Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0825U003358

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 08-08-2025

Статус: Наказ про видачу диплома

Реквізити наказу МОН / наказу закладу: Наказ Сумського державного університету № 0279-V від 03 вересня 2025 р.

II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Єрмаков Максим Сергійович

2. Maksym Yermakov

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-1170-6415

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: 15-08-2025

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): PhD 9691

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 ZnO:In, Zn2SnO4, Cu2MgxZn1-xSnS4 для формування функціональних шарів електронних приладів

2. Optimization of the characteristics of nanoparticles and films of ZnO:In, Zn2SnO4, Cu2MgxZn1-xSnS4 for the formation of functional layers in electronic devices

Реферат/анотація:

1. Дисертаційна робота присвячена розвитку матеріалознавчих аспектів контролю за структурно-залежними характеристиками наночастинок (НЧ) і плівок функціональних матеріалів, зокрема оксидних і кестеритних сполук — ZnO:In, Zn2SnO4, Cu2MgxZn1-xSnS4, отриманих методами розпилення наночорнил та пульсуючого спрей-піролізу. Особлива увага приділялася модифікації властивостей матеріалів шляхом легування, контролю складу, а також термічної обробки. У ході дослідження також були створені прототипи приладових структур на основі гетероструктури ITO/ZnO:In/ZnO/NiO Такі структури демонструють потенціал для використання в галузях сонячної енергетики, фоточутливих пристроїв (фотодетекторів) і газочутливих сенсорів. Результати дисертаційного дослідження сприяють удосконаленню технологій осадження плівок оксидних і кістеритних сполук, поглиблюють розуміння структурно-функціональних залежностей у наноматеріалах, а також розширюють спектр можливого використання таких матеріалів у сучасних

електронних приладах та пристроях. Поліольно-колоідним методом отримано НЧ ZnO, леговані In (0–10 ат.%). Вивчено вплив легування на їх хімічний склад, морфологічні, структурні і субструктурні характеристики. Встановлено, що до концентрації In 2 ат.% частинки мають однофазну структуру та містять тільки оксид цинку з вюрцитною структурою. Збільшення концентрації домішки в прекурсорі від 0 до 10 ат.% вело до зміни вмісту In в НЧ від 0 до 6,42 ат.% та зростання їх розміру від 15 до 24 нм. Встановлено вплив легування індієм на структурні, субструктурні, оптичні і електричні характеристики плівок ZnO, нанесених методом спрей-піролізу. Зразки отримані з використанням молекулярних розчинів з вмістом Індію по відношенню до Цинку 1, 3, 5, 7, 10 ат. %. Структурний аналіз підтвердив, що плівки мають гексагональну структуру з текстурою росту [110], якість якої погіршується при збільшенні рівня легування матеріалу. Дослідження свідчать про ефективне вбудовування атомів індію в кристалічну гратку оксиду. При цьому введення цієї домішки приводить до зростання ширини забороненої зони сполуки. Найкращі електричні характеристики плівок IZO (n = 3,4п1018 см-3, п = 0,007 Ом□см2, п = 253 см / В□с) одержані у випадку використання прекурсору з концентрацією домішки 3 ат. %, що, очевидно, обумовлено їх кращою структурною якістю. Проведено дослідження структурних, субструктурних і оптичних характеристик НЧ та плівок Zn2SnO4. НЧ синтезовані гідротермальним методом протягом часу (16-32) годин з інтервалом 4 години. На основі частинок з оптимальними параметрами (28 год.) створені чорнила, розпиленням яких одержані плівки оксиду. Після нанесення, з метою оптимізації структурних характеристик, зразки відпалювалися в атмосфері аргону при температурах (523-773) К протягом 30 хвилин. Розміри областей когерентного розсіювання плівок зростають при збільшенні температури відпалу від (3,85-5,56) нм (523 К) до (6,44-7,99) нм (773 К). Результати рентгенівських досліджень підтверджені даними Раманівського розсіювання світла, де на спектрах спостерігаються моди F2g(2), F2g(3) та A1g, що відповідають структурі інверсної шпінелі Zn2SnO4. Визначення, що підвищення температури відпалу веде до зміни Eg плівок від 4,04 до 3,63 еВ. Вперше методом пульсуючого спрей-піролізу отримано плівки твердих розчинів Cu2MgxZn1-xSnS4. Встановлено вплив співвідношення Mg/Zn у прекурсорі (0 ≤ y ≤ 0,5) на структурні, субструктурні, оптичні характеристики та хімічний склад тонких плівок Cu□Mg□Zn□□□SnS□. Дані рентгеноструктурного аналізу свідчать про формування однофазних плівок зі структурою кестеріту. Однофазна структура також підтверджується результатами дослідження Раманівських спектрів для зразків, отриманих при y ≤ 0,3. Таким чином, заміщення цинку магнієм покращує якість твердого розчину при концентраціях y < 0,3. Встановлено, що ширина забороненої зони нелегованої сполуки становить 1,47 еВ, а для легованих зразків зменшується від 1,28 еВ (y = 0,1) до 1,22 еВ (y = 0,5). Отже, твердий розчин Cu2MgxZn1-xSnS4 є перспективним і доступним матеріалом для створення поглинальних шарів сонячних елементів третього покоління. Встановлено залежність структурних, субструктурних, оптичних і електричних характеристики гетероструктури ITO/ZnO:In/ZnO/NiO від термічному відпалу у вакуумі в діапазоні температур (573–773) К. Гетероструктури була повністю виготовлені методом спрей-піролізу. Встановлено, що оптимальною температурою відпалу, що забезпечує найкращі електрофізичні та оптичні характеристики гетероструктури n-ZnO/p-NiO є 723 К.

