

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, доктора фізико-математичних наук, професора,
професора кафедри прикладної математики та моделювання складних систем
Сумського державного університету **Гончарова Олександра Андрійовича**
на дисертаційну роботу **Кахерського Станіслава Ігоровича**
на тему: «Структурні, субструктурні та оптичні характеристики
наночастинок і плівок сполук NiO, ZnO, $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$, отриманих
методом 3D друку», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора
філософії за спеціальністю 15 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Актуальність теми дисертаційної роботи

У наш час значний інтерес проявляється до гнучкої електроніки завдяки можливості її застосування при створенні дисплеїв, сенсорів, датчиків, сонячних елементів (СЕ), термогенераторів тощо. У подальшому це забезпечить розробку недорогих, ефективних, прозорих та гнучких електронних приладів різного застосування.

Однією із найбільш важливих проблем сучасної електроніки є також розвиток сонячної енергетики. Для забезпечення низьких витрат на виготовлення приладів гнучкої електроніки та геліоенергетики потрібне застосування дешевих функціональних матеріалів та низькоенергетичних технологій. У наш час запропоновано ряд нових матеріалів поглинальних шарів СЕ (наприклад, $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$), які є більш перспективними для реалізації низької вартості приладів, ніж шари CdTe та $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$, оскільки вони виготовляються із використанням широко поширених у земній корі та недорогих при видобутку хімічних речовин. Важливим також є те, що всі складові елементи цих сполук нетоксичні. Завдяки таким особливостям СЕ на основі нових сполук відносяться до третьої генерації приладів.

Широке застосування у приладах мікро- та оптоелектроніки знаходять такі оксиди металів, як ZnO, NiO, оскільки вони є стійкими в атмосфері та можуть бути одержані з використанням великої кількості технологічно

простих і дешевих методів. Найбільше використання з них здобув оксид цинку. Це зумовлено його унікальними хімічними, електричними та оптичними властивостями, а також завдяки радіаційній і термічній стабільності в атмосфері та нетоксичності.

Наноструктури та плівки NiO знайшли ряд важливих новітніх застосувань в оптиці, оптоелектроніці, біомедицині, сенсориці тощо. Так, цей оксид розглядається як перспективний матеріал для розробки прозорих гнучких приладів на основі гетеропереходів, оскільки це один з небагатьох хімічно стабільних широкозонних матеріалів ($E_g = (3,6-4,0)$ eV), що має *p*-тип провідності. Однак наночастинки та плівки кестеритних і оксидних сполук, нанесені друком, у наш час вивчені недостатньо.

Таким чином, тема дисертаційної роботи пов'язана з оптимізацією конструкції SE на основі гетеропереходів *n-ZnO/p-Cu₂ZnSn(S_xSe_{1-x})₄* та визначенням оптимальних фізико-технологічних умов нанесення робочих шарів кестеритних і оксидних напівпровідників для створення приладів геліоенергетики та гнучкої електроніки за допомогою 3D друку є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота Кахерського С.І. 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 та гранту НАТО, в яких Кахерський С.І. брав участь як виконавець (№ 0116U002619 (2018-2020 рр.) «Отримання та оптимізація властивостей плівок напівпровідників (ZnO, Cu₂ZnSn(S,Se)₄ і металів (Ag, Cu), надрукованих на 3D-принтері, для пристроїв електроніки» та № 0119U100398 (2021-2023 рр.) «Керування структурно-фазовим станом наночастинок і плівок нових оксидних матеріалів, нанесених хімічними методами, для потреб гнучкої електроніки і геліоенергетики») та відповідальний виконавець (№ 0119U100398 (2019-2021

pp.) «Синтез та оптимізація властивостей СЕ на основі ГП $n\text{-ZnO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSn(S, Se)}_4$, отриманих методом друку з використанням наночорнил»; грант НАТО SPS Project 5916 (2021-2022 р.) «3D printed functional elements for flexible electronic devices»).

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дослідженні

Дисертація Кахерського С.І. відзначається високим науково-методичним рівнем та використанням сучасного комплексу методів дослідження. Потрібно зазначити, що отримані результати, основні положення та висновки дисертації є науково обґрунтованими. Достовірність результатів підтверджується апробованими методами як експериментального, так і теоретичного характеру. Основні наукові висновки, що викладені в дисертації, логічно випливають з отриманих результатів і мають належне обґрунтування.

Основні наукові положення та результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на численних міжнародних конференціях та симпозіумах, а також опубліковані в високореєтингових наукових міжнародних та фахових виданнях. Про достовірність одержаних результатів свідчить їх узгодженість між собою та відповідність літературним даним.

