedings*. – 2021. – P. 454-458.

5. SnS and SnS₂ nanoparticles for printing third generation solar cells / Yevdokymenko V., Opanasyuk N., Ponomarova L, Gnatenko Yu. // *UkrMiCo 2021 - 2022 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, Proceedings*. – 2021. – P. 299-303.

6. Morphological, Structural, Substructural Characteristics and Chemical Composition of ZnO Nanocrystals Doped with Aluminum / Yermakov M., Yevdokymenko V., Dobrozhan O., Ponomarova L., Opanasyuk A. // *UkrMiCo 2021 - 2022 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, Proceedings*. – 2021. – P. 289-294.

2. Наукові праці апробаційного характеру

7. Вплив відпалів у різних середовищах на структурні характеристики надрукованих плівок оксиду цинку / Євдокименко В.Є., Кравченко П.Е., Доброжан О.А., Пшеничний Р.М., Опанасюк А.С. // Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ: 2021). Матеріали та програма міжнародної науково-технічної конференції студентів та молодих вчених (Суми, 20–24 квітня 2021 року), Суми, Сумський державний університет 2021, с.106.

8. Вплив температури відпалу на морфологію, структуру та хімічний склад плівок оксиду цинку, надрукованих 3д принтером / Євдокименко В., Кахерський С., Доброжан О., Пшеничний Р., Опанасюк А. // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЕВРИКА-2021, 18-20 травня 2021 р. Львів, с. 12.

9. Наночастинки SnS для створення чорнил для друку приладів електроніки / Євдокименко В.Є., Муквич В.Ю., Пшеничний Р.М., Опанасюк А.С. // 9-та Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (СЕМСТ-9), Україна, Одеса, 20 – 24 вересня 2021 р., с. 40.

10. Властивості гетеропереходу на основі плівок оксиду міді для створення приладів електроніки / Євдокименко В.Є., Д’яченко О.В., Опанасюк А.С. // 9-та Міжнародна науково-технічна конференція “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології” (СЕМСТ-9), Україна, Одеса, 20 – 24 вересня 2021 р., с. 41.

11. Synthesis and structural properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$, SnS nanocrystals for printed solar cells / Yevdokymenko V., Kakherskyi S., Pshenychnyi R., Dobrozhan O., Oranasyuk A. // Міжнародна Фреїківська конференція з фізики і технології тонких плівок і наносистем МКФТТІН-ХVІІІ, Україна, Івано-Франківськ, 11-16 жовтня, 2021 р., с. 158.

12. Вплив вакуумного відпалу на склад плівок CuO, отриманих методом друку / Євдокименко В., Пшеничний Р., Д’яченко О., Опанасюк А. // VI Всеукраїнська науково-практична конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп’ютерних систем» MEICS-2021, Україна, Дніпро, 24-26 листопада, 2021 р., с. 183.

13. Структурні, субструктурні характеристики та хімічний склад наночастинок ZnO легованого алюмінієм та індієм / Євдокименко В., Єрмаков М., Пшеничний Р., Опанасюк А. // VI Всеукраїнська науково-практична конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп’ютерних систем» MEICS-2021, Україна, Дніпро, 24-26 листопада, 2021 р., с.155.

14. Effect of annealing temperature on the properties of copper oxide thin layers deposited by a 3D printer / Yevdokymenko V., Shapovalov O., Pshenychnyi R., Oranasyuk A. // Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ: 2022). Матеріали та програма міжнародної науково-технічної конференції студентів та молодих вчених (Суми, 18–22 квітня 2022 року), Суми, Сумський державний університет 2022, с.74.

15. Вплив відпалів на оптичні характеристики плівок оксиду міді / Євдокименко В., Пшеничний Р., Климов О., Опанасюк А., Muñoz-Sanjósé V. // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЕВРИКА-2022, 18-20 травня 2022 р. Львів, с. 7.

16. Оптимізація структури і фазового складу шарів SnS шляхом їх відпалів / Євдокименко В., Пшеничний Р., Климов О., Опанасюк А., Muñoz-Sanjósé V. // VII Всеукраїнська науково-практична конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2022, Україна, Дніпро, 23-25 листопада, 2022 р., с. 175.

17. Оптимізації структурних характеристик плівок SnS для сонячних елементів третього покоління / Євдокименко В.Ю., Муквич В.Ю., Опанасюк А.С. // Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ: 2023). Матеріали та програма міжнародної науково-технічної конференції студентів та молодих вчених (Суми, 24–28 квітня 2023 року), Суми, Сумський державний університет 2023, с.69.

18. Вплив температури відпалу на структурні та оптичні характеристики гетероструктур ZnO/CuO / Євдокименко В., Пшеничний Р., Опанасюк А., Юрченко В., Климов О. // VIII Всеукраїнська науково-практична конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2023, Україна, Дніпро, 22-24 листопада, 2023 р., с. 216.

19. Оптимізації оптичних та електричних характеристик гетероструктури ZnO/CuO / Євдокименко В.Ю., Пшеничний Р.М., Опанасюк А.С., Гнатенко Ю.П. // Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ: 2024). Матеріали та програма міжнародної науково-технічної конференції студентів та молодих вчених (Суми, 22–26 квітня 2024 року), Суми, Сумський державний університет 2024, с.45.

Наведені публікації містять результати безпосередньої роботи здобувача на окремих етапах дослідження, повною мірою відображають основні положення та висновки роботи. Авторська участь здобувача в опублікованих наукових працях погоджена зі співавторами.

Оцінка мови та стилю дисертації. Матеріали дисертації викладено

українською мовою, послідовно за формально-логічною структурою з дотриманням наукового стилю написання.

Відповідність фаху. Дисертаційна робота відповідає спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

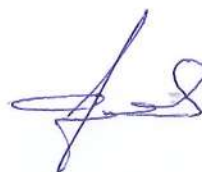
Академічна доброчесність. За результатами перевірки дисертаційної роботи Євдокименка Є.Ю. на наявність ознак академічного плагіату встановлено коректність посилань та першоджерела для текстових та ілюстративних зазначень; навмисних спотворень не виявлено. Звідси можна зробити висновок про відсутність порушень академічної доброчесності.

Оформлення дисертації за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим МОН України, наказ № 40 від 12.11.2017. Мова і стиль викладання дисертації точно та чітко висвітлюють одержані науково-практичні результати.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Євдокименка Владислава Юрійовича на тему: «Оптимізація характеристик наночастинок та плівок сполук CuO , ZnO:Al , SnS для перетворювачів сонячної енергії» за актуальністю проблеми, методичними підходами, обсягом, ґрунтовністю аналізу та інтерпретацією отриманих даних, повнотою викладу принципів наукових положень, науково-теоретичним та практичним значенням повністю відповідає вимогам п. 6 «Порядку присудження ступеня доктор філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, та може бути рекомендована до подання у разову спеціалізовану вчену раду.

Голова апробаційної ради
зі спеціальності
105 «Прикладна фізика
та наноматеріали»,
доцент кафедри ЕЗПФ,
доктор фіз-мат. наук, професор



Юрій ШКУРДОДА