

## Розрахунок реальних розмірів наночастинок за АСМ зображеннями та моделювання їх магнітооптичних властивостей

В.О. Зленко, М.Г. Демиденко, С.І. Проценко

Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

(Одержано 10.09.2013, опубліковано online 17.10.2013)

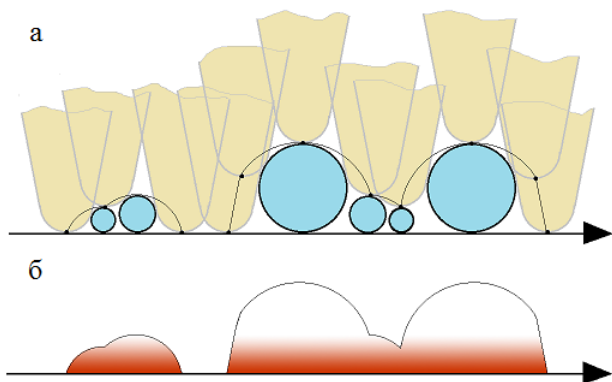
В роботі описані геометричні та наведені результати розрахунку реальних розмірів наночастинок Ni і Co за даними атомно-силової мікроскопії, які були отримані методом термічного диспергування тонких металевих плівок на аморфних  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ . Результати розрахунків були використані при моделюванні магнітооптичних властивостей масивів НЧ. Показано, що оброблені за описаними в роботі співвідношеннями моделі масивів НЧ дозволяють отримати добре співпадіння між розрахунковими та отриманими експериментально методом МОКЕ даними.

**Ключові слова:** Атомно-силова мікроскопія, Масив наночастинок, МОКЕ.

PACS numbers: 61.46.Df, 68.37.Lp, 73.61.At, 81.15.Ef

### ВСТУП

Провітлювальна електронна мікроскопія як потужний інструмент для вивчення структури та фазового складу наноматеріалів дозволяє оцінити геометричні розміри наноб'єктів лише у горизонтальній та вертикальній площинах лише при додатковому використанні не завжди доступних методів косоного перерізу. Одним з небагатьох інструментів, який дозволяє отримати тримірні зображення рельєфу поверхні зразків та оцінити їх особливості морфології у вертикальній площині є атомно-силова мікроскопія (АСМ). Поряд з цим метод АСМ має обмеження за роздільною здатністю, що особливо проявляється при дослідженні наноб'єктів. З цієї точки зору одним з найважливіших факторів, які визначають як роздільну здатність АСМ, так і якість зображення в цілому є геометричні параметри скануючого зонду (голки).



**Рис. 1** – Ілюстрація невідповідності реальної та вимірної форми та розмірів об'єктів: а – траєкторія руху скануючого зонда; б – рельєф поверхні зразка на АСМ зображенні

Як показує рисунок інтерпретація АСМ зображень стає більш складною коли розміри досліджуваних об'єктів є співрозмірними з геометричними розмірами вістря зонду, а явище конволюції вносить похибку при вимірюванні горизонтальних (а при щільному розташуванні об'єктів і вертикальних) розмірів.

### 1. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Детально методика отримання масивів наночастинок (НЧ) Ni і Co на аморфних  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  підкладках описана у роботах [1, 2] і включає конденсацію тонких металевих шарів (ефективна товщина 1-3,5 нм) методом термічного випаровування у робочому об'єкті вакуумної установки ВУП-5М (тиск залишкових газів  $10^{-3}$  Па), та їх відпалювання у вакуумі. Морфологія масивів НЧ досліджувалась за допомогою атомно-силового мікроскопа Bruker Dimension Edge у напівконтактному режимі. Магнітооптичні властивості масивів НЧ вивчались використовуючи магнітооптичний ефект Кера (МОКЕ) у повздовжній геометрії вимірювання. Комп'ютерного моделювання кривих магнітного гістерезису здійснювалося за допомогою програмного пакету oommf [3].

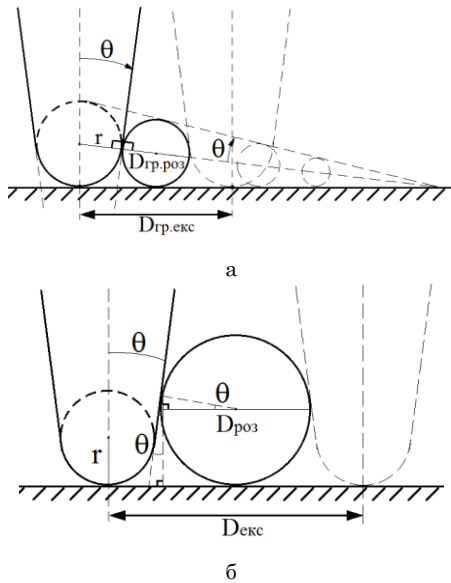
### 2. МЕТОДИКА РОЗРАУНКУ

Використовуючи певні геометричні моделі та розрахунки [4-6] можна оцінити реальні розміри за АСМ зображеннями з деякою точністю можна. Оскільки об'єктом наших досліджень виступали двомірні масиви наночастинок на поверхні підкладки, для інтерпретації АСМ зображень були використані описані нижче моделі.

