

## Зародкоутворення золота в електричному полі на поверхні темплату

М.Ю. Барабаш<sup>1,\*</sup>, Е.Л. Мартинчук<sup>1</sup>, Д.О. Гринько<sup>2</sup>, Р.В. Литвин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Технічний центр НАН України, вул. Покровська, 13, 04070 Київ-070, Україна

<sup>2</sup> Інститут фізики напівпровідників НАН України, просп. Науки, 41, 03650, ГСП, Київ-39, Україна

<sup>3</sup> Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України,  
вул. Кржижановського 3, 03680 Київ-142, Україна

(Одержано 13.01.2014; опубліковано online 06.04.2014)

В роботі проведено порівняльне дослідження процесів фазоутворення золотих нанокластерів в матриці полі-N-вінілкарбазолу (PVCA) при газофазній співконденсації в локальних електричних полях поблизу поверхні темплату та на поверхні нейтральних підкладок. ТЕМ дослідження дозволили безпосередньо спостерігати золоті критичні зародки в матриці PVCA і визначити їх розміри. Експериментально доведено, що розмір критичного зародку Au при газофазній співконденсації із сполуками карбазолу становить 1,9 нм, тоді як в неоднорідному електричному полі темплату він зменшується до 1,2 нм. Моделювання впливу поляризаційної складової на зародкоутворення Au в межах термодинамічного підходу для електрично заряджених і нейтральних нанокластерів золота показало можливість існування вимічених змін розміру критичного зародку в полі 108-1010 В/м.

**Ключевые слова:** Електростатичний темплат, Нанокластер, Електричне поле, Наноккомпозит.

PACS numbers: 36.20. – r, 42.70. – a, 42.70.Jk

### 1. ВСТУП

Експериментальному дослідженню процесів формування фаз наноккомпозитів золото-органічний полімер в процесах співконденсації з газової фази присвячується помітна увага, оскільки тонкоплівкові наноккомпозити метал-полімер мають практичне значення для сенсорики, каталізу, фотоніки та оптоелектроніки, а газофазна технологія, у порівнянні з загальнодоступними колоїдними методами одержання наноккомпозитів з розчинів, дозволяє використовувати суттєво відмінні процеси і відповідні фактори технологічного впливу для керування структуруванням речовини. Зокрема, газофазна технологія пропонує ефективні рішення для задач створення чітких меж розділу між шарами наноккомпозитів та організації нанокластерів в упорядковані структури.

Раніше нами було розроблено методику одночасної газофазної конденсації золота та деяких полімерів, одержані і досліджені наноккомпозитні плівки золото-політетрафторетилен [1, 2] та золото-полі-N-вінілкарбазол (PVCA) [3].

Значні електростатичні поля в приповерхневих шарах тонкоплівкових структур можуть бути одержані електрофотографічними методами [4] та використані для спрямування процесів самоорганізації наноструктур за допомогою темплатних інструментів [5].

Метою роботи є вивчення зародкоутворення золота в неоднорідному електричному полі темплату при формуванні наноккомпозиту золото-полі-N-вінілкарбазол конденсацією в вакуумі.

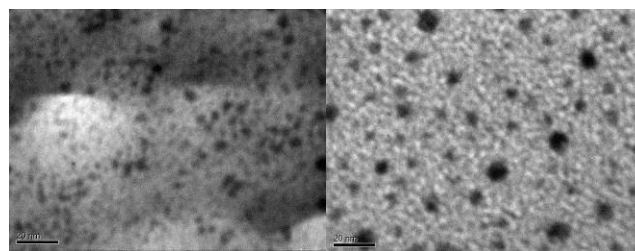
### 2. МЕТОДИКА ПРИГОТУВАННЯ ТОНКИХ ШАРІВ НАНОКОМПЗИТУ ЗОЛОТО-PVCA НА ПОВЕРХНІ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ТЕМПЛАТА ДЛЯ ТЕМ ТА РОЗПОДІЛ НАНОКЛАСТЕРІВ ЗА РОЗМІРАМИ

Для виготовлення вільних плівок наноккомпозиту золото-полімер товщиною близько 50 нм, необхідних

для дослідження методом просвічуючої електронної мікроскопії (ТЕМ), використовували конденсацію у вакуумі на свіжий скол кристалу KBr. Відшаровування плівки та розміщення її на стандартному сітчастому мідному тримачі з комірною 25 мкм проводили в дистильованій воді.

