

## АНОТАЦІЯ

**Шуляренко Д. О.** Температурні та концентраційні ефекти в електро- і магніторезистивних властивостях багатоконпонентних плівкових наноструктур. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика і наноматеріали. – Сумський державний університет, Суми, 2021.

Дисертаційна робота присвячена встановленню загальних закономірностей впливу концентраційних, розмірних та температурних ефектів на електро- і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів, сформованих на основі пермалоевого сплаву  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  та Ag.

У відповідності до поставлених задачами комплексних досліджень структурно-фазового стану та електро- і магніторезистивних властивостей нанорозмірних плівкових матеріалів на основі пермалоевого сплаву  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (Ru) та Ag були застосовані наступні методи: одночасна та пошарова електронно-променева конденсація у вакуумі; метод кварцового резонатора для вимірювання товщини *in-situ*; методи просвічуючої електронної мікроскопії, атомно-силової мікроскопії та електронографії для дослідження кристалічної структури і фазового складу; енергодисперсійний спектральний аналіз для визначення концентраційного складу зразків; метод високоточної резистометрії при дослідженні електрофізичних та магніторезистивних властивостей. Додаткові дослідження магнітних властивостей зразків з використанням методів вібраційної і SQUID-магнітометрії дозволили провести вимірювання магнітних параметрів з високою точністю як за кімнатних ( $T_{\text{вим}} = 300 \text{ K}$ ), так і низьких температур ( $T_{\text{вим}} = 2 \text{ K}$ ).

Показано, що застосування вибраної методики формування зразків дозволяє отримати в одному технологічному циклі серію нанорозмірних плівкових матеріалів, концентраційний склад яких змінювалася у широких межах (від 10 до 90 ат.%).

При формуванні нанорозмірних систем (Ru+Ag)/П були використані

результати досліджень фазового складу та кристалічної структури одношарових плівок пермалоевого сплаву  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  та Ag. Показано, що одношарові плівки пермалоевого сплаву  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ , як і одношарові плівки Ag, до та після термообробки за  $T_b = 700$  К мають однофазний склад, що відповідає ГЦК- $\text{Ni}_3\text{Fe}$  ( $\bar{a} = 0,353\text{-}0,355$  нм) та ГЦК-Ag ( $\bar{a} = 0,407\text{-}0,408$  нм). Таким чином, на їх основі можуть бути сформовані нанорозмірні матеріали зі стабільними властивостями у заданому температурному інтервалі.

З'ясовано, що фазовий стан нанорозмірних плівкових матеріалів сформованих на основі пермалоевого сплаву  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  та Ag після конденсації, незалежно від концентрації атомів срібла у системі, представляє собою комбінацію ГЦК- $\text{Ni}_3\text{Fe}$  + ГЦК-Ag з середніми значеннями параметрами ґраток  $\bar{a}$  (ГЦК- $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ) = 0,353 нм та  $\bar{a}$  (ГЦК-Ag) = 0,407 нм. Температурна обробка досліджуваних зразків за температурного інтервалу  $T_b = 300\text{-}700$  К не змінює фазовий стан системи. Нанорозмірна система залишається двофазною: ГЦК- $\text{Ni}_3\text{Fe}$  + ГЦК-Ag з параметрами ґратки  $\bar{a} = 0,356$  та 0,408 нм, відповідно.

Аналіз кристалічної структури свідчить про те, що при зростанні  $c_{\text{Ag}}$  відбувається перехід від кристалічної структури, що складається з зерен Ag впроваджених у феромагнітну матрицю пермалоевого сплаву до структури де зерна феромагнітної компоненти впроваджені у матрицю немагнітної. Даний перехід супроводжується процесом зростання середнього розміру кристалітів в системі (Pu+Ag)/П, який за температури відпалювання 500 К є незначним. У той же час, процес термообробки за  $T_b = 700$  К спричиняє більш суттєві зміни у кристалічній структурі зразків залежно від концентрації  $c_{\text{Ag}}$ . За  $c_{\text{Ag}} < 32$  ат.% відбувається стогранця росту зерен немагнітної компоненти як результат їх ізоляції один від одного в матриці феромагнітного матеріалу. На мікроснімках кристалічної структури зразків за  $c_{\text{Ag}} = 32\text{-}60$  ат.%, можна виділити нанорозмірні зерна ( $L = 2\text{-}5$  нм.) та кристаліти з середнім розміром до 50 нм, що відповідають відповідно феромагнітній та немагнітній компонентам системи. У випадку  $c_{\text{Ag}} > 70$  ат.%, кристалічна структура плівкової системи (Pu+Ag)/П може бути описана так: нанорозмірні зерна феромагнітної компоненти випадковим чином розподілені в об'ємі

