

## Відгук

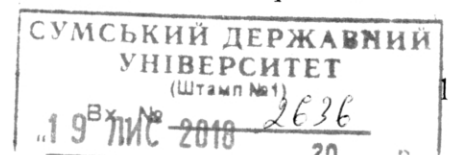
офіційного опонента на дисертаційну роботу Космінської Юлії Олександрівни „Процеси самоорганізації структурно-морфологічних характеристик та умов формування мікро- і наносистем”, представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Дисертаційна робота присвячена з'ясуванню і систематизації механізмів і закономірностей формування низькорозмірних систем Al, Cu, Ni, Ti та Si в самоорганізованих квазірівноважних стаціонарних умовах конденсації при дії низькотемпературної плазми на ростову поверхню.

**Актуальність** теми дисертаційної роботи обумовлена тим, що для керованого формування, прогнозування структури та властивостей плівкових матеріалів необхідне знання щодо закономірностей росту плівок, їх залежності від фізико-технологічних параметрів процесу. Процес формування плівок при гетерогенній кристалізації є багатостадійним і супроводжується фазовими, морфологічними, орієнтаційними, структурними та субструктурними перетвореннями. Закономірності протікання процесу та характер перетворень залежать від багатьох фізико-хімічних факторів. Однак результати численних експериментальних досліджень свідчать про те, що особливості гетерогенного зародження та росту плівок в різноманітних комбінаціях плівки та підкладки, в першу чергу, визначаються характером їх взаємодії на між фазній границі „підкладка-плівка”.

Різні механізми росту плівок передбачають свої особливості морфологічних, фазових, орієнтаційних та структурних перетворень, які відбуваються при формуванні плівки. Знання закономірностей та механізмів цих перетворень необхідно для керування процесом осадження плівок із наперед заданими структурними та субструктурними характеристиками, для розробки способів та визначення умов одержання плівок різних матеріалів із різними функціональними властивостями.

Актуальність досліджень в цьому напрямку обумовлена також незвичайними фізичними властивостями ансамблів малих металевих частинок, які взаємодіють як між собою, так і з електромагнітним випромінюванням, що може приводити за



певних умов до появи плазмонних резонансів, які підсилюють електромагнітне поле, збільшують переріз поглинання світла наночастинкою і викликають гігантське комбінаційне розсіювання світла. Це є важливим для розробки нових поглинаючих та розсіюючих матеріалів для потреб нанофізики, нанохімії, оптоелектроніки і плазмотроніки. В теперішній час також активно досліджуються можливості використання плазмонних наноструктур в біології та медицині.

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:

1. Вперше сформульована і доведена концепція систем повної самоорганізації, сутність якої полягає в тому, що дисипативна самоорганізація квазірівноважних стаціонарних умов конденсації приводить до консервативної самоорганізації росту низькорозмірних структур на підкладці, і ці два типи самоорганізації є взаємозалежні.

2. Створено новий клас самоорганізованих накопичувальних іонно-плазмових систем для розпилення речовини і осадження спектру мікро- та наноструктур в квазірівноважних стаціонарних умовах.

3. Вперше визначено систему факторів, що формують універсальні самоорганізовані квазірівноважні стаціонарні умови конденсації, які полягають у наднизькому значенні пересичення осаджуваної речовини, підтриманні постійного значення пересичення у часі, високій температурі ростової поверхні, наявності області накопичення осаджуваної речовини, зниженні енергії десорбції адатомів до ефективного значення за рахунок дії фізичних, хімічних або комбінованих фізико-хімічних факторів на поверхню росту.

4. Вперше визначено комплексну систему механізмів і закономірностей самоорганізації структури та морфології мікро- та наноструктур Al, Ag, Cu, Ni, Ti, Si, отриманих при наднизьких значеннях відносного пересичення осаджуваної пари при безпосередній дії плазми на ростову поверхню.

5. Вперше отримано високопористі конденсати металів ієрархічної будови у високотемпературній зоні структурних зонних моделей для іонно-плазмового способу переведення речовини в паровий стан.