При дослідженні процесів конденсації наноккомпозитів на поверхні темплату для приготування об'єктів для ТЕМ використовували розділовий поверхневий шар KBr товщиною приблизно 30 нм. Шар одержували термічним випаровуванням KBr та конденсацією на поверхні темплату в вакуумі в одному технологічному процесі безпосередньо перед осадженням наноккомпозиту. Масу розділового шару KBr, як і склад плівки наноккомпозиту, контролювали методом кварцового резонатора.

Дослідження зразків методом ТЕМ проводили на приладі JEM-1230 (JEOL, Японія) з номінальною розділовою здатністю 0,2 нм при прискорюючій напрузі 100 кВ.



а

б

**Рис. 1** – ТЕМ зображення плівок наноккомпозиту Au-PVCA: а – на поверхні тонкого розділового шару KBr в неоднорідному електричному полі темплату, б – на поверхні кристалу KBr

Для статистичного аналізу форми нанокластерів, розподілу за розмірами та анізотропії їх розташування використовували метод двовимірного Фур'є-аналізу ТЕМ зображень.

\* bashik\_77@ukr.net

Зображення типових зразків плівок наноконкомпозитів, одержаних методом ТЕМ, представлені на рис. 1. На цих зображеннях золоті нанокластери спостерігаються як темні плями. Якісно помітно, що розмір нанокластерів золота в плівці, осадженій на поверхні темплату, менший, а кластери розташовані в просторі зі змінною густиною. Форма нанокластерів близька до сферичної. Детальніше статистично усереднені особливості нанокластерної структури проаналізовані методами двовимірної Фур'є-аналізу.

Густина потужності 2D фур'є-перетворення ТЕМ зображень, пов'язана з розподілом нанокластерів за розмірами, в залежності від діаметра нанокластера представлена на рис. 2. Для точного обрахунку розподілу нанокластерів за розмірами на основі цих даних треба врахувати вклад просторових гармонік. Але поблизу експоненційно спадаючого краю розподілу вкладом гармонік більш високих просторових частот можна знехтувати.

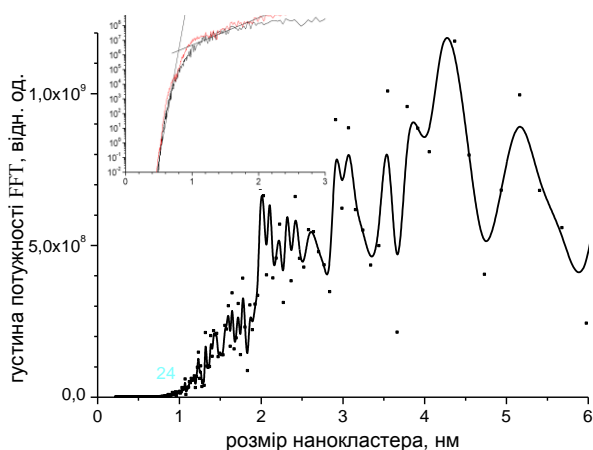


Рис. 2 – Розподіл нанокластерів золота в композиті Au-PVCa, рис. 1а за розмірами

Порівняльний аналіз показує наступні особливості:

- нанокластери золота мають форму, близьку до еліпсоїда з ексцентриситетом не більше 1,2;
- проявляється анізотропія орієнтації нанокластерів в тонких шарах;
- розподіл нанокластерів за розмірами досить широкий з максимумами біля 2 нм, 4,5 нм та 10-18 нм;
- для обох об'єктів рис.1 характерна присутність чітко виражених порогів в області одиниць нанометрів, тоді як фізична роздільна здатність приладу не більше 0,5 нм.