немагнітного матеріалу.

Встановлені закономірності в концентраційних та розмірних залежностях питомого опору, термічного коефіцієнту опору та температури заліковування дефектів для нанорозмірних матеріалів в інтервалі концентрацій  $c_{\text{Ag}} = (5-95)$  ат.%. Показано, що додавання Ag до пермалоевого сплаву  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  та збільшенні концентрації  $c_{\text{Ag}}$  з 26 до 48 ат.% спричиняє зростання величини  $\rho$  у системі (Pu+Ag)/П до  $2,5 \cdot 10^{-7}$  Ом·м у порівнянні з даними для одношарових плівок пермалоевого сплаву  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  за  $d = 55$  нм ( $\rho(\text{Pu}) = 2,0 \cdot 10^{-7}$  Ом·м). Подальше збільшення концентрації атомів Ag призводить до різкого зменшення питомого опору до величини  $\rho$ , характерної для одношарової плівки Ag(55)/П, що складає  $1,7 \cdot 10^{-7}$  Ом·м, що пов'язано зі зміною у кристалічній структурі зразків. На концентраційних залежностях  $\beta(c_{\text{Ag}})$  спостерігається мінімум при  $c_{\text{Ag}} = 48$  ат.%, якому відповідає величина  $\beta = 1,8 \cdot 10^3 \text{ K}^{-1}$ .

Показано, що для нанорозмірних плівкових матеріалів (Pu+Ag)/П також є характерним прояв розмірного ефекту в терморезистивних властивостях. Зростання загальної товщини з 20 до 100 нм спричиняє різке зменшення величини питомого опору у 5-6 разів, в той час як величина ТКО збільшується у 2-3 рази.

Порівняльний аналіз експериментальних залежностей  $\rho(T)$  та  $\beta(T)$  для зразків, сформованих методами одночасної та пошарової конденсації, свідчить про те, що зміна методу конденсації з одночасної на пошарову не впливає на характер температурних залежностей питомого опору і ТКО, за умови, що витримані однакові загальна товщина зразків та їх концентраційний склад.

Встановлено, що амплітуда та характер польових залежностей магнітоопору нанорозмірних плівкових матеріалів, сформованих на основі пермалоевого сплаву  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  та Ag, визначаються їх концентраційним складом. Максимальне значення ізотропного магніторезистивного ефекту при вимірюванні за кімнатної температури для свіжосконденсованих зразків становить 1,85 % ( $c_{\text{Ag}} = 60$  ат.% та  $d = 100$  нм), а для термовідпалених – 1,80 % ( $T_{\text{в}} = 500 \text{ K}$ ,  $c_{\text{Ag}} = 60$  ат.% та  $d = 60$  нм). Збільшення індукції

прикладеного зовнішнього магнітного поля з 500 мТл до 1,5 Т не впливає на форму польової залежності магнітоопору  $MO(B)$ : гістерезис і насичення відсутні та при цьому відбувається зростання величини  $MO$  до 2,5%. Зменшення ж температури вимірювання з 300 до 10 К супроводжується подальшим зростанням амплітуди магніторезистивного ефекту до 3,8 %. У той же час розмірні залежності магнітоопору для нанорозмірних плівкових систем (Ru+Ag)/П характеризуються наявністю максимуму  $MO = 1,80\%$  за товщини 60 нм та температури 500 К. Даний максимум зміщується в бік менших товщин ( $d = 50$  нм) при зростанні температури відпалювання до 700 К і становить 0,85 %.