2. The dissertation is dedicated to the development of materials science aspects related to the control of structure-dependent characteristics of nanoparticles and thin films of functional materials, specifically oxide and kesterite compounds — ZnO:In, Zn2SnO4, Cu2MgxZn1-xSnS4 — synthesized via nanoparticle ink spraying and pulsed spray pyrolysis methods. Particular attention was paid to the modification of material properties through doping, compositional control, and thermal treatment. During the study, prototype device structures based on the ITO/ZnO:In/ZnO/NiO heterostructure were also developed. Such structures demonstrate potential for applications in solar energy, photosensitive devices (photodetectors), and gas-sensitive sensors. The results of this dissertation contribute to the improvement of deposition technologies for oxide and kesterite compound films, deepen the understanding of structure–function relationships in nanomaterials, and expand the range of possible applications of these materials in modern electronic devices and components. ZnO NPs doped with In (0–10 at.%) were synthesized using the polyol-colloidal method. The effect of doping on their chemical composition, morphology, structural, and substructural characteristics was studied. It was established that at In concentrations up to 2 at.%, the particles exhibit a single-phase structure containing only zinc oxide with a wurtzite structure. An

increase in dopant concentration in the precursor from 0 to 10 at.% led to a corresponding rise in In content in NPs from 0 to 6.42 at.% and an increase in nanoparticle size from 15 to 24 nm. The effect of indium doping on the structural, substructural, optical, and electrical characteristics of ZnO films deposited by the spray pyrolysis method was investigated. The samples were synthesized using molecular solutions with an indium-to-zinc atomic ratio of 1, 3, 5, 7, and 10 at.%. Structural analysis confirmed that the films exhibit a hexagonal structure with a [110] growth texture, whose quality deteriorates with increasing doping levels. The study indicates the effective incorporation of indium atoms into the crystalline lattice of zinc oxide. This doping process leads to an increase in the band gap of the compound. The best electrical characteristics of IZO films (n = 3.4 × 1018 cm-3, ◻ = 0.007 Ω·cm2, μ = 253 cm2/V·s) were achieved when using a precursor with a dopant concentration of 3 at.%, which is likely due to the superior structural quality of these films. A study was conducted on the structural, substructural, and optical characteristics of Zn2SnO4 NPs and thin films. The NPs were synthesized using the hydrothermal method for durations ranging from 16 to 32 hours, with 4-hour intervals. Based on particles with optimal parameters (28 hours), nanoparticle inks were formulated and subsequently sprayed to obtain oxide films. To optimize the structural characteristics, the deposited films were annealed in an argon atmosphere at temperatures of 523–773 K for 30 minutes. The size of the coherent scattering regions in the films increased with higher annealing temperatures, from (3.85–5.56) nm at 523 K to (6.44–7.99) nm at 773 K. X-ray diffraction results were corroborated by Raman spectroscopy data, where the observed modes F2g(2), F2g(3) and A1g corresponded to the inverse spinel structure of Zn2SnO4. It was determined that increasing the annealing temperature led to a change in the optical bandgap of the films from 4.04 to 3.63 eV. For the first time, thin films of Cu2MgxZn1-xSnS4 solid solutions were obtained using the pulsed spray pyrolysis method. The effect of the Mg/Zn ratio in the precursor ($0 \le y \le 0.5$) on the structural, substructural, optical characteristics, and chemical composition of Cu2MgxZn1-xSnS4 thin films was investigated. X-ray diffraction analysis confirmed the