

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к. ф.-м. н., доцента Дроздова Антона Миколайовича
на дисертаційну роботу Шепотька Євгенія Миколайовича
**«Гнучкі термоелектричні, трибоелектричні і п'єзоелектричні приладові
структури на основі наноструктурованих шарів напівпровідників і
біополімерних нанокompозитів»**

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

1. Актуальність теми та зв'язок з науковими планами і програмами

Розробка гнучких портативних автономних датчиків та генераторів електроенергії є нагальним перспективним напрямком. В основі таких пристроїв лежить ідея генерації електричних сигналів під час довільних та мимовільних рухів людського тіла внаслідок механічного дотику, тиску або руху. Відповідно саме цьому особливий інтерес становлять носимі трибоелектричні наногенератори та сенсори на основі волокна, пряжі та текстилю. В даній дисертаційній роботі у якості енергогенеруючого матеріалу використано наноструктуровані шари оксиду цинку (ZnO), в яких поєднані трибоелектричний та п'єзоелектричний ефекти, що безумовно є привабливою їх особливістю. Розробка носимих малопотужних термоелектричних генераторів на основі біосумісного напівпровідника йодиду міді (CuI) також є важливою й цікавою складовою даного дисертаційного дослідження.

Самостійний інтерес представляє технологія створення функціональних покриттів. Можливість застосування відносно простих та економічних рідиннофазних хімічних методів, а саме послідовної адсорбції та реакції іонних шарів (SILAR) і мікрохвильового гідротермального методу для їх виготовлення безумовно є їх важливою перевагою.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертацію виконано відповідно до наукової програми 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», яка була впроваджена на кафедрі мікро- та наноелектроніки Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики НТУ «ХП». Основні результати отримано під час виконання проекту конкурсу «Наука для зміцнення обороноздатності і національної безпеки України», який реалізується за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України «Технологія виготовлення термостабільної керамічної основи смугових фільтрів для систем сучасної радіокерованої техніки» (Номер державної реєстрації проекту: 2025.06/0063. Номер договору про надання грантової підтримки: 191/0063. Строк виконання проекту 01.08.25 – 15.12.26). У вказаній науково-дослідній роботі автор дисертації брав участь як виконавець.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Робота виконана на високому науковому рівні і містить наукову новизну. Серед отриманих результатів найбільш значущими є такі:

Розроблено фізико-технологічні засади виготовлення наноструктурованих шарів йодиду міді та оксиду цинку автоматичним методом послідовної адсорбції і реакції іонних шарів (SILAR) на поверхнях скла, гнучких синтетичних полімерних, біополімерних та nanoцелюлозних підкладок та на поверхнях текстильних нанокомпозитних підкладках із просоченими гідрогелями волокнами поліефірної, бавовняної тканин та nanoцелюлози різного походження.

Вперше досліджено й встановлено основні особливості формування морфології, хімічного складу, кристалічної структури й оптичних властивостей функціональних шарів оксиду цинку та йодиду міді, нанесених на поверхню гнучких (полімерних та текстильних) матеріалів.

Розроблено конструкції гнучких текстильних трибоелектричних наногенераторів та автономних сенсорних датчиків, а саме приладові структури п'єзоелектричних/трибоелектричних одноконтактних сенсорів

вібрації із масивами нанострижнів та нанотрубок оксиду цинку на вуглецевій тканині. Вперше виготовлено експериментальні зразки приладових структур на базі сполук оксиду цинку та йодиду міді та досліджено їх вихідні характеристики.

4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання

Отримані результати мають актуальне практичне значення оскільки, по-перше, вони задовольняють потребу у необхідності мати фізико-технологічні засади для створення дешевих, компактних (носимих) та екологічно чистих генераторів енергії для живлення портативних приладів, сенсорів, засобів зв'язку і т.ін. Використання технології SILAR та застосування таких матеріалів як йодид міді та оксид цинку дозволяє значно зменшити вартість кінцевої продукції даного призначення. А використання текстильних матеріалів різного типу дозволяє надати таким приладам важливі переваги, такі як зручність для користувача та непомітність для зовнішнього спостерігача.

Практичні результати роботи захищено патентом України на корисну модель № 159678 («Спосіб виготовлення текстильного п'єзоелектричного/трибоелектричного наногенератора із двохелектродною сандвічевою конструкцією». Опубл. Бюл. № 26 від 25.06.2025)..

5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором.

За результатами дисертаційної роботи опубліковано 9 статей у наукових фахових виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus. Результати досліджень обговорювалися на 10 міжнародних та всеукраїнських конференціях (2 тези доповідей з яких індексуються в базі Scopus). Загалом матеріали даного дисертаційного дослідження представлені у 20 наукових працях, в тому числі в 1 патенті України на корисну модель. Виходячи з вищесказаного можна стверджувати, що представлена дисертаційна робота є самостійним,

завершеним науковим дослідженням, результати якого мають вагоме наукове і прикладне значення в сфері розвитку портативної енергетики та сенсорної техніки.

