

ВІДГУК

офіційного опонента 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.

Актуальність роботи Малюти С.В. обумовлено фундаментально-науковою та прикладною пріоритетністю досліджень та розробок сенсорних елементів, що базуються на наноструктурованих вуглецевих плівках в т. ч. модифікованих шляхом плазмової обробки, значному науковому інтересі до сканувально-зондових методик дослідження їхньої морфології та властивостей, незгасаючим інтересом до практичних застосувань технології синтезу напівпровідникових алмазів та до технологій вирошування збагачених станогерманидів. Така зацікавленість впливає з великої кількості сучасних наукових публікацій на вищезазначені теми в рецензованих зарубіжних та вітчизняних періодичних наукових виданнях та бажанні венчурних інвесторів вкладати кошти в комерціалізацію відповідних технологій.

Актуальність тематики роботи також підтверджується її зв'язком із науковими програмами, планами, темами. Зокрема, в дисертаційній роботі наведено перелік українських та міжнародних наукових програм в рамках яких було виконано дисертаційну роботу. Серед них пріоритетні напрямки 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), перелік пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року (Постанова Кабінету Міністрів України від 23 серпня 2016 року №556). середньострокові пріоритетні напрями інноваційної діяльності загальнодержавного рівня на 2017-2021 роки, програма «Розвитку пріоритетних досліджень НАН України» на 2019-2023 роки, грант Національного фонду досліджень України № 2020.02/0160, міжнародний грант U.S. Civilian Research & Development Foundation (CRDF Global) FSA3-20-66707-0.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Дисертаційна робота Малюти С.В. фіксує пріоритет в одержанні наступного ряду нових наукових результатів:

1) Розроблено методику вимірювання сил поверхневої адгезії наноструктурованих вуглецевих плівок на основі методу атомно-силової спектроскопії з використанням моделі механічних контактних взаємодій Джонсона-Кендалла-Робертса. Встановлено кореляційні залежності між параметрами плазмохімічних оброблень, характеристиками нанорельєфу та енергією адгезії вуглецевих плівок.

2) Засобами атомно-силової мікроскопії встановлено закономірності зміни густини дислокацій вздовж осі росту напівпровідникових монокристалів алмазів та в околі міжсекторальних границь. Виявлено ефекти декорування дислокацій фоновими домішками. Встановлено, що міжсекторальні границі є когерентними, без скупчення дислокаційних дефектів. Показано, що ядра дислокацій дуже слабо, у порівнянні з границями секторів, проявляють електричну активність при картографуванні контактним струмочутливим методом скануючої мікроскопії опору розтікання.

3) Виявлено немонотонні зміни приведенного модуля пружності плівок GeSn при зміні вмісту олова від 1 до 12%. Цей ефект пояснений особливостями перебігу процесів структурної релаксації при змінах товщини і компонентного складу плівок GeSn. Врахування нелінійності зміни модуля пружності при зміні компонентного складу є критично важливим в задачах деформаційної інженерії зонної структури GeSn для реалізації переходу непрямоzonний/прямоzonний напівпровідник. Виявлено ефект інверсії типу провідності мікрониток p-GeSn при прикладанні напруги зміщення між зондом мікроскопу та планарним омичним контактом на поверхні плівки Ge.

4) Виявлено самоіндуковане формування нанониток GeSn з вмістом олова понад 40%. Пояснено механізм їх утворення та проілюстровано їх локальні електрофізичні параметри струмочутливими методами зондової мікроскопії.

Дослідження виконано за допомогою цілого ряду сучасних взаємодоповнюючих експериментальних методик, таких як атомно-силова мікроскопія, атомно-силова спектроскопія, електропровідна атомно-силова мікроскопія, силова мікроскопія зонду кельвіна, сканувальна мікроскопія опору розтікання, сканувальна ємнісна мікроскопія. Взаємоузгодження результатів отриманих всіма цими методиками є вагомим індикатором достовірності результатів дисертації Малюти С.В.

Теоретичне та практичне значення роботи Малюти С.В. полягає у створенні можливості для рекомендацій покращення технології виготовлення сенсорів на основі нанопористих вуглецевих плівок та прототипів базових електронних приладів із використанням напівпровідникових синтетичних алмазів та епітаксійних плівок GeSn. Зокрема, результати роботи можуть бути використані в розробці прототипів перспективних транзисторних структур.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання 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 освітньої програми «Мікро- та наносистемна техніка».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Матеріали та прилади наноелектроніки».

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.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота Малюти С.В. є гарно структурованою. Кількість розділів та підрозділів тексту дисертації адекватно відображає суть проведених наукових досліджень та є оптимальною з точки зору комунікації одержаних результатів. Оформлення роботи є чітким та яскраво підкреслює найважливіші моменти, які необхідно донести до читача. Дисертацію написано грамотною фаховою українською мовою. Єдине зауваження до термінології пов'язане із використанням прикметника "скануюча" в назвах відповідних експериментальних методик, що є русизмом. З точки зору української орфографії правильним є термін "сканувальна", наприклад "сканувальна зондова мікроскопія".

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку літературних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації 156 сторінок.