6. Вперше запропоновано для математичного моделювання процесів

самоорганізації структурно-морфологічних характеристик та умов формування мікро- і наносистем при вакуумній конденсації використовувати підхід, який полягає у створенні напівемпіричної динамічної моделі у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь, спираючись на аналіз фізичних процесів переносу маси й енергії, з подальшим аналізом системи із залученням методу фазової площини з двовимірним або тривимірним представленням фазових портретів.

На основі узагальнення отриманих результатів можна виділити новий науковий напрям – *Фізика структуроутворення мікро- і наносистем при взаємопов'язаних дисипативній та консервативній самоорганізаціях.*

**Обґрунтованість та достовірність** отриманих автором експериментальних даних підтверджується комплексом використаних сучасних методів: рентгеноструктурного аналізу, просвічувальної електронної мікроскопії (ПЕМ), мікродифракції електронів, растрової електронної мікроскопії (РЕМ) з використанням рентгенівського енергодисперсійного мікроаналізу, ІК-Фур'є спектроскопії, квадрупольної мас-спектрометрії, математичного моделювання методом фазової площини з двовимірним та тривимірним представленням фазових портретів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі наноелектроніки Сумського державного університету в рамках наступних тем:

гранту Президента України для молодих вчених «Формування низькорозмірних систем металів, кремнію та вуглецю в умовах квазірівноважної стаціонарної конденсації» (№ держ. реєстрації GP/F32/083);

спільного українсько-німецького проекту «Формування мікро- та наносистем металів з вузьким розподілом розмірів та форми структурних елементів» (№ держ. реєстрації 0113U004331;

«Механізми формування універсальних сенсорів на основі анізотропних переходів  $ZnO/Cu_2O(CuO)$  у вигляді наносистем типу нейронні мережі» (№ держ. реєстрації 0116U0026202017 р.);

«Статистична теорія ієрархічних структур дефектів кристалічної будови» (№ держ. реєстрації 0109U001386);

«Формування мікро- та наносистем металів на основі взаємопов'язаних дисипативної та консервативної самоорганізації» (№ держ. реєстрації 112U001385);

«Селективні процеси при знижених коефіцієнтах стаціонарної конденсації» (№ держ. реєстрації 0107U001143).

Результати дисертаційної роботи використовуються при виконанні держбюджетної теми «Закономірності структуроутворення покриттів високоентропійних багатоеlementних систем на внутрішніх поверхнях труб малих діаметрів» (№ держ. реєстрації 0118U003573).

Здобувач приймала участь у зазначених проектах та темах як виконавець наукових досліджень.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розвинені в роботі методики отримання мікро- і наносистем можуть бути застосовані для подальших фундаментальних і прикладних досліджень для створення каталізаторів, надтонких фільтрів, мембран, елементів сенсорів, паливних комірок, сонячних елементів, систем доставки ліків та розчинів хімічних речовин. Конденсати з розвиненим рельєфом поверхні на основі металів з високою електропровідністю можуть бути застосовані для пристроїв на основі SEIRA та SERS ефектів. При використанні підкладок із упорядкованим розташуванням активних центрів закріплення адатомів можна сформувати упорядковані масиви металевих кристалічних наночастинок для застосувань наноплазмоніки на основі локалізованого плазмонного резонансу, наноманетизму, каталізу, детерміністичного синтезу нанотрубок та нанодротів. Отримані конденсати металів можуть бути в подальшому окислені для отримання мікро- і наносистем на основі пористих окислів для сенсорів та матеріалів з низькою діелектричною проникністю. Методика отримання ультратонкої аморфної фази може бути використана для зниження мінімальної товщини суцільних металевих покриттів на склі та полімерах.

Розроблений підхід до синтезу пористих металів можна розвинути далі для осадження пористого кремнію та матеріалів на його основі, для чого потрібно впровадити додаткові фактори наближення до рівноваги, наприклад, скомбінувати одночасно дію плазми і хімічні реакції формування летких сполук.

Фундаментальні закономірності структуроутворення в квазірівноважних стаціонарних умовах можуть бути застосовані для подальших наукових досліджень з метою з'ясування механізмів селективного росту інших наноструктур типу фулеренів та нанотрубок, для яких ці механізми досі чітко не визначені, або створення нових типів шляхом варіації степені наближення до рівноваги за допомогою різних фізичних або хімічних процесів.

