

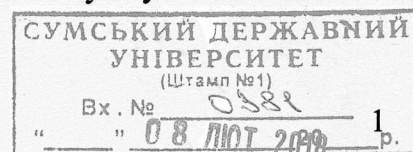
## Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу Рогоза Владислава Миколайовича „Фізико-механічні властивості та мікроструктура покриттів на основі нітриду ніобію, легованого Si та Al”, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Дисертаційна робота присвячена встановленню закономірностей формування покриттів на основі NbN з покращеними фізико-механічними властивостями в залежності від умов осадження та легування домішковими атомами Si та Al.

**Актуальність** теми дисертаційної роботи обумовлена тим, що в теперішній час особливо важливе значення має розробка нових матеріалів, які могли б експлуатуватись при екстремальних значеннях температури, тиску, швидкості, напружень, радіаційних потоків. Серед таких матеріалів найбільш перспективними є тугоплавкі метали, їх сплави, а також сполуки тугоплавких металів із неметалами – бором, вуглецем, азотом, кремнієм та ін. Особливий інтерес представляють сполуки металів з азотом, так звані нітриди, багато з яких проявляють високу вогнетривкість, діелектричні та напівпровідникові властивості, здатність переходити у надпровідний стан при відносно низьких температурах, високу хімічну стійкість в різних агресивних середовищах. Багато нітридів вже успішно використовуються в електроніці, атомній промисловості, сучасному машинобудуванні, металургії, електротехніці та інших галузях.

Сполуки таких перехідних металів, як Ti, Zr, Ta, Cr досліджуються досить давно в багатьох дослідних центрах та лабораторіях у всьому світі. Література по цих сполуках налічує багато сотень публікацій. В той же час, незважаючи на те, що сполука NbN має цілу низку корисних властивостей (таких як хімічна інертність, висока електропровідність, висока температура плавлення, хороші механічні властивості), що робить її перспективною для використання в якості катодів для польової емісії, в мікроелектроніці, мікромеханіці та інших галузях техніки, нітрид ніобію та інші сполуки на його основі вивчені в значно меншому ступені.



У зв'язку з цим дослідження, проведені в рамках представленої дисертаційної роботи, є актуальними та сучасними.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що в роботі вперше:

1. Досліджена поверхня, структурні та субструктурні характеристики, елементний склад та механічні властивості нанокompозитних покриттів NbN, Nb-Si-N та Nb-Al-N в залежності від технологічних умов їх осадження.

2. Встановлено особливості переходу від двофазного покриття ( $\delta$ -NbN+ $\delta'$ -NbN) до нанокompозитного покриття з аморфним прошарком між нанокристалітами ( $\delta$ -NbN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> та nc-NbN<sub>x</sub>/nc-(Nb,Al)N<sub>x</sub>/a-AlN) в результаті зміни концентрації легуючої домішки кремнію та алюмінію, відповідно.

3. Проведено математичне моделювання атомних конфігурацій та механічних властивостей гетероструктур  $\delta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(001),  $\epsilon$ -NbN(001)/Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>,  $\delta$ -NbN(111)/Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>. Виявлено, що найменш міцними виявилися гетероструктури  $\delta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(001) та  $\epsilon$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si<sub>2</sub>N<sub>3</sub>(001).

4. Проведено математичне моделювання оптимальних гетероструктур B1-NbN(001)/1 МШ B1-AlN та B1-NbN(001)/2 МШ B1-AlN, а також твердих розчинів B1-Nb<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N. Аналіз повних енергій гетероструктур та твердих розчинів показав, що B1-Nb<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N для  $x < 0.67$  повинні розпадатися, а критична концентрація домішки алюмінію спричиняє формування нанокompозитної структури, що складається з кристалітів B1-NbN та B1-AlN.

**Обґрунтованість та достовірність** отриманих автором експериментальних даних підтверджується комплексом використаних сучасних апробованих методів: скануючої електронної мікроскопії з енергодисперсійним аналізом, атомно-силової мікроскопії у напівконтактному режимі та голографічної мікроскопії, просвічувальної електронної мікроскопії, рентгенівської дифрактометрії, раманівської спектроскопії та рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, індентування, моделювання залежності механічних властивостей від структури досліджуваних систем з використанням граничних умов.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі наноелектроніки СумДУ у рамках наступних держбюджетних тем:

„Розробка основ формування надтвердих наноструктурних багатокомпонентних покриттів з високими фізико-механічними властивостями”, № держ. реєстрації 0112U001382.

„Розробка матеріалознавчих основ структурної інженерії вакуумно-плазмових надтвердих покриттів з метою досягнення необхідних функціональних властивостей”, № держ. реєстрації 0115U000682.

Дисертант приймав участь у проведенні зазначених держбюджетних тем як виконавець наукових досліджень. Дисертант проходив стажування по програмі Erasmus Mundus в університеті ім. Адама Міцкевича, де було проведено частину досліджень.