formation of single-phase films with a kesterite structure. The single-phase nature was also supported by Raman spectroscopy results for samples obtained at $y \le 0.3$. Thus, substituting zinc with magnesium improved the quality of the solid solution at concentrations $y < 0.3$. It was established that the band gap of the undoped compound was 1.47 eV, while for doped samples, it decreased from 1.28 eV (y = 0.1) to 1.22 eV (y = 0.5). Therefore, the Cu2MgxZn1-xSnS4 solid solution is a promising and cost-effective material for the development of absorber layers in third-generation solar cells. The dependence of the structural, substructural, optical, and electrical characteristics of the ITO/ZnO:In/ZnO/NiO heterostructure on vacuum annealing in the temperature range of 573–773 K was established. The heterostructures were entirely fabricated using the spray pyrolysis method. It was determined that the optimal annealing temperature, ensuring the best electro-physical and optical characteristics of the n-ZnO/p-NiO heterostructure, is 723 K.

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 транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії

Підсумки дослідження: Нове вирішення актуального наукового завдання

Публікації:

- Yermakov M., Pshenychnyi R., Opanasyuk A., Gnatenko Yu., Bukivskij P., Bukivskii A., Klymov O., Muñoz-Sanjosé V., Gamernyk R. The effect of annealing on the structural, optical, and electrical characteristics of multilayer structures with ZnO/NiO heterojunctions. Applied Surface Science Advances, 2025. № 25. P. 100668

- Yermakov M., Pshenychnyi P., Opanasyuk A., Klymov O., Muñoz-Sanjosé V., Gnatenko Yu. Chemical composition, structural, optical and electrical characteristics of IZO films applied by the spray-pyrolysis method with molecular solutions. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2025. № 36. P. 515
- Yermakov M., Pshenychnyi R., Opanasyuk A., Klymov O., Muñoz-Sanjosé V. Optical and electrical properties of ZnO/NiO heterojunctions obtained by the sprayпpyrolysis method. Journal of Materials Science, 2024. № 59. P.15738–15751
- Yermakov M., Pshenychnyi R., Opanasyuk A., Gnatenko Yu., Klymov O., Martínez M.C.-Tomás Muñoz-Sanjosé V. Structural features of Cu2MgxZn1-xSnS4 solid solution films for third-generation solar cells. Journal of Alloys and Compounds, 2023. № 935 (2). P.168117
- Klymov O., Yermakov M., Pshenychnyi R., Dobrozhan O., Agouram S., Martínez-Tomas M.C., Opanasyuk A., Mu˜noz-Sanjose V. Synthesis of Zn2SnO4 particles and the influence of annealing temperature on the structural and optical properties of Zn2SnO4 films deposited by spraying nanoinks. Applied Surface Science Advances, 2023. № 18. P. 100521

Наукова (науково-технічна) продукція: пристрої; матеріали

Соціально-економічна спрямованість: економія енергоресурсів

Охоронні документи на ОПІВ:

Впровадження результатів дисертації: Планується до впровадження

Зв'язок з науковими темами: 0122U000787, 0121U112687, 0124U000541

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

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. Юхимчук Володимир Олександрович

2. Volodymyr Yukhymchuk

Кваліфікація: д. ф.-м. н., професор, 01.04.10

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-5218-9154

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України

Код за ЄДРПОУ: 05416952

Місцезнаходження: проспект Науки, буд. 41, Київ, 03028, Україна

Форма власності:

Сфера управління: Національна академія наук 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. Шабельник Юрій Михайлович

2. Yurii Shabelnyk

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

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-7516-5518

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. 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:

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