У вступі розглядається актуальність дисертаційного дослідження, стан розробки тематики у вітчизняній та зарубіжній науці, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, мета та завдання дослідження, наукова та практична новизна отриманих результатів, об'єкт та предмет дослідження а також особистий внесок здобувача і відомості про апробацію результатів дисертації.

У першому розділі проведено аналітичний огляд сучасних діагностичних можливостей сканувальної зондової мікроскопії та характеристик і особливостей матеріалів, які досліджуються в рамках дисертаційного дослідження.

У другому розділі розглядаються практичні аспекти реалізації цілого ряду вимірювальних методик зондової мікроскопії, серед яких атомно-силова мікроскопія, атомно-силова спектроскопія, провідна атомно-силова мікроскопія, силова Кельвін-зонд мікроскопія, скануюча мікроскопія опору розтікання та скануюча ємнісна мікроскопія.

У третьому розділі розглядаються особливості застосування нанотехнологій сканувальної зондової мікроскопії для досліджень морфологічних та адгезивних властивостей нанопористих вуглецевих плівок.

У четвертому розділі розглядаються застосування нанотехнологій сканувальної зондової мікроскопії в дослідженнях напівпровідникових синтетичних алмазів.

У п'ятому розділі розглядається застосування нанотехнологій сканувальної зондової мікроскопії в дослідженнях та модифікації епітаксійних структур 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 віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports та проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus; 1 патент України на корисну модель.

Результати дисертації були апробовані 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.

Все це свідчить про те, що результати одержані здобувачем, пройшли надзвичайно ретельну фахову експертизу як в Україні так і на міжнародному рівні, і таким чином можуть вважатись обґрунтованими та достовірними.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

До фахового змісту дисертаційної роботи здобувача можна висловити наступні зауваження.

1) В розділі 3 наведено дуже мало інформації про процедуру нанесення вуглецевих плівок, а відтак і про їхні вихідні властивості (до плазмової обробки), такі як склад, кристалічна структура, концентрація домішок, товщина. Хоча, автор дає посилання, за яким можна дізнатися подальші деталі, ця інформація є потрібною безпосередньо в тексті розділу 3 для того, щоб зрозуміти, що саме і чому змінюється в оброблюваних вуглецевих плівках. На жаль, на атомно-силових зображеннях плівок до і після обробки важко помітити суттєві відмінності (принаймні в масштабі розмірів наведених зображень). Автор наводить параметри пор, що дійсно може бути важливим для сенсорних застосувань, проте зовсім немає детальних зображень пор, не проілюстровано як саме визначались їхні геометричні параметри. Відомо, що при реєстрації заглиблених особливостей морфології поверхні методами сканувальної зондової мікроскопії, велике значення відіграють ефекти форм-фактору вістря. Очевидно, що для більш точного визначення їхніх розмірів можна було б провести процедуру деконволюції із урахуванням відомої форми вістря, тим більше що, такі можливості були і автор згадує про це в методичній частині дисертації. На жаль цього зроблено не було і можна констатувати, що дослідження пор було б бажано зробити більш детальним. Також автор застосовує терміни “пористий”, “пористість” в той час як правильно в українській мові є вживання термінів “поруватий”, “поруватість” тощо.

2) В розділі 4 наводяться вольт-амперні характеристики одержані методом сканувальної мікроскопії опору розтікання. При цьому не вказано умов встановлення контакту між зондом та поверхнею, так як це зроблено в розділі 5, тобто чи це контактний чи напівконтактний режим атомно-силового мікроскопа, яка величина навантаження, чи змінюються вольт-амперні характеристики внаслідок змін умов контакту, чи є повторюваність вольт-амперної характеристики

після багатократних вимірювань. Наведені значення напруги та струму вказують на те, що не можна виключати плавлення речовини в області контакту. Бажаним було б наводити зображення відповідної ділянки поверхні до і після вимірювання вольт-амперних характеристик, але на жаль цього зроблено не було.

3) В розділі 5 наведено дослідження надзвичайно цікавих об'єктів а саме сегрегаційних нанониток на поверхні плівки сплаву германій-олово. Не дивлячись на те, що такі нитки становлять великий інтерес з точки зору загальної фізики твердого тіла та фізики поверхні, все ж є очевидним, що поверхні з такими нитками не придатні для технологічних застосувань в мікроелектроніці. На жаль в роботі не зроблено порівняльного дослідження поверхні плівок цього типу без сегрегації. Це дало б змогу бути впевненим в однорідності елементного складу по всій поверхні досліджуваного зразку, який міг би слугувати репером для вимірювання відповідних механічних та електричних характеристик. В той же час для зразків, досліджених в цьому розділі, такої впевненості немає, оскільки більшість речовини в них знаходиться на межі фазового переходу, тобто в сильно нерівноважних умовах, та й загалом характеризується сильними просторовими градієнтами концентрації хімічних елементів.

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 15 – 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.

Офіційний опонент:

Доцент кафедри квантової радіофізики
та наноелектроніки
факультету радіофізики,
електроніки та комп'ютерних систем,
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка
д. ф.-м. н.



Андрій ГОРЯЧКО

Підпис оф. опонента
д. ф.-м. н. А.М. Горячка
засвідчую.

Декан факультету радіофізики,
електроніки та комп'ютерних систем,
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка



Андрій НЕТРЕБА

М.П.

«02» 12 2022 року