

## ВИСНОВОК

рецензентів про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертаційної роботи Бездідька Олександра Валерійовича «Фізичні процеси в функціональних елементах гнучкої електроніки на основі металевих наноструктурованих матеріалів», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – прикладна фізика та наноматеріали

### 1. Актуальність теми дослідження

На сьогоднішній день актуальними є дослідженнями наноматеріалів, які можуть бути використані у гнучкій електроніці та спінтроніці, бурхливий розвиток яких вже привів до революційних змін у галузі твердотільної електроніки. Перспективними функціональними матеріалами для елементів і компонентів гнучкої електроніки та сенсорної техніки є структури на основі магнітних наночастинок та традиційні багатошарові спін-вентильні структури з покращеними характеристиками. Для практичного використання згаданих структур необхідно мати оптимальне поєднання функціональних параметрів: величини магнітоопору, магніторезистивної чутливості, магнітного гістерезису, необхідної величини поля перемагнічування і високої стабільності. У випадку, коли плівкова система формується на основі магнітних наночастинок, можливим є реалізація ефекту гігантського магнітоопору який буде мати свої особливості.

Для отримання наноструктур із заданими характеристиками, крім ретельно відпрацьованої технології підготовки підкладок і оптимальних режимів нанесення шарів, необхідне розуміння особливостей впливу мікроструктури шарів, дифузійних процесів між шарами і магнітної анізотропії на їх магніторезистивні властивості. Цікавим є дослідження і з точки зору фундаментальної фізики, бо дає можливість розширити уявлення про структуру, фазовий склад та фізичні процеси, які протікають у плівкових системах в умовах впливу температурних і магнітних полів.

На сьогоднішній день накопилася значна кількість експериментальних та теоретичних результатів дослідження магнітних та магніторезистивних властивостей магніто-неоднорідних нанорозмірних структур. Не дивлячись на цей ряд питань на момент постановки задач дисертаційного дослідження були до кінця не з'ясованими. Також, поза увагою дослідників, залишилося питання, пов'язане із деградацією тонких плівок, яка відбувається у результаті релаксації внутрішніх мікронапружень у плівці та хімічній взаємодії із атомами домішок.

Отже, комплексне ж дослідження електрофізичних та магніторезистивних і магнітних властивостей несиметричних плівкових систем на основі феромагнітних металів, сплавів та впроваджених як окремі шари наночастинок феритів є актуальною проблемою сучасного наноматеріалознавства для розв'язання як фундаментальних проблем так і розвитку гнучкої електроніки, спінтроніки та інших галузей сучасної науки і техніки.

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

У результаті проведеного дослідження дисертантом отримані такі нові результати:

1. Уперше було використано магнітооптичний ефект Керра для виявлення зв'язку між структурно - фазовим складом систем Cr/Fe/П та Pt/Fe/П і їх магнітними характеристиками.

2. Уперше показано, що у разі коли ймовірність проходження електрона з одного шару в інший без розсіяння при антипаралельному впорядкуванню магнітних шарів менша ніж при паралельній орієнтації ( $Q_{ap} < Q_p$ ) реалізується прямий (від'ємний) ефект ГМО, а у разі виконання протилежної нерівності ( $Q_{ap} > Q_p$ ) реалізується інверсний (позитивний) ефект гігантського магнітоопору.

3. Установлено, що для свіжосконденсованих та відпалених за температур 400 та 550 К плівок (Co-Cr)/Cu/Co/П з  $c_{Co} \geq 70\%$ ,  $d_F = 20 - 30$  нм,  $d_N = 3 - 15$  нм спостерігається нетиповий характер поведінки польових залежностей магнітоопору, який обумовлений різними значеннями коефіцієнтів спінової асиметрії феромагнітних шарів  $\alpha$  ( $\alpha < 1$  для сплаву (Co-Cr) та  $\alpha > 1$  для Co).

4. Показано, що для плівкових сплавів т.р. FeNi(Cu) товщинами  $d = 20 - 80$  нм і концентрацією міді до 50 ат.% у температурному інтервалі 120 – 400 К фіксується анізотропний характер магнітоопору з амплітудою поздовжнього та поперечного ефекту 0,02 - 0,5% залежно від товщини та концентрації компонент.

5. Установлено вплив температури відпалювання на структурно-фазовий склад і властивості наночастинок феритів  $Fe_3O_4$ ,  $NiFe_2O_4$  та  $CoFe_2O_4$ , які знаходяться у суперпарамагнітному стані та встановлено, що температура 800 К являється оптимальною для збереження фазового складу, при необхідному збільшенні частинок у розмірі та їх переході у одно- та мультидоменний стан.

Результати проведених у роботі систематичних досліджень магнітних і магніторезистивних властивостей несиметричних плівкових систем на основі феромагнітних металів, сплавів та впроваджених як окремі шари наночастинок феритів розширюють уявлення про фізичні процеси у магніто-неоднорідних функціональних плівкових матеріалах в умовах впливу на них температурних і магнітних полів. Реалізований підхід дозволяє встановити умови формування та подальшого термічного оброблення плівок із високою температурною чутливістю, а також високою магнітною чутливістю і температурною стабільністю з точки зору їх застосування як приладових структур гнучкої та сенсорної електроніки, спін-вентилів тощо.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі на базі Сумського державного університету при виконанні лабораторних робіт з дисципліни «Прилади та методи дослідження плівкових матеріалів».

