

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу

**Ліневича Ярослава Олексійовича**

на тему «Нанорозмірні кремнієві одновимірні структури для сенсорів фізичних і хімічних величин»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування  
за спеціальністю 153 – Мікро- та наносистемна техніка

### **Актуальність теми дисертації.**

Актуальність дисертаційного дослідження зумовлена гострою потребою сучасної сенсорики у нових матеріалах, здатних забезпечити великий стрибок у характеристиках приладів. Традиційні сенсорні матеріали часто мають обмеження щодо чутливості, швидкодії, селективності та можливостей мініатюризації. Використання кремнієвих нанониток відкриває шлях до подолання цих обмежень завдяки їх унікальним фізико-хімічним властивостям, зумовленим нанорозмірними ефектами, зокрема, надзвичайно високому співвідношенню площі поверхні до об'єму. Це дає змогу суттєво підвищити чутливість сенсорів. Крім того, кремній є технологічно сумісним з існуючими технологічними процесами мікроелектроніки, що спрощує інтеграцію, а сенсори на основі кремнієвих нанониток часто можуть працювати за кімнатних температур, на відміну від аналогів. Таким чином, дослідження технологій створення кремнієвих нанониток та їх модифікації для сенсорів є надзвичайно актуальним напрямом розвитку мікро- та наносистемної техніки.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Систематично досліджено та вперше кількісно описано вплив параметрів процесу метало-стимульованого хімічного травлення (типу підкладки, концентрації реагентів, часу обробки) на статичні (відгук, чутливість) та динамічні (час відгуку, час відновлення) характеристики сенсорів на основі кремнієвих нанониток.
2. Запропоновано та реалізовано новий підхід до покращення характеристик сенсорів – структурну модифікацію поверхні масиву кремнієвих нанониток за допомогою ізотропного та анізотропного травлення, та встановлено її вплив на параметри сенсорів.



3. Вперше проведено порівняльне дослідження впливу хімічної модифікації поверхні кремнієвих нанониток різними вуглецевими наноматеріалами (фулерени, вуглецеві нанотрубки, графен) на характеристики сенсорів фізичних та хімічних величин, визначено вплив природи та кількості модифікатора.
4. Розроблено та досліджено метод структурно-хімічної модифікації поверхні масиву кремнієвих нанониток, що дало змогу досягти суттєвого покращення значення відгуку та швидкодії сенсорів порівняно з немодифікованими аналогами та відомими світовими аналогами.

Обґрунтованість отриманих результатів і висновків підтверджується використанням сучасного вимірювального обладнання, коректністю застосованих методик дослідження морфології та електричних характеристик. Достовірність результатів підкріплена їхньою апробацією на наукових форумах та публікаціями у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі мікроелектроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках НДР № 2301/2-п «Екологічно безпечні технології перероблення недеревної рослинної сировини у наноцелюлозні композиційні матеріали для органічного пакування і зеленої гнучкої електроніки» (2020–2022 рр) та ініціативної наукової теми № 0123U105274 «Органічно-неорганічні гібридні структури для електронних сенсорів» (2023–2025 рр) під керівництвом доцента кафедри мікроелектроніки, кандидата технічних наук, доцента Коваль Вікторії Михайлівни.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання встановлення впливу технологічних параметрів створення нанониток та їх модифікації на характеристики сенсорів фізичних і хімічних величин виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Ліневича Я. О. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 153 – Мікро- та наносистемна техніка та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Мікро- та наносистемна техніка».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Нові речовини і матеріали».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Ліневича Ярослава Олексійовича є результатом самостійних досліджень



здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора порушення академічної доброчесності не виявлено.

### **Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 221 сторінка.

Результати проведених досліджень представлені структуровано, послідовно із використанням загальноприйнятої термінології для напрямку дисертаційних досліджень та дотриманням переважно наукового стилю написання.

У вступі чітко окреслено актуальність теми дослідження, наведено стан проблеми у вітчизняній та зарубіжній науці, визначено мету, завдання, об'єкт, предмет, наукову новизну, практичне значення та особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено огляду літератури щодо методів створення кремнієвих нанониток, а також їх застосування у сенсорах фізичних і хімічних величин. Виклад подано послідовно: спочатку подано класифікацію наноструктур, далі розглянуто методи отримання кремнієвих нанониток, а потім – аналіз їхнього використання в сенсориці. Наведено висновки до розділу.

