

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу

**Малюти Сергія Васильовича**

на тему «Особливості застосування нанотехнологій зондової мікроскопії в діагностиці та направленій модифікації поверхонь напівпровідникових наноструктур і 2D матеріалів»,

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

### **Актуальність теми дисертації.**

Метод сканувальної зондової мікроскопії є одним із найчастіше використовуваних методів для дослідження матеріалів та структур. Проте отримання деяких кількісних характеристик поверхні (електричних, магнітних) є утрудненим і за допомогою сканувальної зондової мікроскопії можна здійснити лише їх якісну оцінку. Це значно обмежує використання даного методу для всебічного дослідження нових матеріалів.

У дисертаційній роботі автор розробив підходи до СЗМ досліджень таких важливих для електроніки матеріалів, як вуглецеві плівки, синтетичні напівпровідникові алмази та епітаксійні структури GeSn/Ge/Si. З огляду важливості вказаних матеріалів для застосування в електроніці, а також з урахуванням системності розроблених автором підходів, вважаю, що тема даної роботи є актуальною.

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

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Застосована методика атомно-силової спектроскопії для оцінки сенсорних властивостей на основі аналізу сили адгезії маж вістрям зонду мікроскопу та поверхнею нанопористих вуглецевих плівок для експрес-контролю технологічних процесів їх отримання.
2. На основі СЗМ-даних оптимізовано параметри селективного травлення напівпровідникових монокристалів алмазів для виявлення особливостей їх дислокаційної структури на нанорівні. Встановлено закономірності зміни густини дислокацій вздовж осі росту. Виявлено ефекти декорування дислокацій домішками.
3. Оптимізовано методики силової Кельвін-зонд мікроскопії та сканувальної мікроскопії опору розтікання для характеристики локальних



електрофізичних особливостей міжсекторальних границь та окремих дислокацій і кластерів домішок на поверхні пластин напівпровідникових синтетичних алмазів.

4. Встановлено, що міжсекторальні границі є когерентними без скупчення дислокаційних дефектів. Ядра дислокацій дуже слабо, у порівнянні з границями секторів, проявляють електричну активність при картографуванні сканувальною мікроскопією опору розтікання. В потенціалі поверхонь дислокації не проявляються.
5. Показано, що завдяки бездефектності міжсекторальні границі забезпечують різкі границі поверхневого потенціалу з перепадом порядку 1 В, що може бути використано при розробці структурних елементів електронних приладів.
6. Виявлено і пояснено немонотонні зміни приведенного модуля пружності плівок GeSn в залежності від зміни вмісту олова.
7. Виявлено ефект зміни типу провідності мікрониток GeSn під дією електричного поля зонду.
8. Відкрито і пояснено механізм утворення нанониток GeSn із значним вмістом олова.
9. Показано можливість керованої модифікації типу провідності каналу на поверхні плівок GeSn електричним полем зонду.

Достовірність наукових результатів забезпечується значною кількістю експериментальних досліджень, проведених сучасними методами. Наведені у роботі наукові положення, висновки та практичні рекомендації повністю обґрунтовані, базуються на фактичних даних, які представлені у роботі в табличному та графічному вигляді. Інтерпретацію отриманих результатів проведено з використанням сучасних методів обробки інформації.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі мікроелектроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського із використанням технологічних можливостей лабораторії «Комплекс скануючої зондової мікроскопії» Центру колективного користування науковим обладнанням НАН України при Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України з урахуванням пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки до 2020 року (Закон України Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки 11 липня 2001 року №2623-III, Редакція від 16.01.2016), згідно переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року (Постанова Кабінету Міністрів України від 23 серпня 2016 року №556), згідно середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності загальнодержавного рівня на 2017-2021 роки, в рамках програми «Розвитку



пріоритетних досліджень НАН України» на 2019-2023 роки, за підтримки гранту Національного фонду досліджень України № 2020.02/0160 та за часткової підтримки міжнародного гранту U.S. Civilian Research & Development Foundation (CRDF Global) FSA3-20-66707-0 а також конкурсу Національного фонду досліджень України «Підтримка досліджень провідних та молодих учених». Назва проекту: «Розробка нових складів розчинників вуглецю для вирощування монокристалів алмазу в області термодинамічної стабільності з контрольованим вмістом домішок азоту і бору з метою створення концепційних конструкцій електронних приладів». Наукові дослідження були виконані під керівництвом завідувача відділу № 11 Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова, кандидата фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника Литвина Петра Мар'яновича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання встановити функціонально значимі морфологічно-структурні особливості концепційних елементів приладів мікро- та наноелектроніки на базі вуглецевих матеріалів і станогерманидів з використанням відповідно адаптованого комплексу методів сканувальної зондової мікроскопії, 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 Малюти С. В. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Мікро- та наносистемна техніка».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Створення та застосування нанотехнологій і технологій наноматеріалів».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Малюти Сергія Васильовича 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.

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

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Матеріал викладено послідовно та доступно, науковим стилем мовлення із використанням сучасної загальноприйнятої термінології.



Дисертація складається з вступу, 5-ти розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 156 сторінок.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, описано стан розробки даної тематики у вітчизняній та зарубіжній науці, наведені зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, мета та завдання дослідження, об'єкт, предмет і методи дослідження, а також наукова та практична новизна отриманих результатів. Описано особистий внесок здобувача та представлена інформація щодо апробації результатів дисертації та публікацій.