Оцінка новизни наукових результатів дисертаційного дослідження

Серед найбільш вагомих результатів, що складають **наукову новизну** роботи, на мій погляд, слід відзначити наступні:

1. Уперше запропоновано новий спосіб поліольного синтезу наночастинок сполуки $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$. Підібрано оптимальні умови синтезу наночастинок та молярне співвідношення компонентів у прекурсорі, що становить 2:1,5:1:4. Це дало змогу синтезувати нанокристали, що мають однофазну структуру кестеритного типу та склад близький до стехіометричного.

2. З використанням суспензій наночастинок $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ низькотемпературним методом 3D друку одержані плівки з контрольованими характеристиками. Це дало змогу спростити процес нанесення плівок твердих розчинів за рахунок відмови від відпалу зразків $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, зменшити собівартість синтезу.

3. Установлено фізико-технологічні умови отримання методом друку однофазних високотекстурованих та суцільних плівок ZnO , NiO , $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ з оптимальними розмірами ОКР (L), низьким рівнем мікрODEформацій, мікронапружень, густиною дислокацій та керованою стехіометрією, придатних для приладового використання.

Практична цінність отриманих результатів

Ряд результатів одержаних в дисертації має безумовну практичну цінність. Серед них наступні.

1. Розрахунки оптичних втрат світла, в приладах на основі гетеропереходу $n\text{-ZnO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ із контактами $n\text{-ITO}(\text{ZnO})$ дозволяють оптимізувати конструкцію СЕ третього покоління.

2. Створений лабораторний принтер та інжектор принтера можуть стати прототипом для створення промислових установок нанесення плівок кестеритних та оксидних сполук різного хімічного складу з контрольованими властивостями для приладового використання в мікроелектроніці, гнучкій електроніці та геліоенергетиці..

3. Установлені взаємозв'язки між фізико-технологічними умовами синтезу наночастинок і нанесення плівок $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$, NiO , ZnO та їх елементним складом, структурними, субструктурними, оптичними характеристиками будуть використані в подальшому для створення приладів гнучкої електроніки та геліоенергетики із покращеними характеристиками.

Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати дисертації Кахерського С.І. опубліковано у 24 працях, з яких 4 статі у журналах, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science Core Collection, 1 стаття у фахових виданнях України, 6 статей у матеріалах Міжнародних наукових конференціях, що індексуються наукометричною базою Scopus, 12 тез доповідей та 2 патенти на корисну модель.

В усіх опублікованих статтях Кахерським С.І. ґрунтовно та в повному обсязі висвітлені основні наукові положення, результати та висновки викладені в дисертації. Наукові положення, що отримані дисертантом, проходили апробацію на різних рівнях, обговорювалися на наукових конференціях як національного, так і міжнародного рівня.

Таким чином, виклад основних результатів дисертації в опублікованих працях є повним та достатнім, що відповідає вимогам п. 8 «Порядку присудження ступеня доктор філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії».

Оцінка змісту дисертації, відповідність встановленим вимогам щодо оформлення

Дисертаційна робота Кахерського С.І. є закінченою науковою роботою, що містить нові, обґрунтовані результати. За структурою, мовою та стилем викладання оформлення дисертації відповідає вимогам, затвердженими МОН України.

Зауваження до проведеного дисертаційного дослідження

Дисертаційна робота виконана на достатньо високому рівні, загальне враження від роботи позитивне, однак у ході розгляду виникли деякі зауваження та дискусійні питання, а саме:

1. Завеликий обсяг дисертаційної роботи (216 сторінок), як для

дисертації доктора філософії Це пов'язано з великою кількістю експериментів. Ряд досліджень є однотипним для класу сполук, що вивчаються, і бажано було їх групувати по методам.

2. Висновки по розділам повинні бути більш конкретними, що призвело б до їх зменшення.

Водночас, вищезазначені зауваження носять дискусійний характер і не впливають на наукову цінність та загальний позитивний висновок щодо виконаного дисертаційного дослідження. Вони викликані актуальністю тематики та загальним науково-практичним інтересом до цього дослідження.

Загальна оцінка роботи, її відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота Кахерського Станіслава Ігоровича на тему: «Структурні, субструктурні та оптичні характеристики наночастинок і плівок сполук NiO , ZnO , $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$, отриманих методом 3D друку» є завершеним самостійним науковим дослідженням, що носить як теоретичну новизну, так і практичне застосування. Вона характеризується актуальністю та затребуваністю тематики дослідження, впровадженням отриманих результатів та методико-теоретичних положень.

Дисертація цілком 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 автор роботи – Кахерський Станіслав Ігорович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Рецензент:

професор кафедри прикладної математики та моделювання складних систем

Сумського державного університету

доктор фізико-математичних наук, професор

Олександр Гончаров

