

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, кандидата фізико-математичних наук, доцента, доцента кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету **Шабельника Юрія Михайловича** 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 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Актуальність теми дисертаційної роботи

У приладах мікро- та наноелектроніки, включаючи прилади геліоенергетики та гнучкої електроніки, в останній час широке застосування знаходять оксиди металів, оскільки вони є стійкими в атмосфері та можуть бути одержані з використанням великої кількості технологічно простих та дешевих методів. Так, оксид цинку (ZnO) у наш час розглядають альтернативою традиційному матеріалу прозорих струмопровідних шарів електронних приладів ІТО. Перспективним матеріалом для розробки гнучких та прозорих електронних приладів на основі гетеропереходів є оксид нікелю (NiO), оскільки це один з небагатьох хімічно стабільних широкозонних матеріалів з дірковим типом провідності. Плівкові гетеропереходи $p\text{-NiO}/n\text{-ZnO}$ можуть бути використані для розробки портативних ультрафіолетових та газових детекторів, прозорих у видимому світлі, фотоперетворювачів, тощо. Ці гетеропереходи завдяки можливості орієнтованого росту складових шарів можуть мати властивості близькі до ідеальних.

Для забезпечення високих експлуатаційних характеристик електронних приладів плівки оксиди (NiO, ZnO) та кестеритні сполуки (наприклад, $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$), повинні мати однофазну кристалічну структуру з великими розмірами областей когерентного розсіювання, низьким рівнем мікрореформацій, мікронапружень, малою концентрацією дислокацій та контрольованим елементним складом. Покращення структурних і оптичних характеристик цих шарів, їх низька вартість досягаються у наш час за

рахунок оптимізації фізико-технологічних умов нанесення плівок дешевими невакуумними методами. Серед таких методів нанесення плівок приладового призначення особливу увагу останнім часом привертає 3D друк, оскільки він є досить простим, ефективним, відносно дешевим, безвакуумним способом отримання тонких плівок великої площі із контрольованими властивостями.

В той же час наночастинки та плівки оксидних і кестеритних сполук, отримані методом 3D друку, на цей час вивчені недостатньо. Таким чином, проблематика, пов'язана з оптимізацією конструкції фотоперетворювачів на основі гетеропереходів $n\text{-ZnO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ та визначенням оптимальних фізико-технологічних умов нанесення робочих шарів електронних приладів для геліоенергетики та гнучкої електроніки на основі плівок NiO, ZnO і $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ із контрольованими структурними, оптичними властивостями, фазовим та хімічним складом за допомогою 3D друку є актуальною, а результати досліджень у мають велике практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, 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 та гранту НАТО, в яких Кахерський С.І. брав участь як виконавець (№ 0116U002619 (2018-2020 рр.) «Отримання та оптимізація властивостей плівок напівпровідників (ZnO , $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$ 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 рр.) «Синтез та оптимізація властивостей SE на основі ГП $n\text{-ZnO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S, Se})_4$, отриманих методом друку з використанням наночорнил»; грант НАТО SPS

Project 5916 (2021-2022 p.) «3D printed functional elements for flexible electronic devices»).

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дослідженні

Дисертаційне дослідження Кахерського Станіслава Ігоровича відзначається високим науково-методичним рівнем та використанням сучасного комплексу методів дослідження. Основні наукові положення та висновки, які викладені в дисертації, логічно випливають з отриманих результатів і мають належне обґрунтування.

Результати експериментальних та теоретичних 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.

Оцінка новизни наукових результатів дисертаційного дослідження

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

1. Уперше проведено визначення оптичних втрат енергії у фотоперетворювачах з конструкцією скло/*n*-ITO(ZnO)/*n*-CdS/*p*-Cu₂ZnSn(S_xSe_{1-x})₄/тильний контакт та різним складом поглинального матеріалу.

2. Уперше запропоновано новий спосіб поліольного синтезу наночастинок сполуки Cu₂ZnSnSe₄. 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.

3. З використанням суспензій наночастинок Cu₂ZnSn(S_xSe_{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.

4. Установлено фізико-технологічні умови отримання методом 3D 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 мікродеформацій, мікронапружень, густиною дислокацій та керованою стехіометрією, придатних для приладового використання.

Практична цінність отриманих результатів

В дисертаційному дослідженні зроблено наступне.

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 фотоперетворювачів 3-го покоління.

2. Створений лабораторний принтер та головка для нього можуть стати прототипом для промислового технологічного процесу нанесення плівок сполук оксидів металів та твердих розчинів кестеритних сполук різного хімічного складу з контрольованими властивостями для приладового використання в мікроелектроніці та фотоперетворювальній техніці.

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

Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях

Вивчивши опубліковані наукові праці здобувача, варто відмітити, що основні результати наукового дослідження Кахерського С.І. опубліковано у 24 працях, з яких 4 статі у журналах (з них 3 в журналах, що мають квартали Q2-Q3), 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 працях Кахерським С.І. ґрунтовно та в повному обсязі висвітлені основні наукові положення, результати та висновки дисертації. Наукові положення та результати досліджень, 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», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Оцінка змісту дисертації, відповідність встановленим вимогам щодо оформлення

Дисертаційна робота Кахерського С.І. має закінчений змістовий обсяг наукової праці. За структурою, мовою та стилем викладання оформлення дисертації відповідає вимогам, затвердженими МОН України, наказ № 40 від 12.11.2017.

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. Автор роботи формулюючи вимоги до поглинальних шарів сонячних елементів стверджує, що вони повинні бути однофазними, однак в синтезованих ним наночастинках і плівках сполуки $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ методом Рамана (рис. 5.4) виявляються сторонні фази Cu_xS , $\text{Cu}_x\text{Sn}_y\text{S}_z$. Так досяг автор поставленої мети чи ні? На скільки сильно вплине присутність цих фаз на характеристики приладів.

2. Потребує додаткового пояснення звідки у плівках NiO відпалених

при температурі 573 К (рис.5.1) з'являється гідроксид нікелю $\text{Ni}(\text{OH})_2$.

3. На деяких рисунках наведених в дисертації (рис.5.3, 5.4, 5.8 та ін.) використано дуже мілкий шрифт, що утруднює сприйняття інформації. В деяких випадках на рисунках зустрічаються написи англійською мовою.

Водночас, вищезазначені зауваження носять дискусійний або технічний 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:

доцент кафедри електроніки, загальної та
прикладної фізики

Сумського державного університету

кандидат фізико-математичних наук, доцент

Юрій ШАБЕЛЬНИК