Форма індивідуального нанокластера свідчить про анізотропію процесів зародкоутворення та дифузійного масопереносу під час Освальдського визрівання нанокластерів. Незначна еліптичність означає, що вплив сил міжфазної взаємодії на межі золото-полімер на зародкоутворення нанокластерів золота незначний і зародкоутворення могло відбуватися не на поверхні, а в об'ємі полімерної матриці. Це може бути також пояснено великим значенням поверхневої енергії золота у порівнянні із відповідною величиною для полімерів [6].

Максимуми розподілу 2-7 нм відповідають індивідуальним нанокластерам, а широкий розподіл більших за розмірами кластерів свідчить про розвиток

процесів агрегації під час Освальдського визрівання. Подібні явища нами спостерігалися раніше [3, 5, 7]. Було показано, що в агрегатах нанокластери розташовуються корельовано, а самі агрегати мають голкоподібну форму і орієнтовані нормально до поверхні росту. Часткова корельованість розподілу нанокластерів золота призводить до ряду особливостей поверхневого плазмонного резонансу [7].

Найбільш цікавою є можливість безпосереднього спостереження критичних зародків. Експоненційний спад поблизу порогу, рис. 2 можна віднести до спостереження метастабільних нестійких кластерів та флуктуацій [8, 9, 10], що відбувалися в наноконкомпозиті під час вирощування. У зв'язку з низьким рівнем сигналу в цій області, також слід очікувати проявлення шумів реєструючої ТЕМ зображення системи електронного мікроскопу. Експоненційний поріг в розподілі нанокластерів за розмірами поблизу 1,2 нм свідчить про відсутність в композиті стійких наночастинок золота з розмірами менше порогової величини. Порогове значення діаметру нанокластера співпадає з точністю 0,1 нм для різних напрямків обрахунку розподілу в 2D зображенні рис. 1, тобто не залежить від латеральної анізотропії.

Порівняння розмірів критичних зародків золота в наноконкомпозитах рис. 1. проводиться на рис. 3.

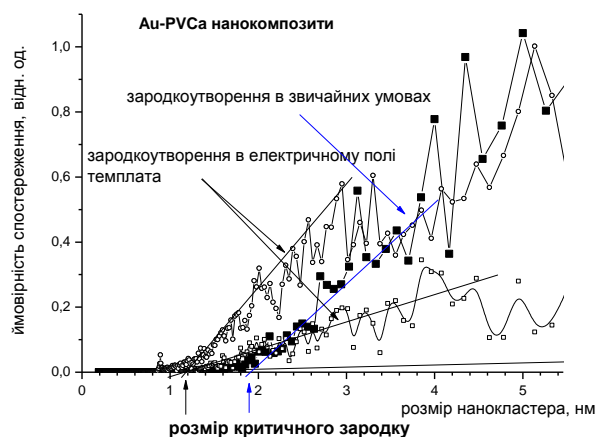


Рис. 3 – Розмір критичного зародку Au в наноконкомпозитах Au-PVCa. Зародкоутворення: а – в звичайних умовах, б – в неоднорідному полі на поверхні темплату

На тому ж рисунку для порівняння наведений розподіл за розмірами для наноконкомпозиту Au-PVCa, вирощеного на поверхні кристалу KBr в аналогічних умовах. Обидві залежності мають яскраво виражені порогові значення. Порогові значення можна віднести до розмірів критичних зародків в цих системах. Розмір критичного зародку, сформованого в неоднорідному електричному полі на поверхні темплату, становить 1,2 нм, що в межах похибок нашого експерименту суттєво відрізняється від значення 1,9 нм, властивого для зразка рис. 1б. Зауважимо, що розмір критичного зародку для наноконкомпозитів золото-політетрафторетилен становить 2,0 нм [1, 2, 5].