У першому випадку при проведенні розрахунків будемо вважати, що вістря голки має сферичну ферму, а сама голка має деякий кут  $\theta$  при вершині (рис. 2а). Досліджувані об'єкти також мають сферичну форму, а їх діаметр  $D$  рівний або менший за деякий граничний розрахунковий діаметр ( $D_{gr,roz}$ ). У цьому випадку внесок конволюції у виміряний за АСМ зображенням діаметр частинки (горизонтальний)  $D_{exc}$  буде визначатись радіусом вістря голки  $r$ . Авторами роботи [4] розглянута аналогічна модель та отримане співвідношення для розрахунку діаметра НЧ  $D_{roz}$  за відомим радіусом голки АСМ  $r$  та шириною частинки на зображенні  $D_{exc}$ :

$$D_{roz} = D_{exc}^2 / 8r, \quad (1)$$

де  $D_{roz}$  – розрахунковий радіус частинки;  
 $D_{exc}$  – ширина частинки на АСМ зображенні;  
 $r$  – радіус кривини голки АСМ.



**Рис. 2** – Геометричні моделі, які описують взаємодію зонда АСМ із сферичною частинкою різних розмірів: а – діаметр частинки  $D$  менший за деякий граничний діаметр  $D_{гр.роз}$ ; б – діаметр частинки більший за  $D_{гр.роз}$

Однак на використання цієї моделі накладаються певні обмеження. Аналізуючи геометричну модель, наведену на рис. 2а можна зробити висновок, що радіус частинки не може бути більшим за деякий  $D_{гр.роз}$ . Значення  $D_{гр.роз}$  відповідає діаметру сфери, вписаної в конус, який відсікається нижньою точкою голки та є уявним продовженням її форми.

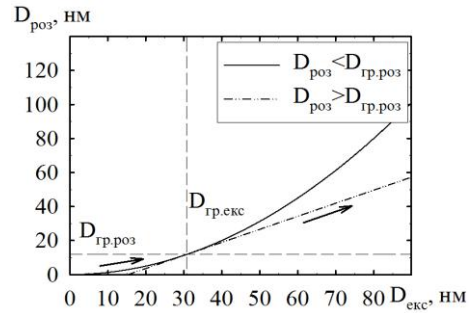
Розглянемо другий випадок (рис. 2б). Оскільки діаметр частинки більший за  $D_{гр.роз}$ , з її поверхнею буде взаємодіяти не лише вістря, а й бічна поверхня голки АСМ. У роботах [5, 6] вирішувалася задача визначення радіуса скануючого зонда за АСМ зображеннями сферичних об'єктів відомого розміру. Наведені авторами співвідношення були використані нами для вирішення оберненої задачі розрахунку розмірів НЧ за відомими параметрами голки АСМ. Визначити діаметр  $D_{роз}$  сферичного об'єкту в цьому випадку можна використовуючи наступне співвідношення [5, 6]:

$$D_{роз} = \frac{D_{екс} \cdot \cos \theta}{1 + \sin \theta} - 2r \cdot \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta}, \quad (2)$$

де  $\theta$  – кут при вершині вістря голки АСМ.

Співвідношення (2) свідчить про те, що на виміряні розміри крім радіуса кривини голки  $r$  також буде впливати кут при її вершині  $\theta$ . На рис. 3 наведена залежність реального (розрахованого) діаметру НЧ  $D_{роз}$  від лінійного розміру (діаметру) НЧ  $D_{екс}$ , отриманого за допомогою АСМ в двох випадках, які описуються рівняннями (1) та (2) (радіус вістря голки АСМ  $r = 10$  нм, кут при вершині  $\theta = 15^\circ$ ).

Як видно з рис. 3 при обчисленні реальних розмірів сферичного об'єкту за АСМ зображенням перехід між моделями, що описуються рівняннями (1) та (2) повинен відбуватися в точці дотику кривих, яка має координати ( $D_{гр.екс}$ ;  $D_{гр.роз}$ ).



**Рис. 3** – Залежність розрахованого за двома моделями діаметру НЧ  $D_{роз}$  від виміряного діаметру  $D_{екс}$

Приврівнявши праві частини (1) та (2) та провівши необхідні перетворення були знайдені співвідношення для розрахунку  $D_{гр.роз}$  та  $D_{гр.екс}$ :

$$D_{гр.роз} = 2r \cdot \left( \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta} \right)^2, \quad (3)$$

$$D_{гр.екс} = 4r \cdot \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta}. \quad (4)$$

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1 Аналіз морфології поверхні масивів НЧ

Розраховані за співвідношенням граничні значення  $D_{гр.роз}$  та  $D_{гр.екс}$  склали 5,93 нм та 30,79 нм відповідно, що ілюструє граничні умови використання співвідношень у випадку радіусу вістря голки АСМ  $r = 10$  нм та кута при вершині  $\theta = 15^\circ$ .

