

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» **Зайцева Романа Валентиновича** на дисертаційну роботу здобувача **Євдокименка Владислава Юрійовича** на тему: «Оптимізація характеристик наночастинок та плівок сполук CuO , ZnO:Al , SnS для перетворювачів сонячної енергії», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Актуальність теми дисертаційної роботи

Одним із найважливіших завдань сучасного матеріалознавства в області напівпровідникового приладобудування є створення плівкових матеріалів з добре керованими властивостями, які можуть бути перспективними для виготовлення фотоперетворювачів, що використовуються як альтернативні джерела енергії. Нині активно розвиваються тонкоплівкові фотоперетворювачі першого та другого покоління, що зазвичай базуються на напівпровідникових сполуках, таких як Si , CdTe , $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})(\text{S,Se})_2$, CdS , ITO ($\text{In}_2\text{O}_3 - \text{SnO}_2$), та демонструють ефективність у межах 22-26%. Однак, ці матеріали мають певні суттєві недоліки: кремній є непрямозонним напівпровідником, що вимагає створення високоякісних і товстих (100-200 мкм) шарів для досягнення високої ефективності. Висока вартість видобутку елементів In , Ga , Te збільшує вартість одиниці енергії, генерованої сонячними елементами. До того ж, Cd та Se є токсичними, що знижує екологічність приладів. Як альтернативу розглядають напівпровідникові сполуки оксидів (CuO , ZnO) та сульфідів (SnS), які є екологічно безпечними, мають кращі фізичні властивості порівняно з традиційними матеріалами, а також дозволяють створювати шари приладів з використанням значно дешевших методів, зокрема технік друку.

Методи 3D друку та розпилення чорнил на підкладку набувають все більшого значення у контексті створення тонких плівок для сонячних елементів, сенсорів, елементів гнучкої електроніки, тощо. 3D друк дозволяє точно контролювати геометрію та товщину нанесених шарів, що є критично важливим для досягнення оптимальних електронних і оптичних властивостей. Цей метод забезпечує високу відтворюваність та можливість швидкого прототипування, що сприяє прискоренню досліджень і розробок у галузі сонячної енергетики.

Розпилення чорнил на основі наночастинок напівпровідникових матеріалів на підкладку є ще одним перспективним методом, який дозволяє рівномірно наносити плівки на великі площі. Цей процес є відносно простим і економічним, що робить його привабливим для масового виробництва. Завдяки можливості точно контролювати склад і концентрацію чорнила, можна досягати необхідної стехіометрії та мінімізувати кількість структурних дефектів у плівках.

Оптимізація характеристик наночастинок та плівок сполук CuO , ZnO , SnS є важливим кроком у напрямку підвищення ефективності сонячних елементів. Використання методів друку та розпилення чорнил дозволяє створювати високотекстуровані плівки з оптимальними розмірами областей когерентного значення та керованою стехіометрією, що є критичним для досягнення високої ефективності перетворення сонячної енергії. Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною, оскільки робота спрямована на вирішення важливих задач у сфері відновлюваної енергетики, пропонуючи нові підходи до створення ефективних, дешевих і доступних плівкових фотоперетворювачів третього покоління.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджується також тим, що дана дисертаційна робота виконувалася у рамках великої кількості держбюджетних тем, наукових та міжнародних грантів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тема дисертаційних досліджень повністю відповідає пріоритетним напрямкам наукових програм державного та міжнародних рівнів. Відповідне дослідження проведено в лабораторії оптоелектроніки та геліоенергетики кафедри електроніки і комп'ютерної техніки Сумського державного університету. Робота виконана в рамках 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).

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дослідженні

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів забезпечується використанням сучасних методів дослідження матеріалів, таких як енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія, раманівська спектроскопія, сканувальна та просвічувальна електронна мікроскопія, рентгенівська дифрактометрія, фотолюмінесцентна спектроскопія та інші. Вивчення структурних, оптичних та електрофізичних властивостей зразків проводилося з використанням декількох методик, які доповнювали одна одну, що дозволило підвищити точність та надійність отриманих даних.

Використання різних методів дослідження дозволило отримати комплексне уявлення про характеристики зразків, що суттєво підвищило валідність та надійність результатів. Більшість висновків, наведених у роботі,

є добре обґрунтованими та представляють значний науковий інтерес. Отримані дані показують високу узгодженість між собою та добре корелюють з результатами, отриманими іншими дослідниками.

Додатково до цього, було проведено детальний аналіз впливу різних фізико-технологічних факторів на характеристики плівок, що дозволило більш глибоко зрозуміти механізми їх росту та структуроутворення. Це дозволило розробити рекомендації щодо оптимізації технологічних процесів для досягнення кращих характеристик матеріалів. Таким чином, результати дослідження мають не тільки теоретичне, але і практичне значення, оскільки можуть бути використані для вдосконалення процесів виготовлення сонячних елементів, сенсорів, елементів гнучкої електроніки та інших приладів на основі досліджуваних матеріалів.

Наукова та практична цінність дисертації та новизна результатів

Наукова значимість роботи полягає у вирішенні наукової проблеми шляхом комплексного підходу до розробки інноваційних методів створення сонячних елементів та елементів гнучкої електроніки. Це досягнуто за рахунок використання методів друку з використанням спеціально розроблених чорнил, що містять суспензії наночастинок. Основні наукові досягнення автора включають наступне:

1. На основі наночастинок оксидних (ZnO, ZnO:Al, CuO) та сульфідних (SnS) сполук синтезованих у екологічно безпечних розчинниках створені чорнила з контрольованими характеристиками. Використовуючи створені наночорнила, методами розпилення та 3D друку при різних фізико-технологічних умовах, були одержані та досліджені одно- та багат шарові плівкові структури на скляних і гнучких поліімідних підкладках з оптимальними розмірами областей когерентного значення, низьким рівнем мікродеформацій і керованою стехіометрією, придатних для приладового використання.