Відмінність розмірів критичних зародків досить суттєва і може бути пов'язана з особливістю умов їх формування.

Формування кластерів золота в наноконкомпозиті рис. 1б відбувається у власних локальних полях на-

нокластерної системи у відсутності зовнішнього. Формування кластерів рис. 1а відбувалося в неоднорідному зовнішньому полі із макроскопічно усередненою ефективною напруженістю порядку  $10^8$  В/м, широким і невизначеним діапазоном неоднорідних мезо- та локальних полів і за участю власних локальних полів кластерної системи.

В таких умовах слід розглянути формування незаряджених та заряджених металевих нанокластерів. Електрично заряджені нанокластери можна розглядати як потенційні центри агрегації нейтральних кластерів. Їх заряд може виникнути в процесах переносу електрону із термічно збуджених донорних станів карбазолу, в процесах обміну електронами між нанокластерами металу із розмірами нанометрового діапазону в наслідок квантово-розмірних явищ. Накінець, заряд термоемісійної природи потрапляє на поверхню композиту під час термічного випаровування компонентів в вакуумі і може досить довго зберігатися на локалізованих станах PVCa.

Такі заряджені нанокластери внаслідок значного часу життя і високої рухливості наночастинок на поверхні під час формування композиту можуть відігравати роль центрів агрегації незаряджених нанокластерів і суттєво впливати на процеси самоорганізації нанокластерної структури.

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЗАРОДКОУТВОРЕННЯ МЕТАЛЕВИХ НАНОКЛАСТЕРІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Класичним підходом до розгляду умов утворення критичних зародків є термодинамічний. Цей підхід [8, 9, 10] дозволяє одержати значення теплоти фазових переходів, поверхневих енергій, мольних об'ємів, що добре узгоджуються із результатами ТЕМ спостережень для металевих нанокластерів.

Класична теорія фазоутворення викладена в [9]. Будемо вважати наносфери не взаємодіючими, оскільки в момент зародкоутворення відстань між ними значно перевищує розміри флуктуацій. Це наближення непридатне для опису корельованого у просторі зародкоутворення та утворення агрегатів нанокластерів, що може мати прикладне значення. Такий більш детальний опис подібних явищ можна чекати з точки зору фізико-хімічної мікрогідродинамики колоїдних частинок [11].

Суттєвою відмінністю нашого випадку є необхідність врахування в залежності енергії Гібса ( $W$ ) від розміру флуктуації складової енергії поляризації золотих наносфер зовнішнім електричним полем. Поляризованість золотих еліпсоїдів суттєво залежить від їхньої форми, яку ми будемо розглядати як параметр задачі. Метою є розрахунок енергії Гібса для рідкого золотого нанокластера нанометрового розміру і оцінка залежності розміру критичного зародку від зовнішнього електричного поля та співвідношення вісей еліпсоїда. Оскільки типові для золота розміри критичних зародків знаходяться в діапазоні одиниць нанометрів значно менші за дебаєвський радіус екранування, задачу можна розглядати в наближенні діелектричних еліпсоїдів.

Поляризованість діелектричного еліпсоїда зовнішнім електричним полем залежить від ексцентриситету

еліпсоїда та відношення діелектричних проникностей кластера і середовища. Якщо поле однорідне, то електрична складова енергії дорівнює [12]

$$W_e = -\frac{1}{2} E_0 P_x = -\frac{2\pi\epsilon_0 ab E_0 (\epsilon - 1)}{3(1 + (\epsilon - 1)n_x)}, \quad (1)$$

де  $P_x$  – проекція дипольного моменту еліпсоїда на направлення поля;  $\epsilon$  – відношення діелектричної проникності еліпсоїда та зовнішнього середовища;  $a$ ,  $b$  – велика та мала напіввісі еліпсоїда;  $n_x$  – коефіцієнт деполіризації, пов'язаний із ексцентриситетом  $e$  як:

$$n_x = \frac{1 - e^2}{2e^3} \left( \ln \left( \frac{1 + e}{1 - e} \right) - 2e \right). \quad (2)$$

