

ВИСНОВОК

рецензентів про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертаційної роботи Шуляренка Дениса Олеговича «Температурні і концентраційні ефекти в електро- і магніторезистивних властивостях багатокомпонентних плівкових наноструктурах», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – прикладна фізика та наноматеріали

1. Актуальність теми дослідження

Серед феромагнітних матеріалів, які знайшли широке практичне застосування, можна виділити пермалоевий сплав $Ni_{80}Fe_{20}$ (Py). Даний матеріал відноситься до класу магнітом'яких феромагнетиків і характеризується низьким значенням коерцитивної сили, великою намагніченістю насичення та високою магнітною сприйнятливістю. Завдяки цьому пермалоевий сплав $Ni_{80}Fe_{20}$ служить базовим матеріалом при реалізації технологій магнітного запису, а також при виготовленні чутливих елементів сенсорів. Розширити галузі його практичного застосування можна шляхом додавання до третього компонента. Наприклад, шляхом додавання атомів Tb до складу пермалоевого сплаву $Ni_{80}Fe_{20}$ можна досягти збільшення динамічного загасання намагніченості. Введення атомів Cu, Ag або Au дозволяє отримати нанорозмірні матеріали, у яких на межах феромагнітна наночастинка/немагнітна матриця реалізується спін-залежне розсіювання електронів, що спричиняє появу явища гігантського магнітоопору. Для збільшення ефективності процесів спін-залежного розсіювання електронів у даному випадку значна увага приділяється вибору композиційного складу матеріалу, оскільки від концентрації магнітної компоненти буде залежати середній розмір феромагнітних наночастинок та їх розподіл в об'ємі немагнітної матриці.

Існує велика кількість робіт, які присвячені вивченню різних фізичних властивостей нанорозмірних плівкових матеріалів, сформованих на основі пермалоевих сплавів Ni_xFe_{1-x} та благородних металів. Однак, більшість із них вивчає системи, ефективна товщина яких є більшою за 100 нм. У той же час, розвиток сучасних напрямів електроніки вимагає переходу до нанорозмірного рівня при виготовленні базових компонент та елементів. А це у свою чергу стимулює дослідників звернути свою увагу на об'єкти, ефективна товщина яких не перевищує 100 нм. Іншою важливою проблемою, яка ще не знайшла свого вирішення є пошук матеріалів з високою температурною стабільністю характеристик, що дозволить розробити функціональні елементи зі стабільними робочими параметрами. Цього можна досягти шляхом комплексного підходу до формування нанорозмірних матеріалів та дослідження їх структурно-фазового стану і фізичних властивостей (електро- та магніторезистивних).

2. Найсуттєвіші результати дисертації, їх достовірність і новизна; значення для теорії і практики

У результаті проведеного дослідження дисертантом отримані такі нові результати:

– уперше отримані концентраційні залежності питомого опору, ТКО, а також концентраційна залежність температури заліковування дефектів у нанорозмірних матеріалах на основі Pu і Ag . Показано, що зміна концентрації атомів немагнітного матеріалу в діапазоні від 20 до 85 ат.% призводить до появи мінімуму або максимуму відповідно на залежностях $\rho(c_{Ag})$ та $\beta(c_{Ag})$, що пов'язано зі змінами у кристалічній структурі зразків;

– встановлено, що методика формування нанорозмірних структур на основі пермалоевого сплаву $Ni_{80}Fe_{20}$ та Ag (одночасне випарування чи пошарова конденсація) за ідентичних технологічних умов не впливає на структурно-фазовий стан і дозволяє регулювати їх електрофізичні властивості (величину питомого опору і ТКО), змінюючи або концентрацію компонент, або товщину і кількість шарів в системі;

– визначені оптимальні параметри ($c_{Ag} = 60$ ат.%, $d = 100$ нм, $T_B = 300$ К та $c_{Ag} = 60$ ат.%, $d = 60$ нм, $T_B = 300$ К) за яких реалізується ізотропний магнітоопір амплітудою до 2% при вимірюванні за кімнатної температури;

– показано, що збільшення індукції прикладеного зовнішнього магнітного поля з 500 мТл до 1,5 Т спричиняє зростання величини магніторезистивного ефекту в 1,3 рази, а зменшення температури вимірювання з 300 до 2 К супроводжується подальшим зростанням амплітуди МО в 1,6 рази.

Отримані експериментальні результати поглиблюють розуміння впливу методики формування нанорозмірних матеріалів на їх електрофізичні та магніторезистивні властивості. Враховуючі дані про вплив концентраційних, розмірних та температурних ефектів на електрофізичні та магніторезистивні властивості нанорозмірних матеріалів, це дозволить розширити набір базових компонент та елементів електроніки зі стабільним робочими параметрами. Крім того проведені дослідження дозволили визначити композиційний склад матеріалу, його ефективну товщину та умови термообробки необхідні для формування чутливих елементів сенсорів неелектричних величин, стабільних за різних умов експлуатації. Таким чином, результати досліджень можуть стати методологічною основою для використання даного типу матеріалів як одного з функціональних шарів елементної бази наноелектроніки чи спінтроніки, а також безпосередньо для створення чутливих елементів сенсорів магнітного поля зі стабільним в часі робочими характеристиками.

