

# Облікова картка дисертації

## I. Загальні відомості

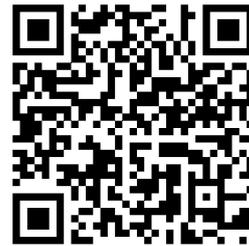
Державний обліковий номер: 0824U003038

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 05-09-2024

Статус: Запланована

Реквізити наказу МОН / наказу закладу:



## II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Євдокименко Владислав Юрійович

2. Vladyslav Yevdokymenko

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-9612-7203

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 105

Назва наукової спеціальності: Прикладна фізика та наноматеріали

Галузь / галузі знань:

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: 20725 прикладна фізика та наноматеріали

Дата захисту: 05-09-2024

Спеціальність за освітою: 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Місце роботи здобувача: Сумський державний університет

Код за ЄДРПОУ: 05408289

Місцезнаходження: вул. Харківська, буд. 116, Суми, Сумський р-н., 40007, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

### **III. Відомості про організацію, де відбувся захист**

**Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради):** 6523

**Повне найменування юридичної особи:** Сумський державний університет

**Код за ЄДРПОУ:** 05408289

**Місцезнаходження:** вул. Харківська, буд. 116, Суми, Сумський р-н., 40007, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію**

**Повне найменування юридичної особи:** Сумський державний університет

**Код за ЄДРПОУ:** 05408289

**Місцезнаходження:** вул. Харківська, буд. 116, Суми, Сумський р-н., 40007, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **V. Відомості про дисертацію**

**Мова дисертації:** Українська

**Коди тематичних рубрик:** 29.19.31

**Тема дисертації:**

1. Оптимізація характеристик наночастинок та плівок сполук CuO, ZnO:Al, SnS для перетворювачів сонячної енергії
2. Optimization of characteristics of nanoparticles and films of CuO, ZnO:Al, SnS compounds for solar energy converters

**Реферат:**

1. Дисертаційна робота присвячена розробці матеріалознавчих основ керування структурно-чутливими характеристиками наночастинок (НЧ) та плівок сполук CuO, ZnO:Al, SnS, одержаних методами друку, зокрема покrapельним 3D друком та розпиленням наночорнил на скляні та гнучкі підкладки за різних фізико-технологічних умов. Особливу увагу приділено оптимізації характеристик цих матеріалів шляхом післяростового термічного відпалу одношарових та двошарових структур на їх основі. Як результат, були створені плівки та прототипи приладових структур з гетеропереходом n-ZnO/p-CuO, які мають потенціал для подальшого використання у геліоенергетиці, сенсоричі та гнучкій електроніці. Результати роботи можуть сприяти вдосконаленню технологічних процесів нанесення плівок оксидних та халькогенідних сполук та розширенню застосувань цих матеріалів у сучасних енергетичних та електронних приладах і пристроях. Для досягнення мети роботи, спочатку були розроблені лабораторні методи синтезу та

проведено вибір прекурсорів для одержання однофазних НЧ оксидів та сульфідів металів з заданими характеристиками (складом, фазою, формою, структурою). Потім з використанням синтезованих частинок отримували наночорнила з потрібною густиною та в'язкістю для нанесення плівок масштабованими, енергоефективними, безвакуумними методами друку. З метою усунення зі складу органічних домішок, що використовувалися під час синтезу НЧ та при створенні чорнил, плівки піддавали післяростовій термічній обробці. Відпал також дозволяє зменшити кількість дефектів у структурі тонких шарів, підвищити кристалічну якість матеріалу, покращити його електронні та оптичні властивості, що важливо для забезпечення стабільності та ефективності плівок у подальшому їх використанні в різних технологічних і промислових застосуваннях. Беручи до уваги вищенаведені аспекти, були визначені оптимальні умови синтезу НЧ сполук CuO, ZnO:Al, SnS. Зокрема, для синтезу НЧ CuO і ZnO:Al було використано поліольно-колоїдний метод, який дозволяє точно контролювати морфологію та розмір частинок. Для отримання НЧ сполуки SnS<sub>x</sub> проводили п'ять синтезів – поліольно-колоїдний з прекурсорами CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>S, CH<sub>3</sub>C(S)NH<sub>2</sub> при температурі 483 K та синтез у водно-амоніачному розчині з прекурсорами CH<sub>3</sub>C(S)NH<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>S при температурі 293 K. Показано, що НЧ синтезовані у триетаноламіні (ТЕА) при 293 K з осаджувачем Na<sub>2</sub>S мали стехіометрію найбільш близьку до сполуки SnS, в той час як синтез в діетиленгліколі (ДЕГ) при 483 K з осаджувачем CH<sub>3</sub>C(S)NH<sub>2</sub> дозволив отримати частинки сполуки SnS<sub>2</sub>. Одержані НЧ диспергували в екологічно безпечних та нетоксичних розчинниках таких як суміш вода-спирт-гліколь-ПВП, щоб створити чорнила з контрольованими характеристиками. Ці розчинники забезпечують стабільність частинок у суспензії, що дозволяє точно налаштовувати властивості наночорнил, такі як текучість, в'язкість та адгезія до підкладки. Для нанесення суцільних плівок сполуки CuO покrapельним друком був використаний 3D принтер зібраний в лабораторії раніше. Однак, для друку наночорнилами, стандартний екструдер не підходив через специфічні вимоги до в'язкості та рівномірності подачі наночорнил. Тому, стандартний екструдер був замінений на розроблений спеціалізований для друку рідкими або напіврідкими матеріалами. Новий екструдер оснащений системою дозування, яка забезпечує точний контроль подачі наночорнил у вигляді крапель. Плівки ZnO, ZnO:Al та SnS наносили методом розпиленням чорнил. Для цього був використаний аерограф з діаметром сопла 0,2 мм. Використані методи дозволили отримувати зразки з відтворюваними характеристиками, що забезпечило високу стабільність і надійність одержаних результатів. Проведено дослідження елементного складу, морфологічних, структурних, субструктурних, оптичних та електричних характеристик НЧ та плівок CuO, ZnO:Al, SnS у залежності від фізико-технологічних умов отримання, а саме методів синтезу, температури термічного відпалу  $T_a = (423-773 \text{ K})$ , середовища відпалу та вмісту легуючої домішки (Al – 1, 2, 3, 5, 7, 10 ат. %). Це було необхідно для глибшого розуміння впливу різних технологічних параметрів на характеристики матеріалів, з метою оптимізації процесів їх виготовлення для забезпечення стабільних та відтворюваних характеристик, що є критично важливим для подальшого використання цих сполук для створення ФЕП, сенсорів та елементів гнучкої електроніки. Під час досліджень був створений прототип сонячного елемента (СЕ) зі складною структурою ITO/ZnO(1at.%Al)/n-ZnO/p-CuO, після чого проведено вимірювання світлових і темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ) приладу при різних температурах відпалу.