У першому розділі проведено аналітичний огляд сучасних діагностичних методів, можливостей сканувальної зондової мікроскопії та характеристик і особливостей досліджуваних матеріалів, а саме: вуглецевих плівок, напівпровідникових синтетичних алмазів та епітаксійних напівпровідникових структур GeSn/Ge/Si. Наведено висновки до розділу.

У другому розділі описані технології СЗМ досліджень, такі як атомно-силова мікроскопія, атомно-силова спектроскопія, провідна атомно-силова мікроскопія, силова Кельвін-зонд мікроскопія, сканувальна мікроскопія опору розтікання та сканувальна ємнісна мікроскопія. Наведено висновки до розділу.

У третьому розділі запропоновано, реалізовано та випробувано спосіб контролю адгезивних властивостей поверхні сенсорних вуглецевих плівок методом АСМ. Показана ефективність плазмових обробок для направленої модифікації поверхні. Встановлені оптимальні параметри плазмових обробок параметрів нанорельєфу вуглецевих плівок для сенсорних застосувань. Наведено висновки до розділу.

У четвертому розділі описані особливості застосування нанотехнологій сканувальної зондової мікроскопії в дослідженнях напівпровідникових синтетичних алмазів. Наведені особливості дефектної структури граней {001}, {111}, {011} монокристалів *HPHT*-алмазу типу IIb. Досліджені особливості дефектної структури та електрофізичні властивості багатосекторних пластин напівпровідникового алмазу, а також морфологічні та електрофізичні особливості міжсекторальних границь. Наведено висновки до розділу.

У п'ятому розділі описані особливості застосування нанотехнологій сканувальної зондової мікроскопії в дослідженнях та модифікації епітаксійних структур GeSn. Описані наномеханічні дослідження тонкоплівкової структури GeSn. Пояснено виявлені немонотонні зміни приведенного модуля пружності плівок GeSn в залежності від вмісту олова. Описано виявлений ефект зміни типу провідності мікрониток GeSn під дією електричного поля зонду. Пояснено механізм утворення нанониток GeSn із значним вмістом олова.



У розділі Основні наукові та практичні результати і висновки наведено висновки по дисертації.

У Додатках наведено список публікацій здобувача за темою дисертації, розрахункові вольт-фарадні криві для різних рівнів концентрації легуючої домішки, калібрувальна крива та реконструйоване СЕМ зображення модельної поверхні для постійної та змінної напруг, диференціальні ємності областей різних рівнів легування, модельні калібрувальні криві кремнію n-типу та АСМ-зображення буфера Ge до вирощування плівки GeSn.

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: 4 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 4 статті у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports; 1 патент України на корисну модель.

Результати дисертації були апробовані на 8 наукових фахових конференціях.

Додатково результати дисертаційного дослідження висвітлені у 3-х наукових публікаціях, серед яких: 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Web of Science Core Collection, одна — у виданні, віднесеному до другого квартилю (Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Усі публікації здобувача мають високий науковий рівень. У жодній з публікацій не порушено принципи академічної доброчесності. Особистий внесок здобувача до всіх наукових публікацій, опублікованих зі співавторами та зарахованих за темою дисертації, є вагомим; до більшості — переважним.

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

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

1. Подекуди в тексті зустрічаються жаргонізми, наприклад, словосполучення «мікронні розміри» (правильно було б казати «мікрометрові розміри»). Також у назвах вимірювальних методик використовується прикметник «скануюча», хоча з точки зору українського правопису правильним є використання терміну «сканувальна».



2. У розділі 3 з допомогою вимірювальних методик зондової мікроскопії та статистичних методів досліджуються зміни властивостей поверхонь поруватих вуглецевих плівок в залежності від різних типів обробки. Проте, недостатнім є висвітлення власне технологій плазмохімічних обробок, у зв'язку з чим важко дати практичні рекомендації щодо їх покращення.
3. У розділі 4 проведено дослідження властивостей кристалів напівпровідникових синтетичних алмазів та підкладок, які було з них виготовлено. Проте, безпосередньо в роботі не наводяться конкретні приладові структури, які було виготовлено на їх основі.
4. У розділі 5 проведено дослідження механічних властивостей поверхні плівок GeSn на нанорівні. Автор зазначає, що "Сферичні індентори з оптимальним радіусом можуть забезпечити високу чутливість до властивостей поверхні...". Проте не наводить пояснення, як визначається оптимальний радіус індентора.
5. Також у розділі 5 зазначено, що поверхні плівок GeSn перед вимірюваннями "... були спеціальним чином очищені", але не вказаний склад очищувача, тому неможливо зробити висновок, чи не вступає очищувач у хімічну взаємодію із плівкою та чи не змінює її морфологію.
6. Також у розділі 5 не пояснено, чому в плівках із вмістом олова понад 12% спостерігається зменшення значення модуля пружності.

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 Малюти Сергія Васильовича на тему «Особливості застосування нанотехнологій зондової мікроскопії в діагностиці та направленій модифікації поверхонь напівпровідникових наноструктур і 2D матеріалів» 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 Малюта Сергій Васильович 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

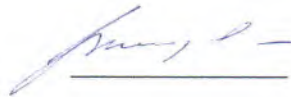


Юрій ДІДЕНКО

Підпис рецензента

к. т. н., доцента Ю. В. Діденка  
засвідчую.

Декан факультету електроніки  
Національного технічного  
університету України  
«Київський політехнічний  
інститут ім. Ігоря Сікорського»



Валерій ЖУЙКОВ



«21» грудня 2022 року