3. Відповідність дисертації зазначеній спеціальності

Дисертаційна робота Шуляренка Д.О. відповідає спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали, оскільки присвячена встановленню загальних закономірностей впливу концентраційних, розмірних та температурних ефектів на електро- і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів, сформованих на основі пермалоевого сплаву $Ni_{80}Fe_{20}$ та Ag . Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету в рамках бюджетної тематики: «Вплив фізичних процесів на властивості спін-вентильних структур на основі плівок Fe , Co та Ag , Au , Cu і магнітних наночастинок» (2015-2018 рр.) № 0116U002623; «Термостабільні металеві спін-клапани для реалізації спінових каналів в компонентах гнучкої сенсорної електроніки» (2017–2020 рр.) № 0117U003925;

«Магніторезистивні та магнітооптичні властивості композиційних матеріалів з впровадженими наночастинками» (2019-2021 рр.) № 0119U100777.

4. Кількість публікацій та повнота опублікування результатів дослідження

Основні матеріали дисертації Шуляренка Д.О. достатньо повно відображені у 22 публікаціях: 4 статті у фахових виданнях України, які індексуються наукометричною базою Scopus, 2 статті у закордонних виданнях і 3 статті у матеріалах конференцій, що також обліковуються БД Scopus, та 13 наукових працях у матеріалах Міжнародних та Всеукраїнських конференцій.

1. Size and heat treatment effects in magnetoresistive properties of Ag-added Ni₈₀Fe₂₀ 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 / Pazukha I.M., **Shuliarenko D.O.**, Pylypenko O.V., Ovrutskyi M.S., Odnodvoret L.V. // *Physics and Chemistry of Solid State*. – 2020. – V. 21, No 2. – P. 238-242.

4. Concentration and heat treatment effects on magnetoresistive properties of Ag-added Ni₈₀Fe₂₀ film systems / Pazukha I.M., **Shuliarenko D.O.**, Pylypenko O.V., Odnodvoret L.V. // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2019. – V. 485. – P. 89-94.

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

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

7. Magnetoresistive properties of granular nanostructures based on permalloy and silver / Odnodvoret K.S., **Shulyarenko D.O.**, Pazukha I.M. // *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 / Pazukha I.M., **Shuliarenko D.O.**, Protsenko S.I. // *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 / Pazukha I.M., **Shuliarenko D.O.**, Pylypenko O.V. // *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 / Овруцький А.С., **Шуляренко Д.О.**, Пазуха І.М. // *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 / Овруцький М.С., Шуляренко Д.О., Пазуха І.М. // 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.С. Концентраційна залежність магнітоопору нанорозмірних систем на основі пермалою та срібла / Овруцький М., Шуляренко Д., Пазуха І. // 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 / Żukowski P., Pazukha I., Shuliarenko D., Protsenko S // 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 / Shuliarenko D.O., Pazukha I.M. // 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 $Ni_{80}Fe_{20}$ and Ag / Shuliarenko D.O., Pazukha I.M. // 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 Ru/Ag на магніторезистивні властивості компонентів електронних систем / Шуляренко Д.О., Долгов-Гордійчук С.Р., Пазуха І.М. // Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕЕ :: 2019». – Суми: Сумський державний університет, 2019. – С. 81.

17. Шуляренко Д.О. Вплив інтерфейсного розсіювання на терморезистивні властивості багатошарових плівкових систем на основі пермалою та срібла / Шуляренко Д.О., Ромась О.В., Пазуха І.М. // Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕЕ :: 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 / Shuliarenko D.O., Romas' O.V., Pazukha I.M. // Materials XVII international conference on physics and technology of thin films and nanosystems. – Ivano-Frankovsk: Vasył Stefanyk PNU, 2019. – P. 264.

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

20. Розмірні та температурні ефекти в магніторезистивних властивостях

плівкових елементів електроніки на основі пермалою та срібла / Шуляренко Д.О., Пилипенко О.В., Овруцький М.С., Пазуха І.М. // Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФФЕ :: 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 / **Shuliarenko D.O.**, Pazukha I.M. // 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 / **Shuliarenko D.O.**, Ovrutskyi M.S., Pylypenko O.V., Pazukha I.M. // Матеріали міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2020». – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2020. – С. А17.

5. Висновок

Вважати, що подана дисертація Шуляренка Дениса Олеговича на тему «Температурні і концентраційні ефекти в електро- і магніторезистивних властивостях багатокомпонентних плівкових наноструктурах» за своїм науковим рівнем, актуальністю виконаних досліджень, практичним значенням, обсягом і оформленням повністю відповідає вимогам, передбачених п. 10 Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії від 09.06.2021 року щодо дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали.

Рецензенти

Завідувач кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету, доктор фізико-математичних наук, професор



І.Ю. Проценко

Професор кафедри електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету, доктор фізико-математичних наук, професор



С.І. Денисов