Експериментально показано, що характер розмірної залежності  $MO$  залежить від температури обробки зразків. Для свіжесконденсованих зразків характерним є зростання  $MO$  при зростанні товщини з виходом на насичення за  $d = 100$  нм. У той же час залежності  $MO(d)$  для зразків після термообробки характеризуються наявністю максимуму за товщини 60 нм та температури  $T_b = 500$  К, що зміщується в бік менших товщин при зростанні  $T_b$  до 700 К.

Додаткові дослідження магнітних властивостей дозволили зробити висновок, що нанорозмірні частинки пермалаю, що формується на стадії конденсації знаходяться у феромагнітному, а не суперпарамагнітному стані, що є необхідною умовою для прояву ізотропного магніторезистивного ефекту. Незначне зростання намагніченості насичення зразків після відпалювання до 500 К підтверджує висновок, зроблений на основі АФМ досліджень: у процесі термообробки за температури 500 К відбувається поступове зростання середнього розміру зерен феромагнітної компоненти.

У випадку формування нанорозмірних матеріалів з використанням методу пошарової конденсації максимальне значення ізотропного  $MO = 0,35\%$  отримано у випадку багат шарової системи  $[Ru/Ag]_{16}/П$ , тобто системи з максимальною кількістю повторів бішару Ru/Ag. Це свідчить про більшу ефективність методу одночасної конденсації для реалізації ізотропного магнітоопору, величиною понад 1%.

**Ключові слова:** нанорозмірні матеріали, пермалоєвий сплав, срібло, пошарова і одночасна конденсація, питомий опір, термічний коефіцієнт

опору, магнітоопір, концентраційний і розмірний ефекти.

### **Список публікацій за темою дисертації**

#### **1. Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати**

1. Size and heat treatment effects in magnetoresistive properties of Ag-added  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  film systems / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, O.V. Pylypenko, S.I. Vorobiov, V. Tkáč, E. Čižmár // Applied Physics A. – 2021. – V. 127, No 5. – P. 306.

2. Magnetoresistive Properties of Multilayer Film Systems Based on Permalloy and Silver / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, S.-R. Dolgov-Gordiichuk, L.V. Odnodvoretz // Physics and Chemistry of Solid State. – 2021. – V. 22, No 1. – P. 175-179.

3. Concentration and Size Effects in Electrophysical Properties of Thin Films Based on Permalloy and Silver / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, O.V. Pylypenko, M.S. Ovrutskyi, L.V. Odnodvoretz // Physics and Chemistry of Solid State. – 2020. – V. 21, No 2. – P. 238-242.

4. Concentration and heat treatment effects in magnetoresistive properties of Ag-added  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  film systems / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, O.V. Pylypenko, L.V. Odnodvoretz // J. Magn. Magn. Mater. – 2019. – V. 485. – P. 89-94.

5. Electrophysical Properties of Multilayer Film Systems Based on Permalloy and Silver / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko** // J. Nano- Electron. Phys. – 2019. – V. 11. – P. 03030.

6. Структурно-фазовий стан та електрофізичні властивості плівкових систем на основі пермалою і срібла / **Д.О. Шуляренко**, І.М. Пазуха, О.В. Пилипенко, Л.В. Оdnodvoretz // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 0633-0644.

#### **2. Наукові праці апробаційного характеру**

7. Magnetoresistive properties of granular nanostructures based on permalloy and silver / K.S. Odnodvoretz, **D.O. Shulyarenko**, I.M. Pazukha //

Proceedings of the XIII International conference “Electronics and applied physics”. – Kyiv: Taras Shevchenko National University, 2017. – P. 58-59.

8. Magnetic Properties of Pseudo Spin-Valves Py/Ag/Co / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, S.I. Protsenko // Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP). – Zatoka: SSU, – 2018. – Part 3 – P. 03TFNMC54.