6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Робота Шепотька Є. М. є завершеною науковою роботою, містить анотацію – українською та англійською мовами, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і два додатки.

Дисертаційна робота присвячена розробці ефективних термоелектричних, трибоелектричних і п'єзоелектричних приладових структур гнучких і текстильних електронних генераторів та сенсорів для живлення носимої електроніки і для автономного детектування механічних впливів, які побудовано на основі біосумісних тонких наноструктурованих шарів напівпровідникових матеріалів оксиду цинку і йодиду міді та з використанням біополімеру наноцелюлози.

Мета дисертаційної роботи полягає у виготовленні рідиннофазними хімічними методами наноструктурованих шарів напівпровідників і біополімерних нанокompatитів, дослідження їх кристалічної структури, морфології і фізичних властивостей, створення та дослідження гнучких термоелектричних, трибоелектричних і п'єзоелектричних приладових структур на їх основі.

Для досягнення поставленої мети автором було вирішено комплекс завдань фундаментального й прикладного характеру, які умовно можна поділити на три етапи:

1. Дослідження морфології, хімічного складу, кристалічної структури і оптичних властивостей функціональних шарів нанесених на підкладки різного типу.

2. Розробка конструктивного рішення для гнучких і текстильних п'єзоелектричних/трибоелектричних та термоелектричних генераторів

3. Створення тонкоплівкових гнучких термоелектричних, трибое/п'єзоелектричних приладових структур і дослідження їх функціональних властивостей.

Таким чином об'єктом дослідження стали гнучкі термоелектричні, трибоелектричні і п'єзоелектричні приладові структури на основі напівпровідникових наноструктурованих шарів оксиду цинку на поверхні волокон вуглецевої тканини та йодиду міді на поверхні підкладок із синтетичних полімерів, біополімеру наноцелюлози і текстильних наноцелюлозних нанокомпозитів.

Предмет дослідження – вплив технологічних параметрів рідиннофазних хімічних процесів на кристалічну структуру, морфологію, хімічний склад і фізичні властивості наноструктурованих напівпровідникових шарів оксиду цинку і йодиду міді та текстильних нанокомпозитів і біополімерної наноцелюлози на кінцеві функціональні властивості гнучких термоелектричних, трибоелектричних і п'єзоелектричних приладових структур на їх основі.

У першому розділі автором представлено детальний огляд та аналіз наукової літератури сучасного стану досліджень в сфері малих енергогенераторів, а саме гнучких, в тому числі й текстильних енергозбиральних пристроїв для портативних носимих пристроїв. Особливу увагу автор приділяє питанням доступності, нетоксичності, біосумісності та технологічності масового виробництва матеріалів для п'єзоелектричних і трибоелектричних наногенераторів. На основі проведеного аналізу автор обґрунтовує перспективність використання наноструктурованих шарів оксиду цинку як функціонального матеріалу п'єзо- та трибоелектричних наногенераторів, та йодиду міді для створення гнучких і текстильних термоелектричних генераторів.

Щодо технології формування функціональних шарів автор стверджує, що з урахуванням таких факторів як екологічність та паритетна вартість кінцевого виробу прості у реалізації рідиннофазні методи осадження нетоксичних і біосумісних матеріалів можуть скласти конкуренцію

вакуумним технологіям. Проте автор також доходить висновку, що кінцева функціональність та ефективність отриманих пристроїв є багатопараметричною функцією в першу чергу від конструктивного рішення пристрою та технологічних режимів виготовлення функціональних шарів. Тому досягнення мети даного наукового дослідження потребує комплексного підходу, в якому вирішуються як наукові так і інженерно-конструкторські задачі.

У другому розділі автор описує застосовані рідиннофазні методи виготовлення напівпровідникових шарів — автоматичний метод SILAR і мікрохвильовий гідротермальний синтез. Перелічує застосовані сучасні методи дослідження хімічного складу, кристалічної структури, морфології поверхні, оптичних властивостей. Наводить схеми розроблених ним конструкторських рішень для гнучких трибо/п'єзо- та термометричних генераторів та сенсорів, а також виготовленого ним устаткування для тестування експериментальних зразків.

В третьому розділі дисертації автор наводить результати досліджень трибоелектричних наногенераторів і сенсорних датчиків на основі наноструктурованих шарів оксиду цинку, нанесених на вуглецеву тканину методом SILAR. Автором виявлено якісну зміну в морфології сформованих шарів залежно від наявності чи відсутності зародкового шару на поверхні підкладки, що впливає на трибоелектричні характеристики пристроїв. Виявлено два морфологічних типи: нанострижні, та переплетені нанолисти.

Основним результатом є виготовлення та тестування експериментальних зразків гнучких двохелектродних трибоелектричних наногенераторів і сенсорів із композицією CF/ZnO/PET/ITO. Конструктивною особливістю розробленого дизайну є відсутність додаткових конструктивних елементів завдяки використанню природної шорсткості та пружності використовуваного текстилю.