2. Визначено фізико-технологічні умови отримання однофазних високотекстурованих і суцільних плівок CuO на скляних та гнучких підкладках методом друку. Також встановлено оптимальні параметри термічного післяростового відпалу, які покращують текстуру плівок, видаляють органічні домішки та забезпечують контрольовану зміну їх фазового складу з CuO до Cu₂O.

3. Реалізовано п'ять різних варіантів синтезу наночастинок бінарної сполуки Sn_xS_y шляхом поліольного синтезу та осадження у водно-амоніачному розчині з різними осаджувачами (CH₃C(S)NH₂, Na₂S, CS(NH₂)₂), які дозволяють одержувати практично однофазні наночастинок сполуки SnS або SnS₂.

4. Виключно хімічними методами створені прототипи SE на основі багат шарової структури ITO/ZnO(1ат.%Al)/*n*-ZnO/*p*-CuO, які відпалювалися у вакуумі в широкому діапазоні температур (573-773) К. Оптимізовано характеристики прототипу, шляхом дослідження його структурних, субструктурних, оптичних, фотоелектричних та електричних властивостей.

Практична цінність отриманих результатів

Практична цінність одержаних автором результатів полягає у визначенні автором оптимальної конструкції сонячних елементів третього покоління на основі оксидних (ZnO, ZnO:Al, CuO) та сульфідних (SnS) сполук. Також, автор модифікував екструдер 3D принтера, який може слугувати прототипом для створення промислового технологічного варіанту пристрою для нанесення плівок напівпровідників з контрольованими властивостями для застосування в мікроелектроніці, гнучкій електроніці та фотоперетворювальній техніці. Автор розробив методики та виявив особливості синтезу наночастинок і нанесення плівок ZnO, ZnO:Al, CuO, SnS з наперед заданими характеристиками, вони можуть бути використані для подальшого вдосконалення приладів геліоенергетики та гнучкої електроніки в промисловому масштабі.

Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати наукового дослідження Євдокименка В. Ю. опубліковані у 19 наукових працях, з яких 3 статті у зарубіжних наукових періодичних виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus та Web of Science) та належать до кuartилів Q1 - Q2, 3 статті у матеріалах Міжнародних наукових конференціях, що індексуються наукометричною базою Scopus, 13 тез доповідей.

У всіх публікаціях Євдокименка В. Ю. детально і повністю розкрито основні наукові положення, результати та висновки дисертації. Наукові положення та результати досліджень, отримані автором, пройшли апробацію на різних рівнях і були обговорені на наукових конференціях як національного, так і міжнародного масштабу.

У опублікованих звітних матеріалах, що з'явилися в ході дослідження, ретельно викладено основні результати дисертації, що відповідає 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 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44.

Оцінка змісту дисертації, відповідність встановленим вимогам щодо оформлення

Дисертаційна робота Євдокименка В. Ю. є завершеною та ґрунтовною науковою працею. Її структура, мова та стиль викладу, а також оформлення повністю відповідають вимогам, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року. Крім того, робота вирізняється логічністю та послідовністю викладення матеріалу, що сприяє легкому сприйняттю та розумінню представлених наукових результатів. Докладний аналіз та обґрунтування висновків підкреслюють високий рівень

дослідницької діяльності автора, а відповідність усіх складових роботи встановленим стандартам забезпечує її наукову та практичну цінність.

Зауваження до проведеного дисертаційного дослідження

1. У роботі реалізовано кілька різних варіантів синтезу наночастинок бінарної сполуки Sn_xS_y , за якими параметрами вибирали підходящий синтез для перетворювачів сонячної енергії?

2. Поясніть механізм фазового переходу від SnS до SnS_2 , а потім до SnO_2 за різних температур, особливо чому фаза SnO_2 утворюються в атмосфері аргону?

3. У роботі, як при дослідженні CuO так і при дослідженні SnS , автор вказує, що ці сполуки мають прямі та непрямі міжзонні переходи і при цьому в кожному матеріалі є декілька значень ширини забороненої зони, чим це пояснюється?

Однак наведені вище зауваження не мають принципового характеру та не знижують загальної цінності отриманих у дисертації результатів, їх практичної доцільності, та не ставлять під сумнів достовірність та обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист.

Загальна оцінка роботи, її відповідність встановленим вимогам

У цілому дисертаційна робота Євдокименка В. Ю. «Оптимізація характеристик наночастинок та плівок сполук CuO , ZnO:Al , SnS для перетворювачів сонячної енергії» є завершеною науковою працею, що спрямована на отримання нових науково обґрунтованих теоретичних та експериментальних результатів, які в сукупності є значними для поліпшення розвитку ефективних електронних пристроїв з високою продуктивністю для технічного розвитку країни. Дисертаційна робота повністю відповідає вимогам п. 6-9 «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, а дисертант Євдокименко Владислав Юрійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Офіційний опонент:

завідувач кафедри мікро- та наноелектроніки

Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»

доктор технічних наук, професор

Роман ЗАЙЦЕВ