**Практичне значення одержаних результатів.** Одержані результати мають як фундаментальне, так і прикладне значення. Фундаментальне значення полягає у систематизації інформації щодо елементного та фазового складу, кристалічної будови, морфології поверхні, структурних, субструктурних і механічних характеристик покриттів NbN, Nb-Si-N, Nb-Al-N в залежності від технологічних умов осадження, що сприяє подальшому розвитку матеріалознавства в області нітридних багатокомпонентних покриттів. Прикладне значення полягає у визначенні оптимальних умов осадження плівок на основі нітриду ніобію для застосування їх в якості захисних покриттів на інструментах для механічної обробки (свердління, фрезерування, токарної обробки), штампування, карбування, лиття під тиском алюмінієвих сплавів. В той же час, з огляду на надпровідні властивості нітриду ніобію, результати дослідження можна застосовувати для створення надпровідних пристроїв, враховуючи наявність надпровідної фази  $\delta$ -NbN.

**Представлені в дисертаційній роботі результати** в повній мірі відображені в 9 статтях в спеціалізованих наукових журналах, та 7 трудах наукових конференцій.

**Зміст автореферату** ідентичний основним положенням дисертації. У ньому викладені мета та задачі дослідження, наукова новизна отриманих результатів, методики досліджень, основні результати та висновки. Автореферат оформлений належним чином.

### **Зауваження щодо дисертаційної роботи.**

1. У вступі, в меті дисертаційної роботи сказано: „дослідити перехід від двофазного... до нанокompatного стану покриттів”, тобто автор випереджує події і ще до проведення досліджень вже приводить структуру майбутніх покриттів.

2. В тексті дисертації автор використовує невдалі формулювання, такі як „перехідні нітриди”, „безвакуумна атмосфера”, „напруга на підкладці”, „інтерфейс”.

3. В ряді місць приведені скорочення, які ніде не розшифровуються.

4. Іноді невірно використовуються кристалографічні позначення площин та напрямків в структурі покриттів.

5. На спектрах РФЕС (рис. 3.5, 4.6) вказані сполуки, але не проведено розкладання піків основних рівнів на компоненти і не позначено, яким зв'язкам ці піки відповідають.

6. В дисертації наведені результати Раманівської спектроскопії, але вони ніяк не обговорюються і не співвідносяться з результатами, одержаними іншими методами.

7. В розділі 4.5 вказано, що „карта розподілу елементів підтверджує однорідний розподіл Nb та Si по всій глибині покриття”, але сама карта відсутня.

8. На електронограмі (рис. 4.11) приведені рефлекси тільки від однієї фази NbN, проте зроблено висновок про нанокompatний характер структури покриття.

9. На стор. 98 зроблено помилковий висновок про те, що збільшення твердості покриття спричинене його рекристалізацією при відпалі.

10. В дисертації неправомірно порівнюються значення твердості покриттів, одержані цілком різними методами: нанотвердість та твердість по Кнупу. Крім того, нанотвердість виміряна в залежності від глибини проникнення индентора, а твердість по Кнупу – від температури відпалу.

**Загальні висновки по роботі.** В цілому вважаю, що дисертаційна робота Рогоза В. М. є цільоспрямованим науковим дослідженням, яке виконане на високому науковому рівні та становить інтерес як у фундаментальному, так і практичному відношенні. В роботі набули розвитку фізичні уявлення про процеси структуроутворення в плівках на основі нітриду ніобію, які одержують магнетронним методом. Досліджено вплив умов осадження плівок та режимів

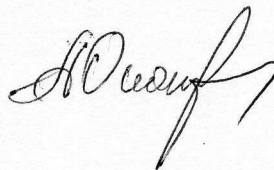
наступної термічної обробки, домішків алюмінію та кремнію на структурні, субструктурні і механічні характеристики плівок. Робота логічно побудована і має завершений вигляд.

Зроблені зауваження не знижують цінність одержаних у дисертаційній роботі результатів, не ставлять під сумнів їх достовірність та обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист, і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, яка цілком відповідає спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

**Висновок.** Дисертаційна робота „Фізико-механічні властивості та мікроструктура покриттів на основі нітриду ніобію, легованого Si та Al” за актуальністю, ступенем обґрунтованості наукових положень, фундаментальною та практичною цінністю, обсягом та рівнем одержаних результатів, повнотою їх викладення в опублікованих працях за висновками повністю відповідає вимогам ДАК МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор Рогоз Владислав Миколайович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

### Офіційний опонент

доктор фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник  
відділу фізичного матеріалознавства тугоплавких сполук  
Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича  
НАН України



Онопрієнко О.О.

Підпис Онопрієнко О.О. засвідчую:

Учений секретар ЦМ НАНУ

к. ф.-м. н.



Картузов В. В.