Описані вище моделі та співвідношення були використані для аналізу АСМ зображень масивів НЧ Ni та Co, отриманих методом термодиспергування на аморфних  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  підкладках. На рис. 4 наведені приклади АСМ зображень масивів НЧ Ni і Co на  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  підкладках, отриманих термічним відпалюванням тонких шарів Ni при  $T_s = 990$  К та Co при  $T_s = 1020$  К.

Попередня обробка зображень та визначення геометричних розмірів НЧ проводили за допомогою програмного забезпечення Gwyddion 2.26. На рис. 5а наведений приклад профілів, позначених цифрами на рис. 4б. Вимірювання проводились на ділянках від  $0,5 \times 0,5$  мкм до  $1 \times 1$  мкм. Моделювання та обчислення даних згідно з описаними моделями проводилось з використанням середовища графічного програмування LabVIEW 10.0. При розрахунках були використані паспортні дані для голки АСМ Bruker TESPA. Заявлений виробником кут при вершині голки  $\theta = 15^\circ$ , номінальний та максимальний радіус вістря  $r$  складає 8 та 12 нм відповідно. Слід відмітити, що при експлуатації голка постійно взаємодіє з поверхнею зразка, що може призводити як до зміни форми вістря так і збільшення його радіусу. До того ж як показано у [7] навіть нові голки можуть мати радіус кривини значно більший ніж заявлений виробником.

За результатами вимірювань були побудовані гістограми розподілу наночастинок за горизонтальними  $D$  та вертикальними  $h$  розмірам. Приклад отриманих залежностей приведений на рис. 5б, в.

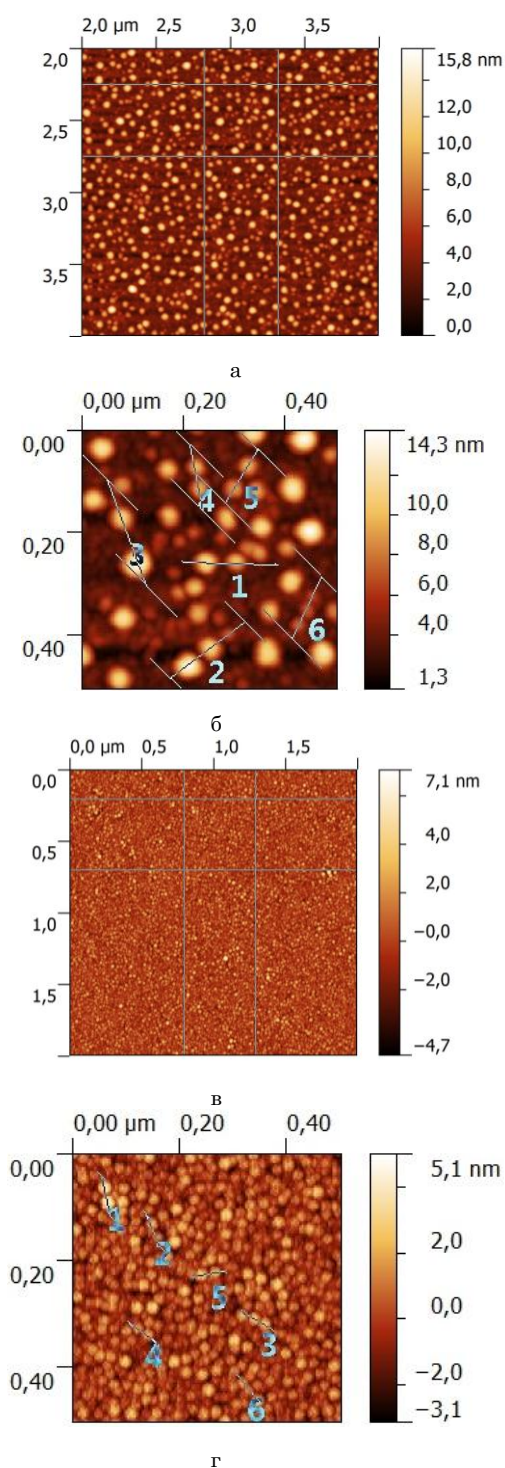


Рис. 4 – АСМ зображення масивів НЧ Ni (а) і Co (в) на Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si підкладка (а) та відповідні збільшені ділянки зображень (б, г)

Проведені для  $r = 8-12$  нм розрахунки діаметру частинок свідчать про суттєве збільшення розміру НЧ на АСМ зображенні за рахунок ефекту конволюції (рис. 5б).