Четвертий розділ присвячено розробці автономних п'єзоелектричних/трибоелектричних сенсорів на основі масивів нанострижнів

та нанотрубок оксиду цинку, вирощених мікрохвильовим гідротермальним методом на вуглецевій тканині.

Автором було виявлено сильну залежність морфології та відповідно властивостей наноструктур оксиду цинку від часу перебування зразків в реакторі під час охолодження розчину.

За результатами випробувань встановлено зростання ефективності п'єзо/трибоелектричних наногенераторів зі збільшенням питомої поверхні наноструктурованих масивів оксиду цинку і тому нанострижні ZnO виявилися більш перспективними для використання у всіх типах гібридних п'єзо/трибоелектричних наногенераторів. Значення чутливості, отримані в цій роботі, знаходяться на тому ж рівні або перевершують найкращі сучасні аналоги.

П'ятий розділ присвячено дослідженню термоелектричних елементів на основі наноструктурованих плівок йодиду міді, осаджених методом SILAR на гнучких підкладках різного типу.

Досліджено широкий спектр матеріалів, які використовувалися в якості основи для носимих наноенергогенеруючих приладів: синтетичні полімери, біополімери, nanoцелюлоза, поліефірний та бавовняний текстиль. Встановлено, що незалежно від матеріалу підкладки, при температурах розчинів 20-25°C методом SILAR утворюються масиви нанолусочок CuI, а у розчинах, нагрітих до 30°C утворюються (111)-текстуровані нанокристалічні масиви йодиду міді.

Показники багаторазових механічних випробувань на згин, розтягування, стискання та гідрофобні властивості термоелектричного текстилю дозволили автору стверджувати про його придатність для використання як комфортного матеріалу, що контактує зі шкірою людини.

Отримані коефіцієнти Зеєбека в діапазоні 100–131 мкВ/К та густини вихідної потужності до 15,6 мкВт/см² при перепаді температур 50 К є серед найвищих для сучасних гнучких і текстильних термоелектричних матеріалів.

Великі коефіцієнти термоелектричної потужності та вихідної потужності у п'ять або більше разів перевищують відповідні показники, ніж існуючих текстильних термоелектричних матеріалів.

Висновки, які сформульовано в роботі, узагальнюють і підсумовують результати дослідження згідно завданням дисертації. В цілому, висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Список використаних джерел містить 175 джерел включаючи значну кількість публікацій у провідних міжнародних виданнях у напрямку теми дисертаційного дослідження, що відображає опрацювання сучасної наукової літератури світового рівня у достатньому обсязі

Додатки містять список публікацій здобувача та акт впровадження результатів дисертаційного дослідження.

7. Достовірність отриманих результатів та висновків

Достовірність отриманих результатів забезпечена поставленими метою та завданнями, комплексним підходом до вивчення визначених об'єктів, використанням сучасних експериментальних і аналітичних методів дослідження: рентгенівською дифрактометрією, скануючою електронною мікроскопією, енергодисперсійною рентгенівською спектроскопією, раманівською спектроскопією та спектрофотометричним аналізом, а також відтворюваністю отриманих результатів та їх відповідністю до існуючих загально відомих теоретичних уявлень.

8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях

Дисертація виконана з дотриманням вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Загалом матеріали даного дисертаційного дослідження представлені у 20 наукових працях, до яких входить в тому числі 1 патенті України на корисну модель. Апробацію отриманих результатів здійснено шляхом активної участі автора у 10 міжнародних та всеукраїнській наукових конференціях, дві доповіді з яких також індексуються в базі Scopus.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Доцільним було б дослідження змін у часі, які можуть відбуватися в кристалічній структурі, фізичних властивостях і вихідних параметрах приладових структур на основі наноструктурованих напівпровідникових шарів.
2. Доцільним було б дослідити здатність до біорозкладання термоелектричного матеріалу із композиту наноцелюлози, йодиду міді і бавовняної тканини, наприклад, під впливом цвілевих грибів, які культивуватимуться шляхом занурення матеріалу в спеціалізоване поживне середовище, наприклад, в Агар Сабуро з декстрозою.
3. Загалом, проблематика дисертаційного дослідження вимагає подальшої розробки, в тому числі задля подолання зазначених зауважень та недоліків, що однак не знижує оригінальності та самоцінності проведеної роботи.

10. Висновки

Дисертаційна робота Шепотька Є. М. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 10 – «Природничі науки» та спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та високу практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Шепотька Євгена Миколайовича «Гнучкі термоелектричні, трибоелектричні і п'єзоелектричні приладові структури на основі наноструктурованих шарів напівпровідників і

біополімерних нанокompозитів» відповідає вимогам 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам автор, Шепотько Євген Миколайович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Рецензент – кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри мікро- та нанoeлектроніки
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

14.04.2026