9. Magnetoresistive Properties of Thin-film Systems Based on Permalloy and Silver / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, O.V. Pylypenko // Proceedings of IEEE International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties” (NAP-2020). – 2020. – V. 1. – P. 01NMM03.

10. Овруцький А.С. Тензорезистивні властивості плівкових наносистем на основі пермалою та срібла як чутливих елементів тензодатчиків / А.С. Овруцький, **Д.О. Шуляренко**, І.М. Пазуха // Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції (ФЕЕ-2018)». – Суми: Сумський державний університет, 2018. – С. 80-81.

11. Овруцький М.С. Тонкоплівковий чутливий елемент датчика магнітного поля на основі  $Ni_{80}Fe_{20}$  та Ag / М.С. Овруцький, **Д.О. Шуляренко**, І.М. Пазуха // Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної конференції (ФЕЕ-2018)». – Суми: Сумський державний університет, 2018. – С. 82.

12. Овруцький М. Концентраційна залежність магнітоопору нанорозмірних систем на основі пермалою та срібла / М. Овруцький, **Д. Шуляренко**, І. Пазуха // Тези доповідей міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики Еврика-2018. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2018. – С. А22.

13. Magnetoresistive properties of nanostructured thin film systems based on  $Ni_{80}Fe_{20}$  and Ag / P. Żukowski, I. Pazukha, **D. Shuliarenko**, S. Protsenko // Book of abstract of XII-th International Conference «Ion Implantation and Other

Applications of Ions and Electrons», ION 2018. – Kazimierz Dolny, Poland, 2018. – P. 129.

14. **Shuliarenko D.O.** Effect of the silver addition on magnetoresistive properties of permalloy thin films / **D.O. Shuliarenko**, I.M. Pazukha // Матеріали V Міжнародної конференції «Сучасні проблеми фізики конденсованого стану». – Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2018. – С. 104-105.

15. **Shuliarenko D.O.** Electrophysical properties of nanostructured thin film systems based on Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> and Ag / **D.O. Shuliarenko**, I.M. Pazukha // Materials of international meeting “Clusters and Nanostructured Materials (CNM-5)”. – Uzhgorod: Uzhgorod National University, 2018. – P. 240.

16. **Шуляренко Д.О.** Вплив кількості повторів фрагменту Py/Ag на магніторезистивні властивості компонентів електронних систем / **Д.О. Шуляренко**, С.Р. Долгов-Гордійчук, І.М. Пазуха // Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕМ :: 2019». – Суми: Сумський державний університет, 2019. – С. 81.

17. **Шуляренко Д.О.** Вплив інтерфейсного розсіювання на терморезистивні властивості багат шарових плівкових систем на основі пермалою та срібла / **Д.О. Шуляренко**, О.В. Ромась, І.М. Пазуха // Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕМ :: 2019». – Суми: Сумський державний університет, 2019. – С. 25.

18. **Shuliarenko D.O.** Electrophysical Properties of Thin Film Systems Based on Permalloy and Silver Prepared by Co-evaporation Technique / **D.O. Shuliarenko**, O.V. Romas', I.M. Pazukha // Materials XVII international conference on physics and technology of thin films and nanosystems. – Ivano-Frankovsk: Vasyl Stefanyk PNU, 2019. – P. 264.

19. Розмірний ефект в електрофізичних властивостях елементів електронних систем на основі пермалою та срібла / **Д.О. Шуляренко**, О.В. Пилипенко, О.В. Ромась, І.М. Пазуха // Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕМ :: 2020». – Суми: Сумський державний університет, 2020. – С. 107.

20. Розмірні та температурні ефекти в магніторезистивних властивостях плівкових елементів електроніки на основі пермалою та срібла / **Д.О. Шуляренко**, О.В. Пилипенко, М.С. Овруцький, І.М. Пазуха // Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕМ :: 2020». – Суми: Сумський державний університет, 2020. – С. 108.

21. **Shuliarenko D.O.** Size effect in electrophysical properties of thin films based on permalloy and silver / **D.O. Shuliarenko**, I.M. Pazukha // International Research and Practice Conference “Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2020). – Kyiv: LLC «Computer-publishing, information center», 2020. – P. 36.