На рис. 6 наведені залежність величини  $D_{роз}$  від  $D_{екс}$  (а) та висоти НЧ  $h$  від розрахункового  $D_{роз}$  (б). На діаграмах наведені розподіли за розміром з урахуванням кривини голки  $r = 8-12$  нм. Слід відмітити, що вклад конволюції у вертикальні розміри

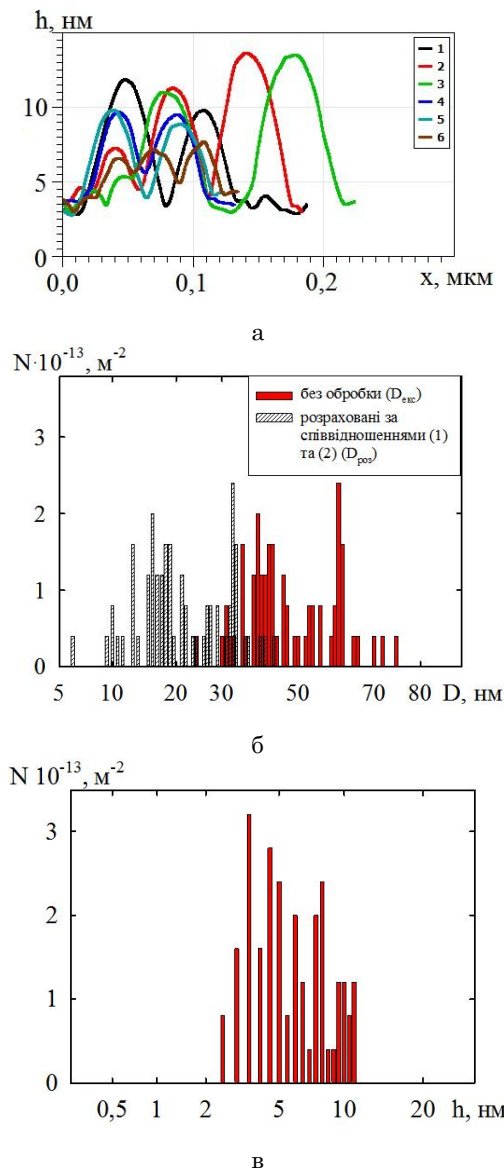


Рис. 5 – Профілі поверхні масиву НЧ Ni на Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si (а) та виміряні за АСМ зображенням розподіли НЧ за горизонтальними  $D$  (б) та вертикальними  $h$  (в) розмірами. Штрихова гістограма на позиції (б) показує розрахований діаметр НЧ  $D_{роз}$  при радіусі кривини голки  $r = 12$  нм та куті при вершині  $\theta = 15^\circ$

незначний [7] і у загальному випадку може відбуватись деяке згладжування зображення та зменшення висоти рельєфу. Не дивлячись на це навіть після розрахунку за моделями помітна суттєва різниця між розмірами частинок у вертикальному та горизонтальному напрямках. Це скоріш за все пов'язано з тим, що НЧ мають не сферичну, а еліптичну форму.

Як раніше було показано у роботах [1, 2, 8] морфологія масиву НЧ може бути охарактеризована таким параметрами, як найменший  $D_{мін}$ , найбільший  $D_{макс}$ , середній  $D_{сер}$  та найімовірніший  $D_{імов}$  діаметр. Ці параметри для зразка, зображеного на рис. 4 при радіусі голки  $r = 12$  нм склали 2,7 нм, 21,0 нм, 10,6 нм, 16,3 нм відповідно. Аналогічні характеристики для висоти  $h$  у вертикальній площині склали 1,5 нм, 10,5 нм, 5,4 нм, 3,6 нм.



Аналогічні розрахунки були проведені для серії отриманих масивів НЧ Ni і Co. Сумарні дані зведені у табл. 1. За результатами розрахунків були побудовані результуючі залежності середніх розмірів НЧ від початкової ефективної товщини плівок  $t$  (рис. 7).

Залежності вказують на поступове збільшення горизонтальних і вертикальних розмірів частинок із збільшенням початкової ефективної товщини плівок. Дані в табл. 1 свідчать про те, що в загальному випадку висота частинок в 2-4 рази менша за їх діаметр. В попередній роботі [2] були описані результати досліджень структури та фазового складу масивів НЧ Co, отриманих термодиспергуванням тонких металевих плівок (початкова ефективна товщина шару Co складала (1,5-2,1 нм) на поліімідних підкладках. За результатами просвічуючої електронної мікроскопії були розраховані параметри морфології масивів. Середній діаметр НЧ складав 8,8-13,0 нм. Це значення хоча і корелює, однак є дещо меншим ніж для масивів НЧ на  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  підкладках. Це можна пояснити відмінністю протікання процесу диспергування тонких металевих шарів на різних типах підкладок та різною точністю вимірювання АСМ та ПЕМ методів (оскільки для розрахунків розмірів частинок за АСМ зображеннями використовувались паспортні дані для голки, але як була зазначено раніше реальний радіус кривини зонда може бути більшим за паспортний). Однак в цілому з високою вірогідністю можна зробити висновок, що НЧ на поліімідних підкладках також мають еліптичну форму.

