

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.

Скануюча зондова мікроскопія (СЗМ) була винайдена на початку 1980-х і одразу зайняла місце одного з головних інструментів як візуалізації та досліджень нанооб'єктів, так і атомної інженерії - створення нових експериментальних наноструктур та приладів. Скануючий зондовий мікроскоп є інструментом для отримання зображень і спектрів із широким динамічним діапазоном, профілів поверхонь з безпрецедентною 3-D роздільною здатністю. У ряді застосувань скануючі зондові мікроскопи можуть вимірювати фізичні властивості поверхонь, такі як провідність, розподіл статичного заряду, локалізоване тертя, магнітні поля, модулі пружності та інші.

В дисертаційній роботі розроблені та реалізовані методи характеризації нових перспективних матеріалів для оптоелектроніки, елементної бази квантових комп'ютерів та сенсорної електроніки: синтетичних напівпровідникових алмазів, модифікованих вуглецевих плівок та спітаксійних шарів станогерманидів із високим вмістом олова. Тема даної дисертації, присвяченої використанню методів СЗМ для дослідження електрофізичних параметрів таких матеріалів, впливу на їх структуру та властивості технологічних процесів, зокрема плазмової обробки є безумовно **актуальною**.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- 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;

- 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 дислокації домішками;

- оптимізовано методики силової Кельвін-зонд мікроскопії та скануючої мікроскопії опору розтікання для характеристики локальних електрофізичних особливостей міжсекторальних границь та окремих дислокацій і кластерів домішок на поверхні пластин напівпровідникових синтетичних алмазів;

- встановлено, що міжсекторальні границі є когерентними без скупчення дислокаційних дефектів. Ядра дислокацій дуже слабо, у порівнянні з границями секторів, проявляють електричну активність при картографуванні мікроскопії опору розтікання. В потенціалі поверхонь дислокації не проявляються;

- показано, що завдяки бездефектності міжсекторальні границі забезпечують різкі границі поверхневого потенціалу з перепадом порядку 1В, що може бути використано при розробці структурних елементів електронних приладів;

- виявлено і пояснено немонотонні зміни приведенного модуля пружності плівок GeSn в залежності від зміни вмісту олова;

- виявлено ефект зміни типу провідності мікрониток GeSn під дією електричного поля зонду;

- відкрито і пояснено механізм утворення нанониток GeSn із значним вмістом олова;

- показана можливість керованої модифікації типу провідності каналу на поверхні плівок GeSn електричним полем зонду.

Наукові положення, рекомендації та теоретичні висновки в дисертаційній роботі є достатніми і належними чином обґрунтованими, ілюстрованими за допомогою рисунків та таблиць. При їх одержанні автором проведені теоретичні та експериментальні дослідження, використані вітчизняні та зарубіжні літературні джерела.

Достовірність отриманих в роботі результатів, висновків та рекомендацій забезпечується використанням класичних методів досліджень, підтверджується застосуванням апробованих методик, постановкою експериментальних досліджень, що дозволило виявити ряд нових фізичних ефектів.

Експериментальні дослідження дозволили, з одного боку, встановити оптимальні параметри технологічних процесів оброблення вуглецевих плівок, напівпровідникових монокристалів алмазів та створення епітаксійних шарів станогерманидів із високим вмістом олова, а з іншого – виявити нові фізичні ефекти, важливі для практичного використання цих матеріалів при розробленні нових приладів наноселектроніки.

В цілому сукупність результатів досліджень є незаперчливою і узгоджується із сучасними теоретичними положеннями.

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 22 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». Дисертаційне дослідження проводилось під керівництвом завідувача відділу №1 І 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 елементів приладів мікро- та наноелектроніки на базі вуглецевих матеріалів і станогерманидів з використанням адаптованих нанотехнологій 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 співпадіння, 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.

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

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Текст дисертації характеризується смисловою завершеністю, доступністю викладення, цілісністю й логічною послідовністю. Дисертація написана з використанням сучасного наукового стилю, що склався в технічних науках та термінології, яка є прийнятою у науковому напрямку, до якого відноситься дисертація.

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

У вступі обґрунтована актуальність теми, наведені стан розробок даної тематики у вітчизняній та зарубіжній науці, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Сформульовані мета та завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, наукова та практична новизна отриманих результатів. Наведені відомості з апробації та публікації результатів дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

У першому розділі проведено аналітичний огляд сучасних діагностичних методів, можливостей скануючої зондової мікроскопії та характеристик і особливостей досліджуваних матеріалів. Сформульовані висновки до розділу.

