

## ВІДГУК

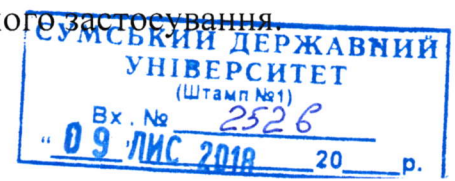
офіційного опонента на дисертаційну роботу Космінської Юлії Олександрівни «Процеси самоорганізації структурно-морфологічних характеристик та умов формування мікро- і наносистем», представленої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

### 1. Актуальність теми дисертації.

З огляду на нагальні вимоги сьогодення, пріоритетними у світовій практиці вбачаються наукові розробки, спрямовані на вивчення і пошук самоорганізованих фізичних, хімічних, біологічних та технологічних процесів, що забезпечують формування мікро- і наносистем. Відома лише обмежена кількість варіантів самоорганізованого росту структур при конденсації металів, напівпровідників і вуглецю на підкладинку методами PVD. Однак майже не досліджувалися процеси самоорганізації при конденсації слабколетких речовин за квазірівноважних умов. Інтенсивно проводиться пошук нових підходів до формування мікро- і наносистем металів у вигляді систем наночастинок і високопористих шарів унаслідок їх широкого використання як чутливих елементів біологічних і газових сенсорів тощо.

Водночас більшість усіх відомих варіантів експериментально отриманих структур конденсатів металів методами PVD, систематизованих за допомогою структурних зонних моделей (СЗМ) зводиться до суцільних плівок за тривалої конденсації. Традиційні уявлення про структуроутворення базуються в основному на даних, отриманих при відносно великих пересиченнях осаджуваної пари, а процеси самоорганізації при конденсації слабколетких речовин у квазірівноважних стаціонарних умовах майже не досліджувалися.

Тому дисертаційна робота Космінської Ю.О., яка присвячена встановленню закономірностей самозбірки нанорозмірних систем на прикладі Al, Ag, Cu, Ni, Ti та Si за умов близькорівноважної стаціонарної конденсації, а також розроблення математичних моделей, які описують ці процеси є актуальною з точки зору фундаментальних знань і практичного застосування.



## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами і темами.**

Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі наноелектроніки Сумського державного університету у рамках тем державного замовлення (бюджетних тем), а також державного фонду фундаментальних досліджень. У деяких темах Космінська Ю.О. була науковим керівником, в інших одним із виконавців роботи. Зміст робіт відповідає пріоритетним напрямкам науки і техніки, зокрема дослідженню закономірностей самозбирання низькорозмірних систем слабколетких речовин в самоорганізованих квазірівноважних стаціонарних умовах конденсації при дії низькотемпературної плазми на ростову поверхню у високочистому інертному середовищі.

## **3. Наукова новизна.**

До важливих наукових результатів слід віднести таке:

- самоорганізований ріст мікро- і наноструктур на підкладинці відбувається шляхом поатомної конденсації на активних центрах ростової поверхні при реалізації максимально міцних хімічних зв'язків із поверхнею та реалізується за умов підтримання стаціонарності квазірівноважної конденсації. Макроскопічним критерієм стаціонарності є незмінність у часі наднизьких значень пересичення, а мікроскопічним критерієм є стабільність положення критичної енергії  $E_c$  у спектрі можливих енергій зв'язку адатомів з ростовою поверхнею;
- при достатньо тривалій конденсації (30 хв – 10 год) квазірівноважне самозбирання дозволяє отримувати тривимірні сітки нанокристалів та високопористі шари різної архітектури, які виходять за межі відомих структурних зонних моделей та визначаються механізмами структуроутворення на основі взаємозалежних структурної та польової селективностей. Формування конденсатів зазначеного типу в умовах прояву структурної селективності зумовлено такою циклічною послідовністю процесів: 1) зародження та зрощування структурних фрагментів без вираженої коалесценції; 2) утворення областей з від'ємною кривизною в місцях зрощування структурних фрагментів, які можна розглядати як сукупність активних центрів для закріплення адатомів; 3) переорієнтація обмежених потоків конденсованої речовини в місця зрощу-

вання та повторна гомонуклеація нових структурних фрагментів, для яких повторюються зазначені процеси;

– запропоновано математичні динамічні моделі самоорганізації квазірівноважних умов на основі аналізу фізичних процесів масоперенесення й балансу енергій, а також стандартної синергетичної схеми. Методом фазової площини при двовимірному й тривимірному представленні фазових портретів показана самоорганізація наднизьких стаціонарних пересичень на рівні  $\sim 10^{-5}$ - $10^{-2}$ .

#### **4. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Вірогідність та обґрунтованість отриманих автором експериментальних даних підтверджена комплексом використаних сучасних апробованих методів аналізу структури, фазового та елементного складу отриманих конденсатів за допомогою просвічувальної та растрової електронної мікроскопії, а також рентгеноструктурного аналізу. Склад залишкової атмосфери в вакуумній камері досліджувалось методом квадрупольної мас-спектрометрії. Для аналізу математичних моделей використовувався метод фазової площини з двовимірним та тривимірним представленням фазових портретів, а диференціальні рівняння математичних моделей розв'язувалась числово за допомогою методів Рунге-Кутти.

#### **5. Повнота викладу наукових положень дисертаційної роботи.**

Результати роботи доповідались та обговорювались на міжнародних наукових конференціях і опубліковані у 62 публікаціях. Серед них: 8 статей у фахових виданнях України, 15 статей у спеціалізованих закордонних журналах, із яких 21 стаття індексується наукометричними базами Scopus та Web of Science Core Collection; 3 патенти України на винахід і патент України на корисну модель; 7 статей у матеріалах конференцій, з яких 6 індексуються наукометричною базою Scopus, а також 28 тез доповідей на наукових конференціях.