Очевидно, що описані моделі задовільно дозволяють оцінити реальний розмір окремих частинок. Однак на практиці відстані між частинками може бути меншою ніж радіус кривини голки АСМ. На рис. 4в, г приведені АСМ зображення масиву НЧ Co на  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  підкладці. На збільшеній ділянці видно, що частинки щільно прилягають одна до одної. Авторами роботи [6] описана модель, яка дозволяє оцінити радіус сферичних частинок, які щільно прилягають одна до одної. У співвідношеннях використовується відстань, на яку зонд заглиблюється між частинками. Однак проведені за цією моделлю розрахунки для зразка на рис. 4в, г показали, що результат не має фізичного змісту, оскільки розрахований діаметр  $D_{роз}$  є більшим за діаметр НЧ  $D_{екс}$  на АСМ зображенні. Це може бути пояснено тим, що частинки насправді не дотикаються, а знаходяться на незначній відстані.

Точне визначення висоти НЧ має велике значення зокрема при моделюванні поведінки їхніх властивостей у змінному магнітному, адже магнітні властивості НЧ сильно залежать від їх форми. Так при переході від сферичної форми до витягнутої у горизонтальній площині при деяких граничних значеннях змінюється механізм перемагнічування і у частинці можуть виникати магнітні вихори [9-11].

Для зображеного на рис. 4в, г масиву НЧ Co (та масиву з подібною морфологією поверхні, але дещо більшим  $D_{сер}$ ) методом спектроскопічної еліпсометрії були проведені вимірювання амплітуди  $\Psi$  та фазового зсуву  $\Delta$  до та після відпалювання зразків. За даними АФМ середня висота частинок  $h_{сер}$  складає 3,3 та 3,6 нм для першого та другого зразка відповідно. В результаті розв'язування оберненої задачі еліпсометрії були отримані дані про оптичні константи та товщину шарів в системах.

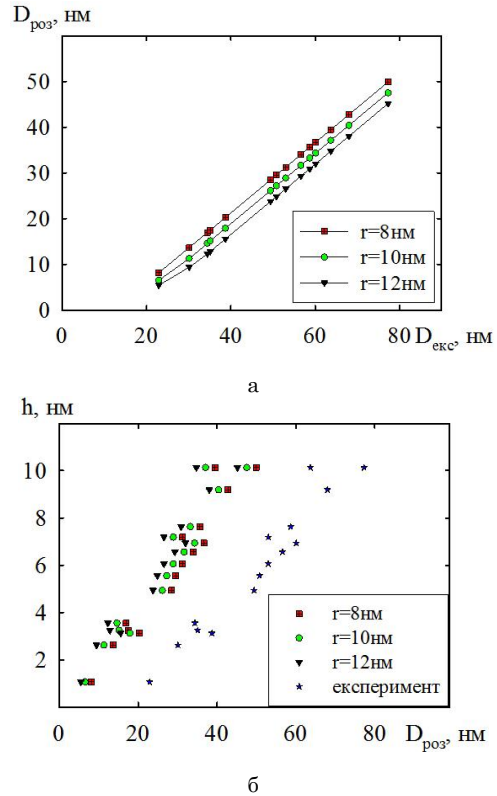


Рис. 6 – Залежність розрахованого діаметру НЧ  $D_{роз}$  від діаметру на АСМ зображенні  $D_{екс}$  (а) та висоти НЧ  $h$  від розрахованого діаметру  $D_{роз}$  (б)

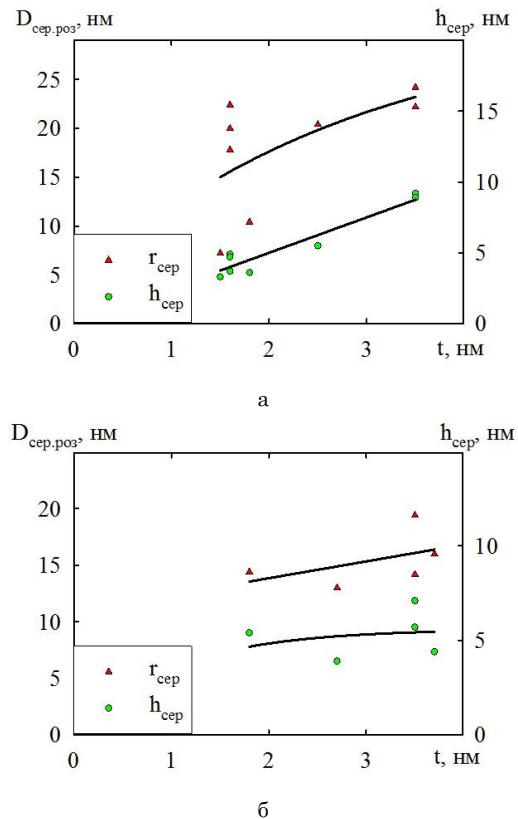


Рис. 7 – Залежність середнього розрахованого діаметру  $D_{сер,роз}$  та висоти  $h$  НЧ Co (а) та Ni (б) від початкової ефективної товщини плівок  $t$

Таблиця 1 – Результати розрахунку реальних розмірів НЧ за співвідношеннями (1) та (2) ( $r = 12$  нм,  $\theta = 15^\circ$ )