З урахуванням виразу для площі поверхні еліпсоїда обертання поверхневу потенційну енергію кластера можна записати у вигляді

$$W_\alpha = 2\pi\alpha R_0^2 \left( \beta^{-2/3} + \frac{\beta^{4/3} \arctg \sqrt{\beta^2 - 1}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \right) \equiv 2\pi\alpha R_0^2 S_x, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поверхневого натягу на межі золотий нанокластер- полімер;  $R_0$  – радіус кулі з об'ємом еліпсоїда  $R_0^3 = ab^2$ .

Відношення напіввісей  $\beta = a/b$  пов'язано з ексцентриситетом співвідношенням  $e = \sqrt{\beta^2 - 1} / \beta$ . Якщо в якості одиниці вимірювання енергії вибрати  $2\pi\alpha R_0^2$ , тоді безрозмірну повну енергію еліпсоїда можна представити у формі

$$W = S_x - \frac{4(\epsilon - 1)N^2}{3(1 + (\epsilon - 1)n_x)}, \quad N^2 \equiv \frac{\epsilon_0 E_0^2 R_0}{4\alpha}. \quad (4)$$

Отже, енергія Гібса для електрично нейтрального нанокластера золота в зовнішньому електричному полі складається з трьох членів: поверхневої енергії  $S_x(\beta)$  енергії поляризації еліпсоїда полем  $p(R_0, E_0)$  та об'ємної складової  $V(R_0)$ .

$$W(R_0, \beta, E_0) = (S_x(\beta) - p(R_0, E_0) - V(R_0))(2\pi\alpha(R_0)R_0^2),$$

$$V(R_0) = \frac{2R_0}{\alpha(R_0)} \cdot \frac{\mu}{3\Omega}.$$

У випадку електрично заряджених нанокластерів енергія Гібса має ще одну складову- енергію електричного поля. Подібна електростатична задача розглядалася авторами [13] для аналізу стійкості рідких мікрокрапель.

$$W(R_0, \beta, E_0, q) = (4Q(R_0, q)C_x(\beta) + S_x(\beta) - p(R_0, E_0, \beta) - V(R_0)) \cdot (2\pi\alpha R_0^2).$$

де  $Q(R_0, q)$  – приведений заряд, а

$$C_x(\beta) = \frac{\beta^{1/3} \ln \left( \beta + \sqrt{\beta^2 - 1} / \beta - \sqrt{\beta^2 - 1} \right)}{\sqrt{\beta^2 - 1}}$$

– смність еліпсоїда.

Поверхневий натяг  $\alpha(R_0)$  на межі золотий нанок-

ластер-полімер може бути оцінений на основі рівняння Юнга [9]. Оскільки поверхневий натяг полімеру, зокрема PVCa, значно менший золота [6] в якості оцінки  $\alpha(R_0)$  можна використовувати значення для золота у нанокластерній формі. Температура плавлення та поверхнева енергія золотих нанокластерів є вагомими параметрами цієї моделі. Суттєвий вплив на значення енергії Гібса має значення поверхневої енергії нанокластера золота. В нанометровій області розмірів металевого нанокластера поверхнева енергія суттєво залежить від розміру. Для моделювання процесу зародкоутворення в електричному полі важливо використати коректні дані з температури плавлення та поверхневої енергії золотих нанокластерів в області розмірів 1,2-5 нм.

Відомо [10], що поверхнєве розупорядкування наночастинок суттєво впливає на термодинамічні параметри фазових переходів. Температура плавлення нанокластерів деяких металів в залежності від розміру нанокластерів, експериментально досліджена методами електронної мікроскопії, систематично вивчена авторами [10].