#### **6. Практична цінність отриманих результатів.**

Для досягнення квазірівноважних стаціонарних умов конденсації в дисертаційній роботі розроблено та запатентовано ряд розпоршувальних при-

строїв нового типу у вигляді накопичувальних іонно-плазмових систем (НПС) на основі модифікованого магнетронного розпорошення на постійному струмі з елементами порожнистого катоду та різною формою розпорошувальних мішеней. Реалізовано методику роботи розпорошувачів у високочистому інертному середовищі. Такий тип пристроїв є експериментальною реалізацією системи повної самоорганізації. Він дозволяє проводити осадження в прямих і обернених дифузійних потоках розпорошеної речовини при безпосередній дії плазми на ростову поверхню, що приводить до зниження енергії десорбції адатомів до ефективного значення, водночас взаємозалежні зміни температури ростової поверхні, потоків речовини та відносного пересичення осаджуваної пари носять самоорганізований характер і мають головним результатом підтримання наднизьких стаціонарних значень відносного пересичення. На відміну від відомих технологій запропонована методика дозволяє реалізувати близько рівноважної умови конденсації, за яких відбувається поатомна забудова ростової поверхні у вигляді різноманітних тривимірних структурно-морфологічних фрагментів, що може бути використано для створення широкого спектра різноманітних активних елементів у приладах мікро- та наноелектроніки, в сенсорах тощо.

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

1. Не запропоновано свій варіант структурної зонної моделі (СЗМ), яка відображала б подальшу еволюцію СЗМ з урахуванням отриманих у роботі нових даних, а приведено лише діаграму станів структур в координатах «тиск робочого газу – потужність розряду» для алюмінію.

2. Відсутні кількісні оцінки ступеня пористості та фрактальної розмірності структури конденсатів.

3. Деякі рентгенівські дифрактограми, наприклад, на рис. 6.13, 6.19 та інші, не супроводжуються табличними даними щодо міжплощинних відстаней та інтенсивностей дифракційних максимумів.

4. При аналізі процесів самоорганізації структуроутворення систем нанокристалів міді за розділом 4 не враховується ефект поляризації наноточок, про який, тим не менш, йдеться в літературному огляді.

5. У формулі 7.16 символом  $Q_s$  позначається прихована теплота конденсації, а в формулі 7.19 таким же символом  $Q_s$  позначається вже теплота сублимації графіту. Варто було б ці термодинамічні величини позначити різними символами.

6. На стор. 256. зазначено: «Дуговий розряд при зазначених вище умовах в основному підтримується за рахунок термопольової емісії електронів з катода.»

Це твердження, виходячи з аналізу публікацій є помилковим. В роботі J. Ng, Y. Raitses. Role of the cathode deposit in the carbon arc for the synthesis of nanomaterials // Carbon. – 2014. – Vol. 77. – P. 80 – 88., наприклад, стверджується, що катодний депозит при дуговому розряді має високу температуру і за рахунок термоелектронної емісії з нього забезпечуються електрони для струму дугового розряду. До того ж на стор. 258 дисертації також стверджується: «На поверхні катода відбувається конденсація іонів  $C^+$  і рекомбінація їх заряду. При цьому поверхня катода розігрівається.»

Якщо автор погоджується, що поверхня катоду розігрівається, то чому пропонується не враховувати термоелектронну емісію з нього?

7. В тексті дисертації зустрічаються описки: зокрема на стор. 76 «низько-температурної плазми», а треба «низькотемпературної плазми».

Однак, наведені недоліки не знижують цінності одержаних в дисертаційній роботі результатів не ставлять під сумнів достовірність і обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист і не впливають визначальним чином на загальну позитивну оцінку роботи.

### **Загальні висновки по роботі.**

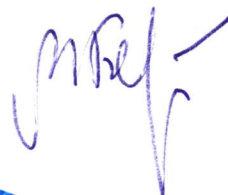
В цілому, вважаю що дисертаційна робота Космінської Ю.О. являє собою цілеспрямоване та завершене експериментальне й теоретичне дослідження, що виконане на високому науковому рівні та представляє інтерес як в науковому, так і в практичному відношенні. В дисертаційній роботі набули подальшого розвитку фізичні уявлення про механізми та закономірності самоорганізації структури та морфології мікро- та наноструктур Al, Ag, Cu, Ni, Ti, Si, отриманих на початкових етапах росту та після тривалого осадження

при наднизьких значеннях відносного пересичення осаджуваної пари при безпосередній дії плазми на ростову поверхню. Отримано спектр різних високопористих структурних форм конденсатів ієрархічної будови, що виходять за межі традиційних структурних зонних моделей для іонно-плазмового способу переведення речовини в паровий стан. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації, у якому викладені мета і задачі дослідження, наукова новизна отриманих результатів, методики досліджень, основні результати та висновки. Автореферат оформлений відповідним чином.

### **Висновок.**

Дисертаційна робота Космінської Юлії Олександрівни «Процеси самоорганізації структурно-морфологічних характеристик та умов формування мікро- і наносистем» за актуальністю, новизною отриманих результатів, їх достовірністю, практичною цінністю, повнотою викладу в опублікованих працях і висновками повністю відповідають вимогам до докторських дисертацій, зокрема пунктам 9, 10 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів» (Постанова Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013) а її автор Космінська Юлія Олександрівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук,  
професор, кафедри матеріалів  
реакторобудування та фізичних  
технологій Харківського  
національного університету  
імені В.Н. Каразіна



В. М. Береснев

Підпис Береснева В.М. засвідчую  
вчений секретар ХНУ імені В.Н. Каразіна



Н.О. Вінникова