22. Size and heat treatment effect in magnetoresistive properties of nanosized structures based on permalloy and silver / **D.O. Shuliarenko**, M.S. Ovrutskyi, O.V. Pylypenko, I.M. Pazukha // Матеріали міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2020». – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2020. – С. А17.

## SUMMARY

**Shuliarenko D.O.** Temperature and concentration effects in electro- and magnetoresistive properties of multicomponent thin-film nanostructures. Manuscript.

Ph. D. thesis submitted for the degree of doctor of philosophy, specialty 105 – “Applied Physics and Nanomaterials”. – Sumy State University, Sumy, 2021.

Ph. D. is devoted to the establishment of general trends of influence of concentration, size, and temperature effects on electro- and magnetoresistive properties of nanosized film materials formed based on permalloy alloy  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  and Ag.

According to the purpose and the current research tasks of complex investigation of crystal structure and phase state, electro- and magnetoresistive properties of nanosized film materials based on permalloy (Py) and Ag, the



methods were used: co-evaporation and layered electron-beam condensation in a vacuum; the method of quartz resonator for *in-situ* measurement of thickness; the methods of transmission electron microscopy, atomic force microscopy, and electronography for investigation of crystal structure and phase state; energy dispersion spectral analysis to determine the composition of the samples; the method of high-precision resistometry in the study of electrophysical and magnetoresistive properties. Additional investigations of magnetic properties of samples were done using methods of vibration and SQUID-magnetometry. These allowed to carry out measurements of magnetic parameters with a high precision at room ( $T_{\text{meas}} = 300$  K) and low temperatures ( $T_{\text{meas}} = 2$  K).

It was demonstrated that the application of the chosen technique of forming nanosized materials allows obtaining in one technological cycle a series of nanosized film materials, the composition of which varied widely (from 5 to 95 at.%).

At the formation of (Py+Ag)/S nanosized systems, the previous investigation of phase state and crystal structure of pure permalloy  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  and Ag thin films were used. It was demonstrated that a singled-layer permalloy  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  and Ag thin films before and after annealing up to  $T_{\text{ann}} = 700$  K have a single-phase state. It correspond to fcc- $\text{Ni}_3\text{Fe}$  ( $\bar{a} = 0.353\text{-}0.355$  nm) and fcc-Ag ( $\bar{a} = 0.407\text{-}0.408$  nm). Thus, on their basis can be formed nanosized materials with stable properties in a given temperature range.

It was found that the phase state of nanoscale film materials based on permalloy alloy  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  and Ag after condensation, regardless of the concentration of silver atoms in the system, is a combination of fcc- $\text{Ni}_3\text{Fe}$  + fcc-Ag with an average lattice parameter  $\bar{a}$  (fcc- $\text{Ni}_3\text{Fe}$ ) = 0.353 nm and  $\bar{a}$  (fcc-Ag) = 0.407 nm. Temperature treatment of the studied samples at a temperature range  $T_{\text{ann}} = 300\text{-}700$  K does not change the phase state of the system. The nanoscale system remains two-phase (fcc- $\text{Ni}_3\text{Fe}$  + fcc-Ag with lattice parameters  $\bar{a} = 0.356$  and 0.408 nm, respectively).

Analysis of the crystal structure shows that with the growth of  $c_{\text{Ag}}$  there is a transition from the crystal structure consisting of Ag grains embedded in the