Поверхнева енергія металевих нанокластерів у порівнянні із масивним металом знаходиться під суттєвим впливом процесів поверхневого розупорядкування. Детальний аналіз залежності поверхневої енергії металевих наночастинок від розміру з позицій статистичної фізики та термодинаміки проведено авторами [10]. Наряду із відомою формулою Толмена для явної залежності поверхневої енергії від розміру наночастинок авторами [10] проаналізований ряд інших підходів та проінтерпретований фізичний зміст параметрів залежностей. Найбільш універсальною є залежність

$$\sigma(d) = \sigma_0(1 - \alpha_1/d + \alpha_2/d^2),$$

де  $\sigma(d)$  – поверхнева енергія,  $\sigma_0$  – поверхнева енергія для масивного матеріалу,  $d$  – розмір наночастинок,  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  – параметри.

Параметр  $\alpha_1$  інтерпретується [10] як товщина поверхнево розупорядкованої оболонки в нанокластері, що знаходиться в рідкому стані. Для чисельного моделювання нами використані температура плавлення та поверхнева енергія золотих нанокластерів відповідно даним рис.1.8, рис. 2.4 та рис.2.5 [10]. В нашому моделюванні апроксимація коефіцієнту поверхневого натягу проводилася виразом (одиниці СІ)

$$\alpha(R_0) = 1,12 \left[ 1 - \left( \frac{0,2}{R_0} \right) \cdot 10^{-9} \right].$$

Залежність енергії Гібса для електрично нейтрального нанокластера золота у зовнішньому електричному полі від розміра нанокластера наведена на рис. 4. Аналіз цієї залежності дозволяє зробити наступні висновки: вплив зовнішнього електричного поля на енергію зародкоутворення проявляється тільки в досить значних електричних полях - більше за  $10^8$  В/м; вплив ексцентриситету нанокластера на результат не має вирішального значення; суттєве зменшення розміру критичного зародку від 2 нм до 1-1,5 нм можливе в зовнішньому електричному полі

5  $10^9$  В/м; енергія Гібса утворення критичного зародка розміром 1-1,5 нм в полі в кілька разів менша у порівнянні з зародками 2 нм, що надає суттєву перевагу утворенню таких кластерів.

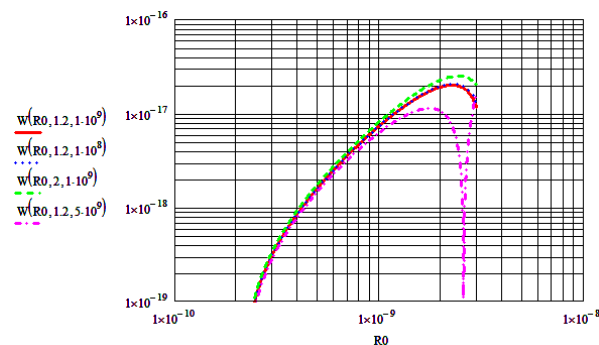


Рис. 4 – Енергія Гібса (Дж) для електрично-нейтрального нанокластера золота у зовнішньому електричному полі в залежності від розміру нанокластера (м). Значення енергії Гібса надано за модулем

В електричному полі можливе виникнення нестійкості, що може суттєво змінити механізм формування кластерів. Наведений термодинамічний підхід до такого випадку незастосовний оскільки нестійкість- кінетична характеристика  $i$ , отже, модель повинна враховувати кінетику процесів [6, 11].

