

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Васька Артема Анатолійовича

“Трибологічні властивості наноструктурованих об’єктів на атомно-гладких поверхнях”,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка

Безупинний розвиток експериментальної і технологічної бази і водночас необхідність зменшення енергетичних втрат при роботі електронних пристроїв викликало потребу створення наноструктурованих об’єктів з передбачуваними електронними, трибологічними, змочувальними властивостями. Взаємодія цілої низки таких об’єктів з атомно-гладенькими чи шорсткими поверхнями в значній мірі залежить від їх форми та розмірів.

Величезна кількість робіт присвячена дослідженню саме інтерфейсної взаємодії наноструктурованих об’єктів і, зрештою, їх впливу на функціонально важливі електричні параметри пристроїв. Такими дослідженнями займається багато провідних наукових центрів і груп та, незважаючи на це, залишається широке коло ще не до кінця з’ясованих фундаментальних та технологічних питань. Серед них можна виокремити такі: руйнівні режими вимірювань, відсутність наномасштабного контролю стабільності нанооб’єктів в процесі вимірювань, невизначеність морфології поверхонь.

Дисертація Васька Артема Анатолійовича “Трибологічні властивості наноструктурованих об’єктів на атомно-гладких поверхнях” якраз присвячена дослідженню цих питань, що безсумнівно доводить актуальність цієї роботи. В дисертації вперше досліджувались трибологічні пари з визначеною в атомному масштабі геометрією контактуючих поверхонь.

Структурно дисертаційна робота Васька А.А. складається із анотації, вступу, двох оглядових розділів, трьох оригінальних розділів, висновків, переліку використаних джерел та чотирьох додатків.

У першому розділі автор робить огляд літературних джерел, в яких стисло розглядає питання, пов’язані з дослідженням інтерфейсів тертя на атомарному рівні зондовими методами сканувальної тунельної, атомно-силової та фрикційної мікроскопії. Детально розглянуто накопичений досвід щодо класичних теоретичних підходів та експериментальних методів дослідження інтерфейсної взаємодії. Окрім цього, автор стисло розглянув методи створення наноструктурованих об’єктів для трибологічних досліджень. Загалом, огляд заснований на використанні вичерпного на сьогоднішній день списку публікацій за тематикою дисертаційної роботи.

У другому розділі описано технології отримання наноструктурованих об’єктів та їх методи дослідження. Автором критично проаналізовано наявні методи отримання таких об’єктів та продемонстровано переваги розроблених та вдосконалених під час виконання дисертаційної роботи методів.

У третьому розділі автор запропонував цілковито оригінальну методику неруйнівного дослідження тертя за допомогою магнітного левітаційного

трибометра. Ця методика є новаторською, технологічно простою та водночас ефективною. Особливої уваги заслуговує процедура калібрування приладу, а саме знаходження моменту інерції  $I$  та параметру “жорсткості”  $K$  приладу. Знаючи ці параметри, автор отримав коефіцієнти тертя трибологічних пар сталь/алюміній та сталь/мідь, що збігаються із літературними даними. Важливі із практичної точки зору результати були отримані при визначенні неруйнівних режимів дослідження на прикладі відпаленої та невідпаленої поверхонь золота. Автором встановлено, що за однакових умов експерименту для невідпаленої поверхні золота процес вимірювання на початковій стадії є руйнівним, тоді як для атомно-гладенької поверхні він є неруйнівним.

Четвертий розділ містить матеріали досліджень структури пакування мастильних плівок, адсорбованих на атомно-гладеньких поверхнях золота та графіту, та їх трибологічних властивостей. Особливої уваги заслуговує реалізований у цьому розділі неруйнівний метод вимірювання коефіцієнтів тертя змащувальних плівок нормальних алканів. Більш того, стабільність таких плівок контролювалась за допомогою вимірювання вольт-амперних характеристик інтерфейсу тертя. Результати, отримані у такий спосіб, є новими важливими і служать своєрідною прикрасою роботи.

У п'ятому розділі автор представив цілковито оригінальну методику виготовлення наночастинок золота, яку потім було вдосконалено для отримання наночастинок із атомарно чистою поверхнею. Привертає увагу те, що такі наночастинки ростуть безпосередньо на атомно-гладеньких підкладках слюди та дисульфиду молібдену. Судячи з літератури, зараз відомо ряд способів утворення наночастинок золота з різними формою та розмірами. Однак спосіб, представлений здобувачем, є технологічно простим та ефективним. Варто відзначити, що для отримання наночастинок золота із чистою поверхнею автором проведено трибологічні дослідження цих наноструктур. Важливих результатів досягнуто при дослідженні сили тертя спокою нанопризм золота за допомогою методів атомно-силової мікроскопії та методом обертання підкладки, на якій адсорбовано частинку.

Загалом дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якому отримано науково обґрунтовані результати, які є суттєвими для розвитку нанотрибології та фізичної електроніки. Достовірність та надійність результатів забезпечена застосуванням взаємодоповнюючих експериментальних методик та багаторазовим відтворенням експериментальних результатів.

Проте при загальній позитивній оцінці роботи, в ній мають місце окремі неточності, а саме:

1. У тексті зустрічаються негрубі орфографічні та стилістичні помилки, зокрема трапляються позначення англійською мовою, які доцільно було б розшифрувати.

2. У 3-му розділі автор вказує, що згасаючі коливання в реальних умовах не є строго періодичними, посилаючись на роботу у співавторстві, в якій детально описано рушійні сили, що зумовлюють відхилення від періодичних коливань.

*Було б доречно уточнити еволюцію періоду коливань за умов сухого тертя та за наявності змащувальної плівки.*

*3. Не повністю зрозумілим залишається питання щодо адсорбції бінарної суміші молекул тетракозану та октатетраконтану, адже на рис. 4.5в (ст. 87) зображено три різні домени, тоді як автор вказує, що пріоритетний напрямок адсорбції молекул на поверхні графіту є напрямом  $\langle 100 \rangle$ . З іншого боку, різні домени можуть мати різні орієнтаційні фази пакування молекул, а саме паралельну та перпендикулярну орієнтацію молекул щодо підкладки. Доцільно дати чіткіше пояснення самовпорядкування молекул бінарних сумішей.*

Відмічені недоліки не знижують позитивну оцінку дисертаційної роботи Васька А.А., оскільки вони не змінюють висновків про достовірність, новизну, наукову та практичну важливість отриманих результатів.

Характеризуючи роботу в цілому, слід відмітити, що дисертація виконана на високому науковому та методологічному рівні і оформлена у відповідності до діючих вимог МОН. Автореферат повністю відповідає змісту дисертаційної роботи і розкриває основні її положення. Вважаю, що Васько Артем Анатолійович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,  
завідувач лабораторії оптоелектронних  
молекулярно-напівпровідникових систем  
Інституту фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,

Є.Г. Борщагівський

Підпис Є.Г. Борщагівського засвідчую:

Вчений секретар  
Інституту фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України  
доктор хім. наук

В.М. Томашик