ferromagnetic matrix of the permalloy to the structure where the grains of the ferromagnetic component is embedded in the nonmagnetic matrix. Such transition This transition is accompanied by a process of growth of the average size of crystallites in the system (Py+Ag)/S, which at an annealing temperature of 500 K is insignificant. At the same time, the heat treatment process at  $T_{\text{ann}} = 700$  K causes more significant changes in the crystal structure of the samples depending on the concentration of  $c_{\text{Ag}}$ . At  $c_{\text{Ag}} < 32$  at.% there is a stagnation of grain growth of the nonmagnetic component as a result of their isolation from each other in the matrix of ferromagnetic material. On the images of the crystal structure of the samples at  $c_{\text{Ag}} = 32-60$  at.%, it is possible to distinguish nanosized ( $L = 2-5$  nm) and crystallites with an average size up to 50 nm, which correspond to the ferromagnetic and nonmagnetic components of the system, respectively. In the case of  $c_{\text{Ag}} > 70$  at.%, the crystalline structure of the film system (Py+Ag)/S can be described as follows: the nanosized grains of the ferromagnetic component is randomly distributed in the volume of the nonmagnetic material.

Regularities in concentration and size dependences of resistivity, temperature coefficient of resistance, and temperature of healing of defects for nanosized materials in the range of concentrations  $c_{\text{Ag}} = (10-90)$  at.% are established. It was demonstrated that the addition of Ag to the permalloy  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  and the increase in the concentration of  $c_{\text{Ag}}$  from 26 to 48 at.% causes an increase in the value of  $\rho$  in the system (Py+Ag)/S to  $2.5 \cdot 10^{-7}$  Ohm·m compared with data for single-layer  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  permalloy films at  $d = 55$  nm ( $\rho(\text{Py}) = 2.0 \cdot 10^{-7}$  Ohm·m). A further increase in the concentration of Ag atoms leads to a sharp decrease in the resistivity to the value of  $\rho$ , characteristic of a single-layer Ag(55)/S film, which is  $1.7 \cdot 10^{-7}$  Ohm·m, which is due to changes in the crystal structure of the samples. The concentration dependences of  $\beta(c_{\text{Ag}})$  show a minimum at  $c_{\text{Ag}} = 48$  at.%, which corresponds to the value of  $\beta = 1.8 \cdot 10^3$  K<sup>-1</sup>.

It is shown that nanosized film materials (Py+Ag)/S is also characterized by a display of the size effect in thermoresistive properties. The increase in the total thickness from 20 to 100 nm causes a sharp decrease in the value of resistivity 5-6 times, while the value of TCR increases by 2-3 times.

A comparative analysis of the experimental dependences  $\rho(T)$  and  $\beta(T)$  for

samples formed by simultaneous and layer-by-layer condensation shows that changing the condensation method from simultaneous to layer-by-layer does not affect the nature of temperature dependences of resistivity and TCR.

It is established that the amplitude and nature of the field dependences on the magnetoresistance of nanosized film materials formed based on the permalloy  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  and Ag are determined by their composite composition. The maximum value of the isotropic magnetoresistive effect for freshly condensed samples is 1.85% for samples at  $c_{\text{Ag}} = 60$  at.% and  $d = 100$  nm and for thermally annealed – 1.80% at  $T_{\text{ann}} = 500$  K samples  $c_{\text{Ag}} = 60$  at.% and  $d = 60$  nm (at the measurement at room temperature). Increasing the induction of the applied external magnetic field from 500 mT to 1.5 T does not affect the shape of the field dependence of the magnetic resistance  $\text{MR}(B)$ . Hysteresis and saturation are absent. At the same time, there is an increase in the value of MR to 2.5%. The decrease in the measurement temperature from 300 to 4 K is accompanied by a further increase in the amplitude of the magnetoresistive effect to 3.8%. At the same time, the size dependences of the magnetoresistance for nanoscale film systems (Py+Ag)/S are characterized by the presence of a maximum  $\text{MR} = 1.80\%$  at a thickness of 60 nm and a temperature of 500 K. This maximum is shifted toward smaller thicknesses ( $d = 50$  nm) at the increase in annealing temperature to 700 K and is 0.85%.

It is experimentally shown that the nature of the size dependence of the MR depends on the temperature of heat treatment of the samples. As-deposited samples are characterized by an increase in MR with increasing thickness with a yield to saturation at  $d = 100$  nm. At the same time, the dependences of  $\text{MR}(d)$  are characterized by the presence of a maximum at a thickness of 60 nm and a temperature of 500 K, which shifts toward smaller thicknesses with increasing annealing temperature to 700 K.