2. This dissertation is devoted to the development of a material science basis for controlling the structure-sensitive characteristics of nanoparticles (NPs) and films of CuO, ZnO:Al, and SnS compounds obtained by printing methods, in particular, droplet 3D printing and sputtering of nanoinks on glass and flexible substrates under various physical and technological conditions. Special attention was paid to optimizing the characteristics of these materials by post-growth thermal annealing of single- and two-layer structures based on them. Consequently, n-ZnO/p-CuO heterojunction films and prototype device structures were created, which could be further used in solar energy, sensors, and flexible electronics. The results of this study can contribute to improving the technological processes of applying films of oxide and chalcogenide compounds and to the expansion of the applications of these materials in modern energy and electronic devices. To achieve the goal of this work, laboratory synthesis methods were developed, and precursors were selected to obtain single-phase NPs of metal oxides and sulfides with specific characteristics (composition, phase, shape, and structure). Then, using the

synthesized particles, nanoinks with the required density and viscosity were obtained for applying films by scalable, energy-efficient, vacuum-free printing methods. The films were subjected to a post-growth heat treatment to remove organic impurities from the composition, which were used during the synthesis of NPs and in the creation of inks. Annealing also makes it possible to reduce the number of defects in the thin layer structure, increase the crystalline quality of the material, and improve its electronic and optical properties, which are important for ensuring the stability and efficiency of the films in their further use in various technological and industrial applications. Considering the above aspects, the optimal conditions for synthesizing the NP compounds, CuO, ZnO:Al, and SnS, were determined. In particular, the polyol-colloid method was used to synthesize CuO and ZnO:Al NPs, which allows precise control over the morphology and size of the particles. Five syntheses were carried out to obtain the NP compounds SnS<sub>x</sub>-polyol-colloidal with precursors CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>S, and CH<sub>3</sub>C(S)NH<sub>2</sub> at a temperature of 483 K, and synthesis in an aqueous ammonium solution with precursors CH<sub>3</sub>C(S)NH<sub>2</sub> and Na<sub>2</sub>S at a temperature of 293 K. It was shown that NPs synthesized in triethanolamine at 293 K with the precipitant Na<sub>2</sub>S had the stoichiometry closest to that of the SnS compound, while synthesis in diethylene glycol at 483 K with the precipitant CH<sub>3</sub>C(S)NH<sub>2</sub> made it possible to obtain particles of the SnS<sub>2</sub> compound. The resulting NPs were dispersed in environmentally safe and non-toxic solvents, such as water-alcohol-glycol-PVP, to create inks with controlled characteristics. These solvents stabilize the particles in suspension, allowing for the fine-tuning of nanoink properties such as flowability, viscosity, and adhesion to the substrate. A 3D printer previously assembled in the laboratory was used to apply continuous films of CuO compounds via drop printing. However, a standard extruder is unsuitable for printing with nano-inks because of the specific requirements for the viscosity and uniformity of the nano-ink supply. Therefore, the standard extruder was replaced with a specially developed extruder for printing liquid or semi-liquid materials. The new extruder was equipped with a dosing system that precisely controlled nano-ink delivery in droplets. ZnO, ZnO:Al, and SnS films were applied by ink spraying. An airbrush with a nozzle diameter of 0.2 mm was used for this. The methods used made it possible to obtain samples with reproducible characteristics, which ensured high stability and reliability of the results. This dissertation is devoted to the development of a material science basis for controlling the structure-sensitive characteristics of nanoparticles (NPs) and films of CuO, ZnO:Al, and SnS compounds obtained by printing methods, in particular, droplet 3D printing and sputtering of nanoinks on glass and flexible substrates under various physical and technological conditions. Special attention was paid to optimizing the characteristics of these materials by post-growth thermal annealing of single- and two-layer structures based on them. Consequently, n-ZnO/p-CuO heterojunction films and prototype device structures were created, which could be further used in solar energy, sensors, and flexible electronics. The results of this study can contribute to improving the technological processes of applying films of oxide and chalcogenide compounds and to the expansion of the applications of these materials in modern energy and electronic devices.