## **3. Відповідність дисертації зазначеній спеціальності**

Дисертаційна робота Бездідька О.В. відповідає спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали, оскільки присвячена експериментальному і теоретичному вивченню особливостей електротранспорту при зміні температури і

зовнішнього магнітного поля в несиметричних плівкових системах на основі феромагнітних металів, сплавів та впроваджених як окремі шари наночастинок феритів. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету в рамках бюджетної тематики: «Термостабільні металеві спін-клапани для реалізації спінових клапанів в компонентах гнучкої сенсорної електроніки» (2017 – 2020 рр.) №0117V00392 та «Взаємозв'язок між магніторезистивними і магнітними властивостями та електронною структурою багатокомпонентних плівкових сплавів» (2020 – 2022 рр.) № 0120U102005. Окрім того, роботу було підтримано Грантом Польської академії наук для участі у роботі LIX Школи з фізики (м. Закопане, 2019 р.).

#### **4. Кількість публікацій та повнота опублікування результатів дослідження**

Основні матеріали дисертації Бездідька О.В. достатньо повно відображені у 15 публікаціях: 5 статтях у періодичних фахових наукових журналах, які індексуються БД Scopus, та 3 статтях і 7 тезах у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій, що відповідає вимогам Наказу МОН «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук» від 23.09.2019 р. № 1220. Результати представлені в таких основних публікаціях:

1. Formation of Ordered Magnetic Nanoparticles Arrays Using Various Obtaining Techniques / **Bezdidko O. V.**, Cheshko I. V., Kostiuk D. M., Protsenko S. I. // J. Nano- Electron. Phys. 11 № 3, P. 03037-1-03037-5 (2019). – **Q3**

2. Electrical Conductivity and Magnetoresistive Properties of Film Alloys Based on Permalloy  $Fe_{0.5}Ni_{0.5}$  and Copper / **Bezdidko O.V.**, Shkurdoda Yu.O., Shpetnyi I.O., // J. Nano- Electron. Phys. 12 № 3, P. 03034-1-03034-4 (2020). – **Q3**

3. Magneto-Optical Properties of Two – Layer Film Systems Based on Fe And Cr / **Bezdidko O. V.**, Shkurdoda Yu.O, Fedchenko O., Cheshko I. V., Protsenko S. I. // Int. J. of Mod. Ph. B 34 №27, P. 2050521-1-2050521-8 (2020). – **Q4**

4. Structure and magnetoresistive properties of three-layer films (Co-Cr)/Cu/Co **Bezdidko O.V.**, Nepijko S.O., Shkurdoda Yu. O., Shabelnyk Yu. M. // J. Nano- Electron. Phys. 13 № 3, P.03042-1-03042-4 (2021). – **Q3**

5. Magneto-optical properties of two – layer film systems based on Fe and Pt **Bezdidko O.V.**, Shkurdoda Yu. O., Vashchenko S. M. // Physics and Chemistry of Solid State 22 №2, P. 242-247 (2021). – **Q4**

6. **Bezdidko O. V.**, Kostiuk D. M., Cheshko I. V., Protsenko S. I. Formation of Co / Cu /  $NiFe_2O_4$  (Nanoparticles) Spin-Valve Type Functional Elements, International Conference Nanomaterials: Applications and Properties 2018, September 9-14, 2018, Odesa, Ukraine.

7. **Bezdidko O. V.**, Shumakova M.O., Cheshko I. V., Protsenko S. I. Investigation of the Structure and Thermal Stability of  $NiFe_2O_4$  Nanoparticles Monolayers, Electronics and Informational Technologies, August 30 – September 2, 2018, Ukraine.

8. Shkurdoda Yu.O, **Bezdidko O. V.**, Shabelnyk Yu. M., Chornous A.M., Dekhtyaruk L.V., Kharchenko A. P. Giant Magnetoresistive Effect in a Magnetically



Ordered Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub>/Cu/Co Sandwich, International Conference Nanomaterials: Applications and Properties 2020, November 9-13, 2020, Sumy, Ukraine.

## 5. Висновок

Вважати, що подана дисертація Бездідька Олександра Валерійовича на тему «Фізичні процеси в функціональних елементах гнучкої електроніки на основі металевих наноструктурованих матеріалів» за своїм науковим рівнем, актуальністю виконаних досліджень, практичним значенням, обсягом і оформленням повністю відповідає вимогам, передбачених п.10 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії» від 06.03.2019 року щодо дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали.

## Рецензенти

Завідувач кафедри електроніки і комп'ютерної техніки Сумського державного університету, доктор фізико-математичних наук, професор

А.С. Опанасюк

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

С.І. Денисов