Матеріал	Матеріал підкладки	Початкова ефективна товщина плівки, нм	Температура відпалювання, К	$D_{\min, \text{роз}}$ , нм	$D_{\max, \text{роз}}$ , нм	$D_{\text{сер, роз}}$ , нм	$D_{\text{вір, роз}}$ , нм	$h_{\min}$ , нм	$h_{\max}$ , нм	$h_{\text{сер}}$ , нм	$h_{\text{вір}}$ , нм
Co	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	1,5	1020	5,2	15,6	10,4	11,4	2,8	13	7,2	9,4
Co	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	1,5	1020	4,4	14	7,2	7,6	3,6	10,4	6,6	8
Co	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	1,6	1050	8,2	37,4	20	16,6	2,8	24,4	9,8	7
Co	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	1,6	1100	8,4	30,8	17,8	14,2	4	11,4	7,4	11
Co	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	1,6	1200	6,8	36	22,4	19,6	3	17,4	9,4	13
Co	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	2,5	1200	7,4	71,8	20,4	19,6	3	39,8	10,6	11
Co	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	3,5	1100	8,4	108,8	24,2	19,6	4,2	114,6	18,4	17
Co	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	3,5	1200	5,2	64,6	22,2	12	4,4	57	17,8	15
Ni	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	300	16,6	95,8	51,6	28,8	7,4	51	26,8	11
Ni	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	1,5	300	7	87,2	45,6	12	4,2	56,6	22,8	8
Ni	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	1,8	990	5,4	42	14,4	32,6	3	21	10,8	7,2
Ni	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5	300	13,8	117,8	40	22	3	57,4	17,4	9
Ni	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	2,5	300	11,4	124,4	42,4	25,8	2,4	61,8	17	8
Ni	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	2,7	990	2,4	31,8	13	8,2	2,2	19,2	7,8	6
Ni	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,5	990	3,6	52,4	19,4	15,8	1,6	65	14,2	14
Ni	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	3,5	990	2,8	51,4	14,2	9,4	3,2	45,6	11,4	7
Ni	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si	3,7	990	6	52,2	16	8,2	2,2	31,2	8,8	7

Таблиця 2 – Оптичні параметри, товщина плівкової системи до відпалювання та масивів НЧ Co на Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si підкладці

Матеріал шару	Табличні дані		Товщина плівкової системи до відпалювання (кварц)	Середня висота рельєфу за АСМ масиву НЧ (після відпалювання)	Розрахункові дані з використанням ГА		
	$n$	$k$			$t$ , нм	$h_{\text{сер}}$ , нм	$n$
Co(1,5) / Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si, $\Delta_{\text{експ}} = -58,771$ , $\Psi_{\text{експ}} = 37,427$							
Co	2,213	4,171	1,5	-	2,260	4,011	3,1
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2,021	0	-	-	2,070	0	294,5
Si	3,874	-0,015	-	-	4,028	-0,014	-
Co(1,8) / Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si, $\Delta_{\text{експ}} = -59,754$ , $\Psi_{\text{експ}} = 34,872$							
Co	2,213	4,171	1,8	-	2,252	4,093	3,2
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2,021	0	-	-	2,072	0	294,5
Si	3,874	-0,015	-	-	4,054	-0,014	-
Co(1,5) / Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si ( $T_e = 1020$ К), $\Delta_{\text{експ}} = -58,926$ , $\Psi_{\text{експ}} = 37,796$							
Co	2,213	4,171	1,5	3,3	2,264	4,187	3,5
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2,021	0	-	-	2,071	0	294,5
Si	3,874	-0,015	-	-	4,039	-0,015	-
Co(1,8) / Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / Si ( $T_e = 1020$ К), $\Delta_{\text{експ}} = -59,388$ , $\Psi_{\text{експ}} = 34,735$							
Co	2,213	4,171	1,8	3,6	2,293	4,218	3,7
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2,021	0	-	-	2,072	0	295,1
Si	3,874	-0,015	-	-	4,036	-0,014	-

Експериментальні та розрахункові дані наведені у табл. 2.

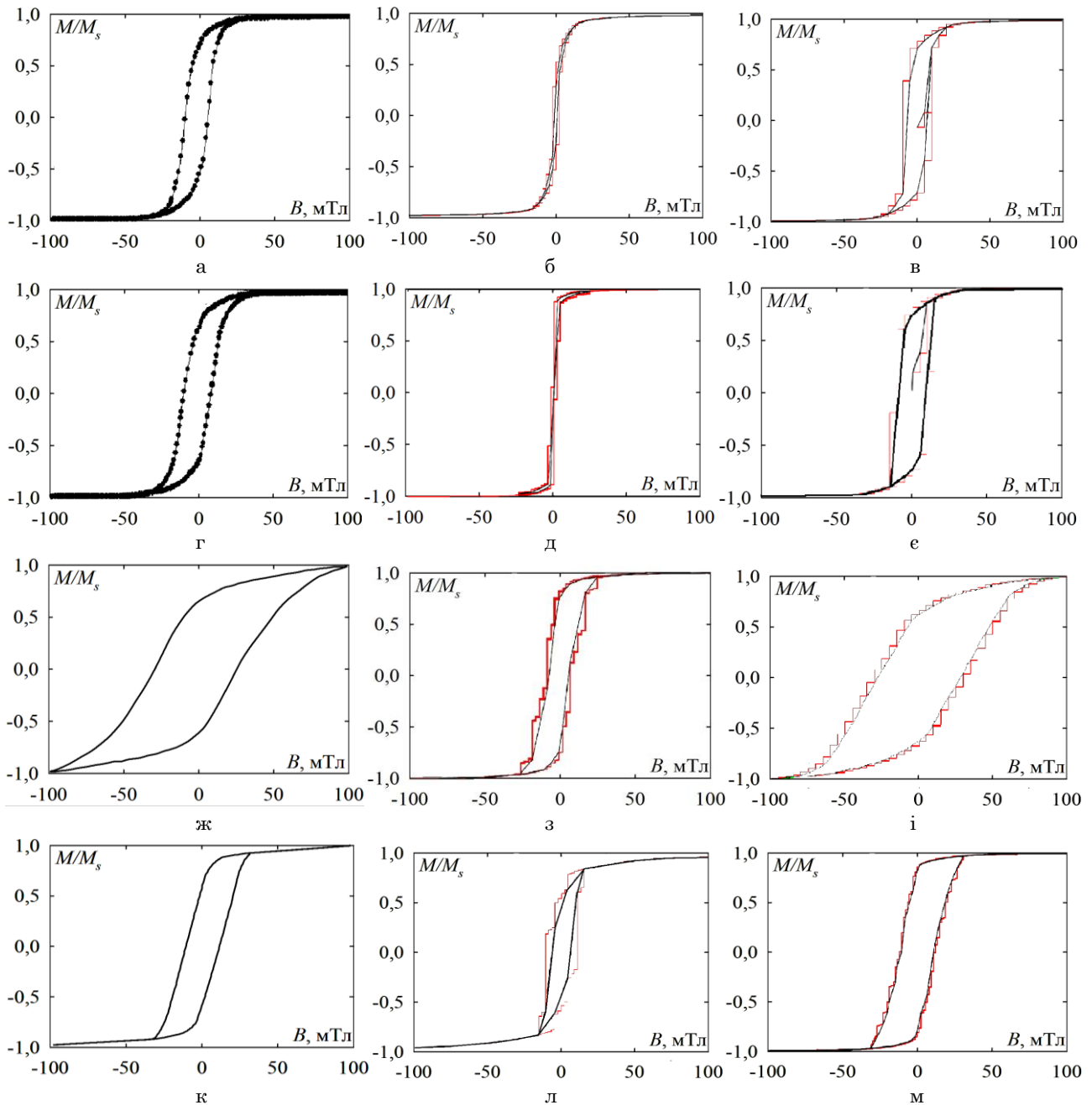
Розраховані оптичні константи для шарів Co як до так і після відпалювання майже співпадають з табличними:  $n = 2,272 \pm 0,02$  (табличне 2,213) та

$k = 4,114 \pm 0,104$  (табличне 4,171). Визначені за даними еліпсометрії товщини шарів Co добре корелюють з даними АСМ. Для першого зразка розрахована товщина Co складає 3,51 нм (за даними АСМ 3,3 нм), а для другого 3,66 нм (за даними АСМ 3,6 нм).

**3.2 Моделювання магнітооптичних властивостей масивів НЧ**

Результати розрахунків розмірів НЧ були апробовані при моделюванні їх магнітооптичних властивостей. Для масивів НЧ Ni і Co з різними характерними розмірами НЧ та відстанню між ними були проведені дослідження МОКЕ в поперечній геометрії вимірювання. Слід зазначити, що всі масиви НЧ на МОКЕ залежностях проявляли феромагнітні властивості. Для моделювання петель магнітного гістерезису масивів НЧ було використане програмне забезпечення oommf [3], у розрахунках використовується співвідношення Ландау-Ліфшиця [12] та Бра-

уна [13]. У якості розрахункових моделей використовувались як відтворенні за АФМ зображеннями, так і ті, що були перераховані за співвідношеннями (1) та (2). Оскільки електронографічні дослідження фазового складу отриманих під час попередніх досліджень масивів НЧ Ni і Co на поліімідних підкладках [1, 2] показали, що вони складаються з ГЦК фази, при розрахунках була обрана кубічна анізотропія матеріалу (значення  $K_1$  складало  $-5,7 \times 10^3$  та  $2,5 \times 10^5$  Дж/м<sup>3</sup> для Ni і Co відповідно), намагнічування насичення  $M_s = 450 \times 10^3$  та  $1200 \times 10^3$  А/м (для Ni і Co відповідно). Експериментальні та розрахункові залежності наведені на рис. 8.