Створені накопичувальні іонно-плазмові системи можуть бути застосовані для лабораторного синтезу різноманітних мікро- і наносистем в квазірівноважних стаціонарних умовах з високим рівнем відтворюваності структури і морфології. Фундаментальні закономірності роботи накопичувальних іонно-плазмових систем та елементи запропонованої їх практичної конструкції можуть бути використані для розробки і створення інших систем повної самоорганізації. Поряд із типом отримуваних структур, перевагою таких систем є спрощений контроль за технологічним процесом, зниження вартості та енерговитратності. Розроблений розпилювач стрижнів може бути використаний для подальших лабораторних досліджень по нанесенню багатокомпонентних високоентропійних захисних покриттів на внутрішні поверхні труб малих діаметрів в умовах, наближених до рівноважних.

Отримані знання, математичні моделі, методики та розроблені пристрої використовуються в навчальному процесі в Сумському державному університеті при підготовці бакалаврських та магістерських випускних робіт, а також при викладанні спеціальних дисциплін для студентів напрямів «Мікро- та наносистемна техніка», «Мікро- та наноелектроніка», спеціальності «Фізична та біомедична електроніка».

**Представлені в дисертаційній роботі результати** в повній мірі відображені в 62 публікаціях. Серед них: 8 статей в профільних виданнях України та 15 статей у спеціалізованих закордонних високореєтингових журналах; 3 патенти України на винахід та 1 патент України на корисну модель; 7 статей в матеріалах конференцій, а також 28 тез доповіді на наукових конференціях.

**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. Окрім згадування про те, що речовини, що досліджуються, є слабколетючими, вибір цих речовин з точки зору їх практичного застосування не обґрунтований.

2. Одним з можливих механізмів еволюції структури конденсатів вказується оствальдівське дозрівання. Цей механізм є непридатним, оскільки в роботі досліджується нестационарна система.

3. В першому розділі в підрозділах 1.4.2 та 1.4.3, що присвячені огляду відомих самоорганізованих механізмів росту, не вистачає для наочності зображень структур, про які йдеться. Це полегшило б порівняння відомих та одержаних в роботі результатів.

4. В підписах до деяких рисунків недостатньо інформації про об'єкти, що досліджуються :

а) рис. 4.10, 6.28, 6.29, 6.35 – не вказано, які це конденсати;

б) рис. 4.10 - підпис недостатньо чітко сформульовано.

5. Досить сумнівним є міркування про те, що атоми можуть набувати енергію  $\sim 100$  еВ та здійснювати імплантацію при потужності магнетрону  $\sim 5$  Вт.

6. На стор. 150 помилково вказано, що „збільшення радіусу кривизни сприяє підвищенню пересичення”.

7. Розділ 6.1 присвячений формування структур алюмінію, а на рис. 6.3 приведена залежність для міді.

8. Невдало використане позначення потужності магнетронного розряду та тиску робочого газу тією ж самою літерою.

**Загальні висновки по роботі.** В цілому вважаю, що дисертаційна робота Космінської Ю. О. 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 пористих та низькорозмірних систем при переході пари слабколетючих речовин в конденсований стан. Отримані результати роботи суттєво розширюють уявлення про структурні форми росту конденсатів, механізми

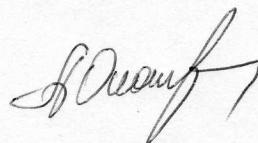
та закономірності їх формування за допомогою іонно-плазмових методів. На основі отриманого широкого експериментального матеріалу в роботі запропоновані фізичні та математичні моделі, які дозволяють описати ефекти поатомного самозбирання низькорозмірних систем слабколетючих речовин в самоорганізованих квазірівноважних стаціонарних умовах. Проведено узагальнення процесів структуроутворення мікро- та наносистем. 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 „Процеси самоорганізації структурно-морфологічних характеристик та умов формування мікро- і наносистем” 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 докторських дисертацій, а її автор, Космінська Юлія Олександрівна, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора 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 д. ф.-м. н. Онопрієнка О.О. засвідчую:

Учений секретар ЦМ НАНУ

к. ф.-м. н.



Картузов В. В.