У другому розділі проаналізовані технології СЗМ досліджень, таких як скануюча тунельна мікроскопія, атомно-силова мікроскопія та її похідні методики: провідна атомно-силова мікроскопія, силова Кельвін-зонд мікроскопія та електростатична мікроскопія. Наведені висновки до розділу.

У третьому розділі описані результати застосування нанотехнологій СЗМ в дослідженнях морфологічних та адгезивних властивостей нанопористих вуглецевих плівок. Наведена постановка задачі, матеріали та методи дослідження, досліджено особливості морфології пористих вуглецевих плівок. Методом атомно-силової спектроскопії отриманий енергетичний спектр адгезії вуглецевих плівок. Наведені висновки до розділу.

У четвертому розділі описані результати досліджень напівпровідникових синтетичних алмазів методами СЗМ. Наведені постановка задачі, матеріали та методи дослідження. Проаналізовані особливості дефектної структури граней

{001}, {111}, {011} монокристалів НРНТ-алмазу типу IIb, Досліджена дефектна структура багатосекторних пластин напівпровідникового алмазу та їх електрофізичні властивості, зроблені висновки до розділу.

У п'ятому розділі наведено результати досліджень характеристик та модифікації епітаксійних структур GeSn методами СЗМ. Описані наномеханічні дослідження тонкоплівкової структури GeSn, електронні та структурні особливості епітаксійних структур $\text{Ge}_{12}\text{Sn}_{88}/\text{Ge}/\text{Si}$, наноструктурні особливості мікрониток GeSn, інверсія типу провідності в сегрегованих мікронитках $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ на поверхні епітаксійної плівки. Сформульовані висновки до розділу.

Висновки по дисертації сформульовані в розділі Основні наукові та практичні результати і висновки.

Додатки містять інформацію щодо друкованих робіт здобувача із зазначенням особистого вкладу автора, а також додаткові результати розрахунків, моделювання та калібрування СЗМ зображень.

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 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 представлені на 8 наукових фахових конференціях.

Також опубліковано 3 статті, які додатково відображають результати досліджень, одна з яких у виданні, віднесеному до другого квартилю (Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports, інші дві — у періодичних наукових виданнях проіндексованих у базах WoS та Scopus.

Опубліковані праці здобувача мають високий науковий рівень, в них достатньо повно та всебічно описані головні наукові здобутки, що представлені в 3-5 розділах дисертації. У роботах, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок автора відображає зараховані за темою дисертації результати досліджень та не викликає сумнівів. В усіх публікаціях дотримуються принципи академічної доброчесності.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У меті дослідження (с. 22) помилково пропущене згадування про дослідження поверхонь монокристалічних алмазів.

2. У розділі 3 дисертації вказані режими відпалу вихідних зразків нанопористих вуглецевих плівок, але не наведені конкретні параметри технологічних процесів подальшої їх плазмової обробки у різних середовищах. Це утруднює формулювання рекомендацій щодо оптимізації режимів оброблення.

3. У розділі 4 досліджувались структурні та електрофізичні характеристики монокристалічних алмазних поверхонь для різних концентрацій акцепторної домішки бору і зазначено (с. 95-96), що отримані результати тісно пов'язані із оптимізацією технології отримання таких поверхонь для застосування в електронних приладах. Але не вказано яким чином.

4. Крім вольт-фарадних характеристик було б цікаво дослідити вольт-амперні характеристики переходів у станогерманидах: напощитка n-типу – епітаксійна плівка p-типу.

5. Іноді у тексті зустрічаються «жаргонні» терміни, наприклад «мікронних розмірів» (с. 3) (правильно мікрометрових); «наноідентування плівок» (с. 20).

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:

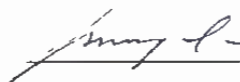
Професор кафедри мікроелектроніки,
факультету електроніки,
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний
інститут ім. Ігоря Сікорського»,
кандидат технічних наук, доцент



Анатолій ОРЛОВ

Підпис рецензента
к. т. н., доцента А.Т. Орлова
засвідчую.

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



Валерій ЖУЙКОВ



«08» 12 2022 року