**Державний реєстраційний номер ДіР:**

**Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки:** Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

**Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності:** Освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій

**Підсумки дослідження:** Нове вирішення актуального наукового завдання

**Публікації:**

- 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. The effect of annealing treatment on the structural and optical properties of nanostructured CuxO films obtained by 3D printing. Materials

Science in Semiconductor Processing, 2023. V. 161. № 107472

- Gnatenko Yu.P., Bukivskij P.M., Gamernyk R.V., Yevdokymenko V.Yu., Opanasyuk A.S., Bukivskii A.P., Furyer M.S., Tarakhan L.M. Study of optical and photoelectric properties of copper oxide films. Materials Chemistry and Physics, 2023. V. 307. № 128175
- Gnatenko Yu.P., Bukivskij P.M., Yevdokymenko V.Yu., Opanasyuk A.S., Bukivskii A.P., Vertygel I.G., Ovcharenko O.I. Effect of thermal annealing on the optical properties of 3D-printed nanostructured CuO films for flexible photovoltaic solar cells. Physica B: Physics of Condensed Matter, 2024. V. 677. № 415737

**Наукова (науково-технічна) продукція:** пристрої; матеріали

**Соціально-економічна спрямованість:** економія енергоресурсів

**Охоронні документи на ОПВ:**

**Впровадження результатів дисертації:** Планується до впровадження

**Зв'язок з науковими темами:** 0122U000787, 0124U000541

## **VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Доброжан Олександр Анатолійович
2. Oleksandr Dobrozhan

**Кваліфікація:** к. ф.-м. н., доц., 01.04.01

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0001-9238-7596

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Сумський державний університет

**Код за ЄДРПОУ:** 05408289

**Місцезнаходження:** вул. Харківська, буд. 116, Суми, Сумський р-н., 40007, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Опанасюк Анатолій Сергійович
2. Anatoliy Opanasyuk

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., професор, 01.04.01

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-1888-3935

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Сумський державний університет

**Код за ЄДРПОУ:** 05408289

**Місцезнаходження:** вул. Харківська, буд. 116, Суми, Сумський р-н., 40007, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

## **VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів**

### **Офіційні опоненти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Лобода Валерій Борисович
2. Valeriy Loboda

**Кваліфікація:** к. ф.-м. н., професор, 01.04.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0001-9007-8642

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Сумський національний аграрний університет

**Код за ЄДРПОУ:** 04718013

**Місцезнаходження:** вул. Герасима Кондратьєва, буд. 160, Суми, Сумський р-н., 40021, Україна

**Форма власності:**

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:** Не застосовується

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Зайцев Роман Валентинович
2. Roman Zaitsev

**Кваліфікація:** д. т. н., професор, 01.04.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0003-2286-8452

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

**Код за ЄДРПОУ:** 02071180

**Місцезнаходження:** вул. Кирпичова, буд. 2, Харків, Харківський р-н., 61002, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **Рецензенти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Гончаров Олександр Андрійович

2. Alexander Goncharov

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., професор, 01.04.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-9275-0073

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Сумський державний університет

**Код за ЄДРПОУ:** 05408289

**Місцезнаходження:** вул. Харківська, буд. 116, Суми, Сумський р-н., 40007, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Тищенко Константин Володимирович

2. Kostyantyn Tyschenko

**Кваліфікація:** к. ф.-м. н., 01.04.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0003-3683-8270

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Сумський державний університет

**Код за ЄДРПОУ:** 05408289

**Місцезнаходження:** вул. Харківська, буд. 116, Суми, Сумський р-н., 40007, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

## **VIII. Заключні відомості**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
голови ради**

Однодворець Лариса Валентинівна

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
головуючого на засіданні**

Однодворець Лариса Валентинівна

**Відповідальний за підготовку  
облікових документів**

Бойко Антон Олександрович

**Реєстратор**

УкрІНТЕІ

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є  
відповідальним за реєстрацію наукової  
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна