

PACS numbers: 68.37.Lp, 68.55.Nq, 68.60.Dv, 72.15.Jf, 73.40.Jn, 73.50.Lw 73.61.At

## Фазовий склад і терморезистивні властивості плівкових систем Ge/Fe і Ag/Fe

О. В. Власенко, О. В. Пилипенко, Л. В. Однодворець

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

Вивчено особливості фазового складу, кристалічної структури та терморезистивних властивостей плівкових систем Ge/Fe і Ag/Fe. Наведено експериментальні результати, які встановлюють кореляцію між структурно-фазовим складом плівкових систем та їх електрофізичними властивостями.

The features of the phase composition, crystal structure, and thermoresistive properties of film Ge/Fe and Ag/Fe systems are studied. Experimental results are presented, with which a correlation between the structural and phase composition of film systems and their electrophysical properties is revealed.

Изучены особенности фазового состава, кристаллической структуры и терморезистивных свойств плёночных систем Ge/Fe и Ag/Fe. Приведены экспериментальные результаты, которые устанавливают корреляцию между структурно-фазовым составом плёночных систем и их электрофизическими свойствами.

**Ключові слова:** Ge/Fe, Ag/Fe, фазовий склад, терморезистивні властивості, термічний коефіцієнт опору.

*(Отримано 7 липня 2011 р.)*

### 1. ВСТУП

Тонкоплівкові приладові плівкові системи типу феромагнетик/напівпровідник і феромагнетик/шляхетний метал широко застосовуються в сучасній мікроелектроніці та сенсорному приладобудуванні для створення нагромаджувачів інформації великої місткості, вимірювачів малих та великих електричних струмів, магнетовимірювачів, діод і транзисторів Шотткі, елементів спінтроніки та діагностичних приладів. Відносна простота формування багаточарових стру-

ктур такого типу, їх унікальні фізичні властивості та широкий спектр можливостей застосування пояснює зацікавленість до експериментального і теоретичного дослідження електрофізичних і магнеторезистивних властивостей та фазових перетворень у процесі термооброблення при різних умовах перемішування окремих компонент системи. Так у роботі [1] вказано на інтенсивні дифузійні процеси в системі Ge/Fe, що призводить до утворення розмитих інтерфейсів. У мультишарах Ag/Fe можливо формування упорядкованих структур, оскільки їх компоненти не перемішуються [2]. За даними роботи [3], при одночасному осадженні компонент не більше 20 ат. % Ag може бути розчинено в ґратниці ОЦК-Fe. Авторами [4] методом імпульсного лазерного розпорошення при кімнатній температурі були одержані плівкові стопи Fe–Ag, які при концентрації Ag до 15% мають ОЦК-структуру, а при концентраціях Ag від 15 до 40% — двофазний склад (ОЦК-Fe + ГЦК-Ag). Ці результати вказують на те, що взаємна дифузія атомів Fe і Ag практично відсутня.

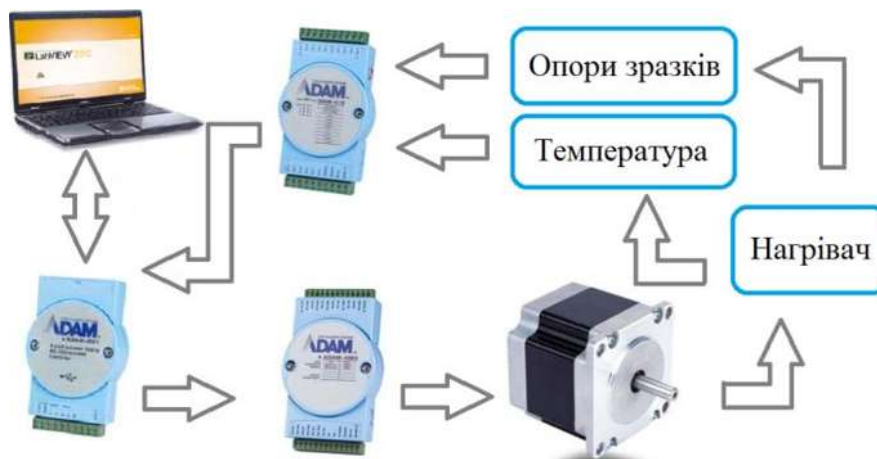
Штучно створені системи типу феромагнетик/напівпровідник і феромагнетик/шляхетний метал мають широкі перспективи з точки зору їх використання для створення елементів оперативної пам'яті на магнетних наноструктурах, багатофункціональних сенсорів, термостабільних спінових діодів і транзисторів [5].

## 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

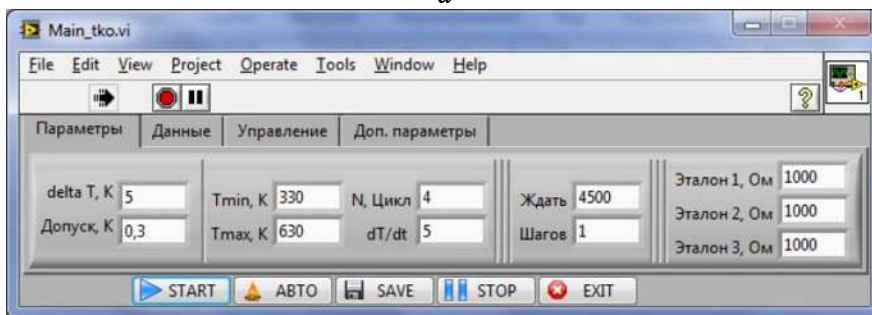
Для одержання двошарових плівкових зразків на основі Fe і Ge або Ag використовувалася вакуумна устава типу ВУП-5М. Пошарова конденсація і термовідпалювання плівкових систем Ge/Fe/П здійснювались терморезистивною методою при температурі підкладки (П)  $T_{\text{п}} \cong 300 \text{ K}$  і відпалювання  $T \cong 900 \text{ K}$ , а у випадку системи Ag/Fe  $T_{\text{п}} \cong 500 \text{ K}$  і  $T_{\text{в}} \cong 900 \text{ K}$ .

Вимірювання електричного опору виконувалося в автоматичному режимі за допомогою програмно-апаратного комплексу (рис. 1). Керування процесом термовідпалювання здійснювалось програмним забезпеченням у стилі багатівіконного інтерфейсу, розробленим у середовищі графічного програмування LabVIEW. На вкладках головного вікна програми розташовані елементи керування (вони задають параметри термовідпалення, зчитування інформації та роботи програмно-апаратного комплексу) та деякі з елементів виводу інформації. Вимірювання електричного опору виконувалося за чотириточковою схемою з використанням 8-канальних 16-бітних сигма-дельта АЦП ADAM-4018 і ADAM-4118 [6]. Для визначення величини опору кожного зразка було сконструйовано окремий вимірювальний контур на основі сталіх резисторів високого класу точності.

Кристалічна структура і фазовий склад зразків досліджувався методами електронної мікроскопії та електроннографії (прилад



а



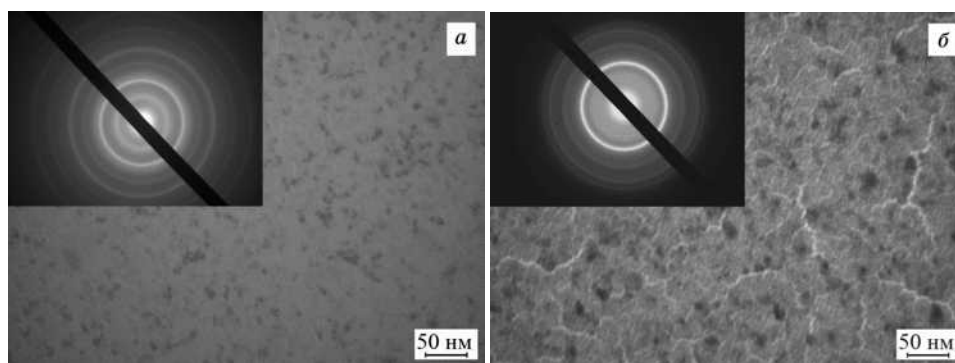
б

**Рис. 1.** Структурна схема автоматизованої системи для дослідження терморезистивних властивостей плівкових матеріалів та зовнішній вигляд головного вікна програми для автоматичного відпалювання зразків за схемою «нагрівання–охолодження».

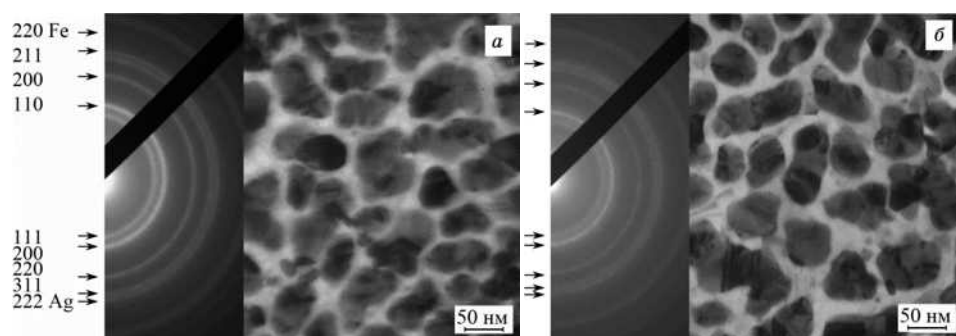
ПЕМ-125К).

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження фазового складу плівкових систем на основі Fe і Ge вказують на його залежність від температур підкладки і відпалювання. Зокрема, при конденсації плівок Ge на аморфні підкладки (плівка вуглецю, ситал) вони також мають аморфну структуру, а при конденсації на плівку Fe — квазіаморфну (ка-Ge, відносно низькі температури підкладки) або кристалічну (к-Ge) структуру. Плівки Fe, незалежно від температури підкладки, мають кристалічну структуру. Двошарові плівки Ge(20)/Fe(30)/П у невідпаленому і відпаленому стані (рис. 2, табл. 1 і 2) мають кристалічну будову за



**Рис. 2.** Мікроструктура і відповідні їй електроннограми невідпаленої плівкової системи Ge(20)/Fe(30)/П (а) та відпаленої до 900 К (б). В дужках указана товщина в нм.



**Рис. 3.** Мікроструктура невідпаленої (а) та відпаленої до  $T = 800$  К (б) плівки Ag(30)/Fe(30)/П.

виключенням, що у першому випадку утвориться незначна кількість аморфного  $\text{GeO}_2$  ( $\alpha\text{-GeO}_2$ ). На електроннограмах від термовідпалених зразків (рис. 2, б) фіксуються лінії  $\kappa\text{-GeO}_2$ , ОЦК-Fe та гексагональної фази GeFe.

Типові електроннограми і мікрознімки структури плівкових систем Ag/Fe/П у невідпаленому і відпаленому стані представлено на рис. 3. Розшифрування електроннограм (табл. 3 і 4) вказують на незначну розчинність атомів Fe у плівці Ag, оскільки параметер ґратниці Ag в цілому має величину дещо меншу в порівнянні з масивними зразками.

Розшифрування електроннограм щойносконденсованої та термостабілізованої плівкової системи Ag(30)/Fe(30)/П представлено в табл. 3 і 4. Як витікає з цих результатів, у даній плівковій системі зберігається індивідуальність окремих шарів, що можна пояснити особливістю формування зразків методом пошарової конденсації.

ТАБЛИЦЯ 1. Розшифрування електроннограмми від шойносконденсованої плівки ка-Ge(20)/Fe(30)/П.

№	I, в.о.	$d_{hkl}, \text{Å}$	$hkl$	Фаза	$a, \text{Å}$
1	С	3,528	110	а-GeO <sub>2</sub>	—
2	ДС	2,03	113	ка-Ge	—
3	сл	1,811	110	ОЦК-Fe	2,860
4	С	1,44	311	ка-Ge	—
5	С	1,197	200	ОЦК-Fe	2,861
6	сл	1,089	324	ка-Ge	—
7	сл	0,91	420	ка-Ge	—
8	сл	0,83	310	ОЦК-Fe	2,858
			222	ОЦК-Fe	2,859
ДС — дуже сильна, С — сильна, сл — слабка					
$\bar{a}_{\text{Fe}} = 2,859$					

ТАБЛИЦЯ 2. Розшифрування електроннограмми від термовідпаленої до 900 К плівкової системи к-Ge(20)/Fe(30)/П.

№	I, в.о.	$d_{hkl}, \text{Å}$	$hkl$	Фаза	$a, \text{Å}$
1	сл	3,526	110	к-GeO <sub>2</sub>	—
2	сл	2,879	102	к-GeO <sub>2</sub>	—
3	сл	2,503	110	ГЦТ-GeFe	5,002
4	ДС	2,029	002	ГЦТ-GeFe	—
5	сл	1,623	101	ОЦК-Fe	—
6	сл	1,518	103	ОЦК-Fe	—
7	сл	1,445	211	ГЦТ-GeFe	—
8	сл	1,251	300	ГЦТ-GeFe	5,004
9	сл	1,147	220	ГЦТ-GeFe	5,003
10	сл	1,0412	203	ГЦТ-GeFe	—
			021	ОЦК-Fe	—
ГЦТ — гранецентрована тетрагональна					
$\bar{a}_{\text{GeFe}} = 5,003$					

ТАБЛИЦЯ 3. Розшифрування електронограми від щойноскоденованої плівкової системи Ag(30)/Fe(30)/П.

№	<i>I</i> , в.о.	$d_{hkl}$ , Å	Фаза	<i>hkl</i>	<i>a</i> , Å
1	С	2,3580	Ag	111	4,084
2	ДС	2,0406	Ag; Fe	200	4,081; 2,876
3	ср	1,4429	Ag; Fe	220	4,081; 2,877
4	ср	1,2348	Ag	311	4,087
5	ср	1,1800	Ag; Fe	222	4,087; 2,865
6	сл	1,0220	Ag; Fe	400	4,088; 2,867
7	сл	0,9370	Ag	331	4,084
9	сл	0,9135	Ag	420	4,085

$\bar{a}_{Ag} = 4,085$ ,  $\bar{a}_{Fe} = 2,871$

ТАБЛИЦЯ 4. Розшифрування електронограми від термовідпаленої до 800 К плівкової системи Ag(30)/Fe(30)/П.

№	<i>I</i> , в.о.	$d_{hkl}$ , Å	Фаза	<i>hkl</i>	<i>a</i> , Å
1	С	2,3598	Ag	111	4,087
2	ДС	2,0441	Ag; Fe	200	4,088; 2,878
3	ср	1,4418	Ag; Fe	220	4,078; 2,869
4	ср	1,2311	Ag	311	4,083
5	ср	1,1775	Ag; Fe	222	4,079; 2,869
6	сл	1,0205	Ag; Fe	400	4,082; 2,870
7	сл	0,9352	Ag	331	4,076
8	сл	0,9139	Ag	420	4,087

$\bar{a}_{Ag} = 4,083$ ,  $\bar{a}_{Fe} = 2,870$

Типові температурні залежності питомого опору  $\rho(T)$  і термічного коефіцієнта опору  $\beta(T)$  для систем на основі Ge і Fe представлено на рис. 4. Їх характерною особливістю є велике значення  $\rho$  і, відповідно, — відносно мале значення  $\beta$ , що можна пояснити утворенням обмежених твердих розчинів атомів Ge у шарі Fe.

Можна стверджувати, що, в цьому випадку, як і в системі Ag/Fe/П, до великої міри зберігається індивідуальність окремих шарів. Максимум, який спостерігається при температурі відпалювання 700 К, можна пояснити частковою рекристалізацією ка-Ge (перехід ка-Ge  $\rightarrow$  к-Ge) з утворенням кристалітів фази  $\text{Ge}_2\text{Fe}$ , яка при подальшому відпалюванні до 900 К переходить у фазу GeFe.

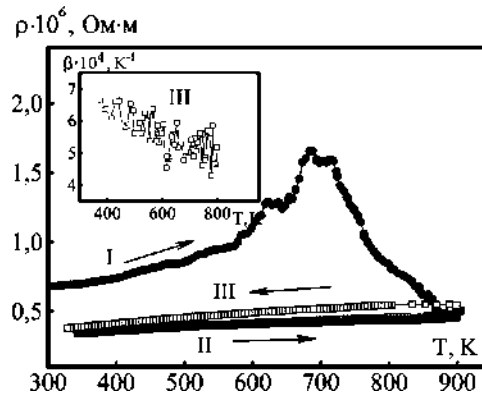


Рис. 4. Температурні залежності  $\rho$  і  $\beta$  для системи Ge(40)/Fe(30)/П. Римськими цифрами вказані номери термостабілізаційних циклів.

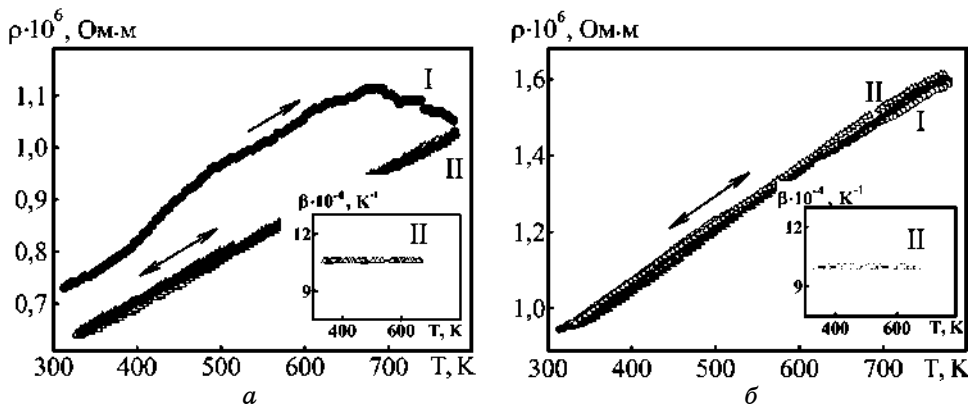


Рис. 5. Температурні залежності  $\rho$  і  $\beta$  для системи Ag(30)/Fe(30)/П (а) та Ag(10)/Fe(30)/П (б). Загальна концентрація атомів Ag у плівковій системі складає 37 (а) і 17 (б) ат. %.

Дослідження терморезистивних властивостей плівкової системи на основі Ag і Fe (рис. 5) вказують на те, що вони також мають відносно великий  $\rho$  і малий  $\beta$ , що можна пояснити утворенням обмежених твердих розчинів атомів Ge у шарах Fe (система Ge/Fe) та атомів Fe у шарах Ag (система Ag/Fe). Цей висновок до великої міри підтверджується результатами електроннографічної аналізи (табл. 3 і 4).

#### 4. ВИСНОВКИ

Виконані дослідження структурно-фазового стану і електрофізичних властивостей плівкових систем на основі ка- (або *a*-) Ge і Fe та Ag і Fe вказують на те, що при пошаровій конденсації з наступним термовідпалюванням цих систем не реалізуються до кінця умови стабілізації твердих розчинів атомів Ge у шарах Fe та атомів Fe у шарах Ag, у зв'язку з утворенням фаз GeFe і Ge<sub>2</sub>Fe у першому випадку та неефективністю дифузійних процесів при термообробленні в другому. Поряд з цим, відносно велике значення питомого опору  $i$ , відповідно, мале значення термічного коефіцієнта опору можуть якісно свідчити про утворення обмежених твердих розчинів.

Роботу виконано в межах бюджетної тематики №0112U001381 при фінансовій підтримці МОНМС України.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Л. А. Чеботкевич, А. В. Огнев, Ю. П. Иванов, К. Lenz, А. И. Ильин, К. С. Ермаков, *ФТТ*, **51**: 1761 (2009).
2. T. Phalet and M. J. Prandolini, *Phys. Rev. B*, **71**: 144301 (2005).
3. S. Kahl and H.-U. Krebs, *Phys. Rev. B*, **63**: 172103 (2000).
4. F. Liu, *Applied Physics A*, **81**: 4343 (2005).
5. В. Е. Буравцова, Е. А. Ганьшина, В. С. Гущин, С. И. Касаткин, А. М. Муравьев, Н. В. Плотникова, Ф. А. Пудонин, *ФТТ*, **46**, № 5: 864 (2004).
6. В. О. Зленко, С. І. Проценко, Р. Сафаріч, *Журнал нано- та електронної фізики*, **1**, № 2: 34 (2009).