**Рис. 8** – Експериментальні (а, г, ж, к) МОКЕ петлі гістерезису масивів НЧ Ni (а, г) і Co (ж, к) та змодельовані з використанням розмірів НЧ без урахування ефекту конволюції (б, д, з, л) та урахуванням ефекту конволюції оброблених за співвідношеннями (1) та (2) (в, е, і, м) моделей петлі магнітного гістерезису. Середній розрахований діаметр НЧ в масиві  $D_{ср,роз}$  складає 14,4; 16,0; 20,0 та 10,4 нм

#### 4. ВИСНОВКИ

Порівнявши експериментальні та розрахункові дані, можна зробити висновок, що для масивів НЧ Ni і Co добре співпадання між ними спостерігається лише при зміні геометричної моделі зразка з урахуванням впливу збільшення розмірів частинок на АСМ зображенні явищем конволюції. Використана методика оцінки реального розміру НЧ хоча і показала добрі результати, такий підхід у поєднанні з мо-

делюванням за теоріями Ландау-Ліфшица та Брауна дає можливість зробити в більшій мірі якісне, ніж кількісне прогнозування петель магнітного гістерезису масивів НЧ. Оскільки при обробці АСМ зображень за співвідношеннями (1) та (2) використовувались паспортні дані про величину радіусу вістря голки  $r$  та кута при її вершині  $\theta$ , для підвищення точності розрахунків необхідне проведення додаткових досліджень геометричних параметрів вістря зонду АСМ.

### Расчет реальных размеров наночастиц по АСМ изображениям и моделирование их магнитооптических свойств

В.А. Зленко, М.Г. Демиденко, С.И. Проценко

*Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина*

В работе описаны геометрические модели и приведены результаты расчета реальных размеров НЧ Ni и Co на аморфных  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  подложках, полученных методом термодиспергирования тонких металлических пленок, по данным атомно-силовой микроскопии. Результаты расчетов были использованы при моделировании магнито-оптических свойств массивов НЧ. Показано, что обработанные по описанным в работе соотношениям модели массивов НЧ позволяют получить хорошее совпадение между расчетными и полученными экспериментально методом МОКЕ данными.

**Ключевые слова:** Атомно-силовая микроскопия, Массив наночастиц, МОКЕ.

### Determination of the Nanoparticle Sizes Using AFM Images and Simulation of their Magneto-optical Properties

V.A. Zlenko, M.H. Demydenko, S.I. Protsenko

*Sumy State University, 2, Rymsky-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine*

This paper describes the geometric models and presents the calculation results of the actual sizes of Ni and Co nanoparticles on the amorphous  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  substrates obtained by thermal annealing of thin metal films using the data of atomic force microscopy. Results were used in the simulation of magneto-optical properties of arrays of nanoparticles. It is shown that processed by described in the paper equations models allow to obtain a good agreement between calculated and experimentally obtained by MOKE method data.

**Keywords:** Atomic-force microscopy, Nanoparticle array, MOKE.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.О. Зленко, С.І. Проценко, *Металлофиз. новейшие техн.* **33** No 4, 496 (2011) (V.O. Zlenko, S.I. Protsenko, *Metallofiz. Noveishie Technol.* **33** No 4, 496 (2011)).
2. В.О. Зленко, С.І. Проценко, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології* **9** No 3, 607 (2011).
3. <http://math.nist.gov/oommf/>.
4. K-ichi Shiramine, S. Muto, T. Shibayama, N. Sakaguchi, H. Ichinose, T. Kozaki, S. Sato, Y. Hakata, H.N. Yokoyama, M. Taniwaki, *J. Appl. Phys.* **101**, 033527 (2007).
5. S. Xu, M.F. Arnsdorf, *J. Microscopy* **187**, 43 (1997).
6. Z.-gang Zeng, G.-dong Zhu, Z. Guo, L. Zhang, X.-jian Yan, Q.-guo Du, R. Liu, *Ultramicroscopy* **108**, 975 (2008).  
М.С. Вакштейн, Н.В. Арагов, В.В. Зосимов, *Молекулярные технологии* **1**, 1 (2007).
7. В.О. Зленко, М.Г. Демиденко, С.І. Проценко, А.В. Боян, А.А. Возний, *Ж. нано-електрон. фіз.* **4** No 4, 04023 (2012) (V.A. Zlenko, M.G. Demydenko, S.I. Protsenko, et al., *J. Nano-Electron. Phys.* **4** No 4, 04023 (2012)).
8. N.A. Usov, C.-R. Chang, Z.-H. Wei, *J. Appl. Phys.* **89**, 7591 (2001).
9. Yu.B. Grebenshchikov, N.A. Usov *J. Appl. Phys.* **93**, 4810 (2003).
10. Yu.B. Grebenshchikov, N.A. Usov, K.S. Pestchanyi, *J. Appl. Phys.* **94**, 6649 (2003).
11. L. Landau, E. Lifshitz, *Phys. Zs. d. Sowjetunion* **8** No 2, 153 (1935).
12. W.F. Brown Jr., *Micromagnetics* (New York-London: Interscience Publishers: 1963).