У другому розділі детально описано розроблено технологію створення масиву кремнієвих нанониток методом метало-стимульованого хімічного травлення та виготовлення на їх основі резистивних сенсорів. Представлено дослідження морфології нанониток і встановлено вплив параметрів вихідної підкладки, хімічного складу розчинів і тривалості травлення на характеристики сенсорів. Стил викладу чіткий, технічні терміни використано коректно, виклад підкріплений результатами вимірювань.

Третій розділ містить опис технології виготовлення діодних сенсорів з  $p-n$  переходом на основі кремнієвих нанониток. Проаналізовано вплив параметрів їх синтезу на характеристики приладів. У висновках наведено порівняння отриманих діодних сенсорів з резистивними/ємнісними аналогами.

Четвертий розділ присвячено дослідженню впливу структурної, хімічної та комбінованої модифікації поверхні масиву кремнієвих нанониток на параметри сенсорів на їх основі. Визначено вплив природи та кількості модифікатора, а також виду додаткового травлення на параметри розроблених приладів.

У п'ятому розділі подано результати прикладного використання розроблених сенсорів – у сенсорах дихання, сенсорах запаху та сенсорах диму.



Матеріал розділу чітко структурований, а також подано порівняння характеристик приладів для різних видів модифікацій. Зроблено висновки щодо оптимальних конфігурацій сенсорів для конкретних застосувань.

Розділ «Основні наукові та практичні результати і висновки» стисло та чітко узагальнює основні результати дисертації. У Додатках наведено таблиці параметрів сенсорів, список публікацій за темою дослідження, а також вказано особистий внесок здобувача.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Наукові результати дисертації висвітлені у 16 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 7 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 5 статей у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 3 статті у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports. Також результати дисертації були апробовані на 3 наукових фахових конференціях.

Наукові публікації автора за темою дисертації пройшли належну процедуру рецензування та перевірки на плагіат у фахових виданнях України та міжнародних наукових журналах, що свідчить про високий рівень академічної культури дослідника. Публікації охоплюють основні результати дисертаційної роботи, а особистий внесок здобувача у кожен з них є суттєвим і достовірно відображений.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Є зауваження щодо якості оформлення ілюстративного матеріалу у дисертації (графіків, діаграм тощо). Зокрема використовуються різні типи та розміри шрифтів для підписів осей, легенд та вставок на різних графіках (наприклад, рис. 2.5, рис. 2.8, рис. 3.3, рис. 4.9 тощо). Також присутні неперекладені з англійської мови текстові елементи на рисунках в літературному огляді та основній частині роботи.
2. У дисертації наводиться опис виготовлення металевих контактів до розроблених сенсорних структур (Ti/Ni та Al), однак відсутнє обґрунтування вибору саме цих металів для різних шарів даних структур та не зазначено вид сформованого контакту (омічний чи випрямляючий). Відсутність такого обґрунтування залишає відкритим



питання щодо можливого впливу використаних контактів на вимірювані характеристики сенсорів.

3. При описі сенсорів аміаку зазначено: «Принцип дії резистивного датчика базується в зміні опору приладу при зростанні концентрації аналіту.» А також, «Принцип роботи ... датчика (прим. – на базі польового транзистора) полягає в зміні струму каналу при зростанні концентрації аналіту.» Проте не вказано, як саме змінюється опір резистивного датчика та струм каналу при збільшенні концентрації аміаку.
4. В оглядовій частині (розділ 1) немає єдиної системи визначення чутливості датчиків. Для сенсорів етанолу це  $R_g/R_a$ , для сенсорів аміаку (резистивні датчики на основі КНН) –  $(R_g - R_a)/R_a \times 100\%$ , а також для цих же сенсорів (на основі КНН модифікованих поліпіролом) –  $(R_g - R_a)/R_a$ , де  $R_g$  – опір за наявності газу,  $R_a$  – опір за відсутності газу. Для деяких сенсорів, наприклад, перекису водню, взагалі не наведено формули для визначення чутливості датчика.
5. У висновках до 3-го розділу написано: «Порівняння резистивних та діодних сенсорів між собою показало...». У роботі не наведено порівняння параметрів цих типів сенсорів. Самі параметри наведені, але у різних розділах. Варто було б навести порівняльну таблицю.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

#### **Висновок про дисертаційну роботу.**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Ліневича Ярослава Олексійовича на тему «Нанорозмірні кремнієві одновимірні структури для сенсорів фізичних і хімічних величин» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань Автоматизація та приладобудування. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «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 р. № 44.



Здобувач Ліневич Ярослав Олексійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 153 – Мікро- та наносистемна техніка.

**Рецензент:**

Доцент кафедри мікроелектроніки,  
факультету електроніки,  
Національного технічного  
університету України  
«Київський політехнічний  
інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
кандидат технічних наук, доцент