Additional studies of the magnetic properties allowed us to conclude that nanosized particles of the translucent formed at the condensation stage have a ferromagnetic nature, which is a necessary condition for the manifestation of the isotropic magnetoresistive effect. A slight increase in the saturation magnetization of the samples after annealing to 500 K confirms the conclusions made based on studies by the AFM method: a gradual increase in the average size of

ferromagnetic nanoparticles observed in the process of heat treatment at a temperature of 500 K

In the case of forming nanosized materials using the layer-by-layer condensation method, the maximum value of the isotropic MR = 0.35% was obtained in the case of the multilayer system [Py/Ag]<sub>16</sub>/S, i.e. the system with the maximum number of Py/Ag bilayer repeats. This indicates a greater efficiency of the method of simultaneous condensation for the implementation of isotropic magnetoresistance, greater than 1%.

**Keywords:** nanosized materials, permalloy, silver, co-evaporation, layer-by-layer condensation, resistivity, temperature coefficient of resistance, magnetoresistance, concentration effect, size effect.

### **The publication list of the applicant of PhD thesis**

#### **1. The scientific workd containing the main published scientific results**

1. Size and heat treatment effects in magnetoresistive properties of Ag-added Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> film systems / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, O.V. Pylypenko, S.I. Vorobiov, V. Tkáč, E. Čížmár // Applied Physics A. – 2021. – V. 127, No 5. – P. 306.

2. Magnetoresistive Properties of Multilayer Film Systems Based on Permalloy and Silver / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, S.-R. Dolgov-Gordiichuk, L.V. Odnodvoret // Physics and Chemistry of Solid State. – 2021. – V. 22, No 1. – P. 175-179.

3. Concentration and Size Effects in Electrophysical Properties of Thin Films Based on Permalloy and Silver / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, O.V. Pylypenko, M.S. Ovrutskyi, L.V. Odnodvoret // Physics and Chemistry of Solid State. – 2020. – V. 21, No 2. – P. 238-242.

4. Concentration and heat treatment effects in magnetoresistive properties of Ag-added Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> film systems / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, O.V. Pylypenko, L.V. Odnodvoret // J. Magn. Magn. Mater. – 2019. – V. 485. – P. 89-94.

5. Electrophysical Properties of Multilayer Film Systems Based on Permalloy and Silver / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko** // J. Nano- Electron. Phys. – 2019. – V. 11. – P. 03030.

6. Structure and phase state and electrophysical properties of thin film systems based on permalloy and silver / **D.O. Shuliarenko**, I.M. Pazukha, O.V. Pylypenko, L.V. Odnodvoretz // Nanosistemi, nanomateriali, nanotechnologies. – 2018. – V. 16, No 4. – P. 0633-0644.

## **2. Наукові праці апробаційного характеру**

7. Magnetoresistive properties of granular nanostructures based on permalloy and silver / K.S. Odnodvoretz, **D.O. Shulyarenko**, I.M. Pazukha // Proceedings of the XIII International conference “Electronics and applied physics”. – Kyiv: Taras Shevchenko National University, 2017. – P. 58-59.

8. Magnetic Properties of Pseudo Spin-Valves Py/Ag/Co / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, S.I. Protsenko // Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP). – Zatoka: SSU, – 2018. – Part 3 – P. 03TFNMC54.

9. Magnetoresistive Properties of Thin-film Systems Based on Permalloy and Silver / I.M. Pazukha, **D.O. Shuliarenko**, O.V. Pylypenko // Proceedings of IEEE International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties” (NAP-2020). – 2020. – V. 1. – P. 01NMM03.

10. Ovrutskyi A.S. Strain properties of film nanosystems based on permalloy and silver as sensitive elements of the strain sensors / A.S. Ovrutskyi, **D.O. Shuliarenko**, I.M. Pazukha // Materials and program of the scientific and technical conference «Physics, electronics, electrical engineering :: 2018». – Sumy: SSU, 2018. – P. 80-81.