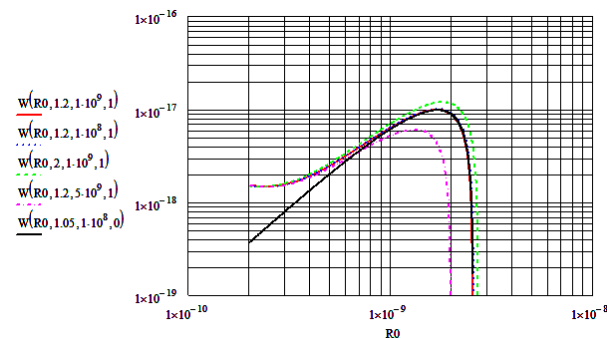


Рис. 5 – Енергія Гібса (Дж) для електрично-зарядженого нанокластера золота у зовнішньому електричному полі в залежності від розміру нанокластера (м)

Залежність енергії Гібса для електрично зарядженого нанокластера золота у зовнішньому електричному полі від розміра нанокластера наведена на рис. 5. Суттєва відмінність рис. 5 від даних рис. 4 полягає у відсутності нестійкості при малих розмірах кластерів, що спричинено вкладом електростатичної складової енергії Гібса. Розміри критичного зародку для зарядженого нанокластера також дещо менші.

Результати моделювання рис. 4 і рис. 5 узгоджуються між собою та відповідають експериментальним даним рис. 1-3: в експериментально одержаному розподілі присутня значна доля кластерів 2-4 нм, а стійкі кластери 1,2-2 нм у зразку рис.1б не спостерігаються.

Отже, в нанокластерній системі поблизу поверхні темплату середнє поле оцінюється як  $10^8$  В/м, а локальнє до  $10^{10}$  В/м. Неодноріднє електричне поле з такою напруженістю здатнє суттєво впливати на симетрію нанооб'єктів, оскільки воно співрозмірнє із

внутрішньомолекулярними полями, та викликати орієнтаційні ефекти. Можливий також вплив на транспорт, наприклад, дифузію, в полі. Безпосереднє підтвердження присутності в композиті таких високих значень поля можна одержати також із спостережень ефекту Штарка та ЯМР.

#### 4. ВИСНОВКИ

Проведено порівняльне дослідження процесів фазоутворення золотих нанокластерів в матриці PVCa при газофазній співконденсації в локальних електричних полях поблизу поверхні темплату та на поверхні нейтральних підкладінок. ТЕМ дослідження дозволили безпосередньо спостерігати золоті критичні зародки в матриці PVCa і визначити їх розміри. Експериментально доведено, що розмір критичного зародку Au при газофазній співконден-

сації із сполуками карбазолу становить 1,9 нм, тоді як в неоднорідному електричному полі темплату він зменшується до 1,2 нм. Моделювання впливу поляризаційної складової на зародкоутворення Au в межах термодинамічного підходу з використанням експериментально визначених значень поверхневої енергії для нанокластерів [10] показало можливість існування вимічених змін розміру критичного зародку в полі 108-1010 В/м. Така висока напруженість може бути віднесена до локального поля поблизу поверхні темплату в присутності золотих наночастинок.

#### ПОДЯКА

Автори вдячні співробітникам Центру колективного користування електронними мікроскопами НАН України [14] за можливість проведення ТЕМ досліджень.

### Nucleation of Gold in the Electric Field on the Surface of Template

M.Yu. Barabash<sup>1</sup>, E.L. Martynchuk<sup>1</sup>, D.A. Grynko<sup>2</sup>, R.V. Litvin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Technical Centre National Academy of Science of Ukraine, 13 Pokrovskaya Str., 04070 Kiev, Ukraine*

<sup>2</sup> *Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine 41 Nauki. Pr., 03680, Kiev, Ukraine*

<sup>3</sup> *I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences of NAS Ukraine 3, Krzhizhanovskoho Str., 03680, Kyiv, Ukraine*

The comparative study of gold nanoclusters phase formation processes in the matrix of poly-N-vinylcarbazole (PVCa) at co-condensation from the gas phase in local electric field near the surface of the template and on the surface of neutral substrates is investigated. TEM studies have directly observed the golden critical nuclei in the PVCa matrix and determine their size. Experimentally proved that the size of the gold critical nuclei is 1.9 nm, whereas in the non-uniform electric field of the template is reduced to 1.2 nm. Modelling the influence of polarization component on Au nucleation within the thermodynamic approach to electrically charged and neutral gold nanoclusters showed the possibility of the existence of the measured changes in the critical nucleus size in the field 108-1010 V/m.

**Keywords:** Electrostatic Template, Nanoclusters, Electric field, Nanocomposite.

### Зародышеобразование золота в электрическом поле на поверхности темплата

М.Ю. Барабаш<sup>1</sup>, Э.Л. Мартинчук<sup>1</sup>, Д.А. Гринько<sup>2</sup>, Р.В. Литвин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Технический центр НАН Украины, ул. Покровская, 13, 04070 Киев-070, Украина*

<sup>2</sup> *Институт физики полупроводников НАН Украины, просп. Науки, 41, 03650, ГСП, Киев-39, Украина*

<sup>3</sup> *Институт Проблем Материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины ул. Кржижановского 3, 03680, Киев-142, Украина*

В работе проведено сравнительное исследование процессов фазообразования золотых нанокластеров в матрице поли-N-винилкарбазола (PVCa) при газофазной соконденсации в локальных электрических полях вблизи поверхности темплата и на поверхности нейтральных подложек. ТЕМ исследования позволили непосредственно наблюдать критические зародыши золота в матрице PVCa и определить их размеры. Экспериментально доказано, что размер критического зародыша Au при газофазной соконденсации с соединениями карбазола составляет 1,9 нм, тогда как в неоднородном электрическом поле темплата он уменьшается до 1,2 нм. Моделирование влияния поляризационной составляющей на зародышеобразование Au в рамках термодинамического подхода для электрически заряженных и нейтральных нанокластеров золота показало возможность существования измеренных изменений размера критического зародыша в поле 108-1010 В/м.

**Ключевые слова:** Электростатический темплат, Нанокластер, Электрическое поле, Наноккомпозит.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A.V. Goncharenko, D.A. Grynko, K.P. Grytsenko, V.Z. Lozovsky, *J. Nanosci. Nanotechnol.* **5**, 1919 (2005).
2. D. Grynko, K. Grytsenko, V. Lozovski, M. Sopinsky, G. Strilchuk, *Mater. Sci. Appl.* **1**, 141 (2010).
3. М.Ю. Барабаш, Д.О. Гринько, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **11**, №3 (2012).
4. M.G. Nakhodkin, M.G. Kuvshinsky, *Thermoplastics media for holograms registration // Spatial light modulators* (L.: Nauka: 1977).
5. Г.Г. Влайков, М.Ю. Барабаш, М.А. Заболотний та ін., *Формування наноструктур темплатним синтезом* (Київ: ІМФ НАНУ: 2010).
6. А.Д.Помогайло, А.С. Розенберг, И.Е. Уфлянд *Наночастицы металлов в полимерах* (М.: Химия, 2000).
7. Д.А. Гринько, Ю.М. Барабаш, Л.С. Максименко, и др., *ФТТ* **54** № 11, 2165 (2012) (D.A. Grynko, Y.M. Barabash, L.S. Maksimenko, at al., *Phys. Solid State* **54**, 2301 (2012)).
8. С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, *УФН* **168**, No10 1083 (1998)(S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, *Phys. Usp.* **41**, 983 (1998)).
9. А. Адамсон, *Физическая химия поверхностей. Пер. с англ.* (Изд. «Мир»: Москва: 1979).
10. Н.Т. Гладких, *Поверхностные явления и фазовые превращения в конденсированных пленках* (Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина: 2004).
11. А.П. Шпак, З.Р. Ульберг, *Коллоидно-химические основы нанонауки* (К.: Академперіодика: 2005).
12. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред* (М.: Наука: 1982).
13. С.О. Ширяева, *ЖТФ* **70** № 6, 20 (2000) (S.O. Shiryaeva, *Tech. Phys.* **45**, 687 (2000)).
14. [http://www.botany.kiev.ua/microsc\\_cent.htm](http://www.botany.kiev.ua/microsc_cent.htm).