11. Ovrutskyi M.S. Тонкоплівковий чутливий елемент датчика магнітного поля на основі  $Ni_{80}Fe_{20}$  та Ag / M.S. Ovrutskyi, **D.O. Shuliarenko**, I.M. Pazukha // Materials and program of the scientific and technical conference «Physics, electronics, electrical engineering :: 2018». – Sumy: SSU, 2018. – P. 82.

12. Ovrutskyi M. Концентраційна залежність магнітоопору нанорозмірних систем на основі пермалою та срібла / M. Ovrutskyi, **D. Shuliarenko**, I. Pazukha // Book of abstracts «International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics HEUREKA-2018». – Lviv, 2018. – P. A22.

13. Magnetoresistive properties of nanostructured thin film systems based on Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> and Ag / P. Żukowski, I. Pazukha, **D. Shuliarenko**, S. Protsenko // Book of abstract of XII-th International Conference «Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons», ION 2018. – Kazimierz Dolny, Poland, 2018. – P. 129.

14. **Shuliarenko D.O.** Effect of the silver addition on magnetoresistive properties of permalloy thin films / **D.O. Shuliarenko**, I.M. Pazukha // Materials of conference «Modern problem of condensed matter physics». – Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2018. – P. 104-105.

15. **Shuliarenko D.O.** Electrophysical properties of nanostructured thin film systems based on Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> and Ag / **D.O. Shuliarenko**, I.M. Pazukha // Materials of international meeting “Clusters and Nanostructured Materials (CNM-5)”. – Uzhgorod: Uzhgorod National University, 2018. – P. 240.

16. **Shuliarenko D.O.** Influence of the number of repetitions of fragment Py/Ag on magnetoresistive properties of components of electron systems / **D.O. Shuliarenko**, S.R. Dolhov-Gordiichuk, I.M. Pazukha // Materials and program of the scientific and technical conference «Physics, electronics, electrical engineering :: 2019». – Sumy: SSU, 2019. – P. 81.

17. **Shuliarenko D.O.** Influence of interface scattering on thermoresistive properties of multilayers film systems based on permalloy and silver / **D.O. Shuliarenko**, O.V. Romas', I.M. Pazukha // Materials and program of the scientific and technical conference «Physics, electronics, electrical engineering :: 2019». – Sumy: SSU, 2019. – P. 25.

18. **Shuliarenko D.O.** Electrophysical Properties of Thin Film Systems Based on Permalloy and Silver Prepared by Co-evaporation Technique / **D.O.**

**Shuliarenko, O.V. Romas', I.M. Pazukha // Materials XVII international conference on physics and technology of thin films and nanosystems. – Ivano-Frankovsk: Vasyl Stefanyk PNU, 2019. – P. 264.**

19. Size effect in electrophysical properties of elements of electronic systems based on permalloy and silver / **D.O. Shuliarenko, O.V. Pylypenko, O.V. Romas', I.M. Pazukha // Materials and program of the scientific and technical conference «Physics, electronics, electrical engineering :: 2020».** – Sumy: SSU, 2020. – P. 107.

20. Size and temperature effects in magnetoresistive properties of thin-film elements of electronics based on permalloy and silver / **D.O. Shuliarenko, O.V. Pylypenko, M.S. Ovrutskyi, I.M. Pazukha // Materials and program of the scientific and technical conference «Physics, electronics, electrical engineering :: 2020».** – Sumy: SSU, 2020. – P. 108.

21. **Shuliarenko D.O.** Size effect in electrophysical properties of thin films based on permalloy and silver / **D.O. Shuliarenko, I.M. Pazukha // International Research and Practice Conference “Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2020).** – Kyiv: LLC «Computer-publishing, information center», 2020. – P. 36.

22. Size and heat treatment effect in magnetoresistive properties of nanosized structures based on permalloy and silver / **D.O. Shuliarenko, M.S. Ovrutskyi, O.V. Pylypenko, I.M. Pazukha // Book of abstracts «International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics HEUREKA-2020».** – Lviv, 2020. – P. A17.