

# Облікова картка дисертації

## I. Загальні відомості

**Державний обліковий номер:** 0823U101494

**Особливі позначки:** відкрита

**Дата реєстрації:** 28-11-2023

**Статус:** Наказ про видачу диплома

**Реквізити наказу МОН / наказу закладу:** Наказ № 25-НОД від 21.12.2023



## II. Відомості про здобувача

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Боринський Владислав Юрійович

2. Vladyslav Y. Borynskiy

**Кваліфікація:** 01.04.11

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0003-3722-7308

**Вид дисертації:** доктор філософії

**Аспірантура/Докторантура:** так

**Шифр наукової спеціальності:** 105

**Назва наукової спеціальності:** Прикладна фізика та наноматеріали

**Галузь / галузі знань:**

**Освітньо-наукова програма зі спеціальності:** Прикладна фізика та наноматеріали

**Дата захисту:** 06-12-2023

**Спеціальність за освітою:** Прикладна фізика та наноматеріали

**Місце роботи здобувача:** Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України

**Код за ЄДРПОУ:** 23494128

**Місцезнаходження:** бульв. Академіка Вернадського, буд. 36-б, Київ, 03142, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Національна академія наук України

**Ідентифікатор ROR:**

### **III. Відомості про організацію, де відбувся захист**

**Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради):** ДФ 26.248.03

**Повне найменування юридичної особи:** Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України

**Код за ЄДРПОУ:** 23494128

**Місцезнаходження:** бульв. Академіка Вернадського, буд. 36-б, Київ, 03142, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Національна академія наук України

**Ідентифікатор ROR:**

### **IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію**

**Повне найменування юридичної особи:** Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України

**Код за ЄДРПОУ:** 23494128

**Місцезнаходження:** бульв. Академіка Вернадського, буд. 36-б, Київ, 03142, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Національна академія наук України

**Ідентифікатор ROR:**

### **V. Відомості про дисертацію**

**Мова дисертації:** Українська

**Коди тематичних рубрик:** 29.19.43

**Тема дисертації:**

1. Магнітні та резонансні властивості багатошарових наноструктур з антиферромагнітними компонентами
2. Magnetic and resonant properties of multilayered nanostructures with antiferromagnetic components. – Qualifying scientific work on the manuscript rights.

**Реферат:**

1. Дисертаційна робота присвячується дослідженню магнітостатичних та резонансних властивостей багатошарових структур з синтетичними та природними антиферромагнітними компонентами за умов, коли їх лінійні розміри набувають порядків наномасштабу. Проводиться систематичний аналіз закономірностей зміни ключових магнітних властивостей плівкових гетероструктур  $\text{Fe}/[\text{Cr}/\text{FeCr}/\text{Cr}]_n/\text{Fe}$ ,  $\text{Py}/\text{FeMn}/[\text{Cu}/\text{Py}]$  та тришарових наноелементів  $\text{Py}/\text{NiCu}/\text{Py}$  в залежності від температури, будови та їх геометричних параметрів. Виявлені нові фізичні ефекти можуть бути використані для налаштування функціональних характеристик електронних пристроїв з такими компонентами. У Вступі (першому розділі) проводиться обґрунтування актуальності вибраної теми дисертаційного дослідження та надається загальна характеристика роботи. Другий розділ роботи ознайомлює читача з проблематикою обраної теми

дисертаційного дослідження, існуючими науковими здобутками в сфері синтетичних антиферромагнетиків (САФ) та подальших перспективах їх застосування у якості компонент магнонних метаматеріалів, нейроморфних контактів та інших сучасних розробок нанoeлектроніки. У третьому розділі представляються фізичні засади основних методів, що використовувались для виготовлення зразків, вимірювання їх магнітних параметрів та аналізу результатів: метод магнетронного напорошення багат шарових структур, спектроскопія феромагнітного резонансу (ФМР) та підхід мікромагнітних моделювань. Також надаються технічні специфікації усіх досліджених у даній роботі зразків. У четвертому розділі досліджуються зміни магнітостатичних властивостей та характеру температурно-регульованого перемикання стану «феромагнетик-антиферомагнетик» САФ матеріалів у контексті переходу від двовимірних тонкоплівкових структур до латерально обмежених наноелементів. Перша частина розділу зосереджується на плівкових багат шарових структурах САФ  $\text{Fe}/[\text{Cr}/\text{FeCr}/\text{Cr}]_n/\text{Fe}$ . Досліджується конкуренція між прямою та непрямую обмінною взаємодією, а також між непрямую взаємодією антиферомагнітного (АФМ) та феромагнітного (ФМ) типів, яка виникає у таких САФ завдяки магнітному фазовому переходу «феромагнетик-парамагнетик» сплаву  $\text{FeCr}$ . Показано, що використання композитного спейсера  $[\text{Cr}/\text{FeCr}/\text{Cr}]_2$  змушує температурний інтервал перемикання стану САФ від  $\geq 100$  К, типових для структур з однорідним спейсером  $\text{FeCr}$ , до 15 К. У другій частині розділу розглядаються масиви круглих планарних нанодисків САФ  $\text{Py}/\text{NiCu}/\text{Py}$ , для яких демонструється подібний механізм температурно-керованого перемагнічування, однак без непрямой обмінної взаємодії. Показано, що куполовидна форма наноелементів призводить до появи суттєвого залишкового моменту та подвійної петлі перемагнічування, коли САФ перебуває у дипольно зв'язаному АФМ стані. Дослідження, представлені у п'ятому розділі роботи, зосереджуються на вивченні особливостей магнітного стану двошарової плівкової системи  $\text{Py}/\text{FeMn}$ . У першій частині розділу досліджуються температурно- та товщинно-залежні процеси дисипації струму спінової накачки у структурах  $\text{Py}/\text{FeMn}(3-7 \text{ nm})/\text{Cu}/\text{Py}$ . Окрім традиційного внеску поглинання спінового струму в об'ємі АФМ шару, виявлено додатковий неоднорідний внесок, який пояснюється формуванням обмінної пружини в області інтерфейсу  $\text{Py}/\text{FeMn}$ , спричиненим конкуренцією між ефектом ФМ близькості та АФМ обміном у  $\text{FeMn}$ . Також представляється окреме дослідження ФМР двошарових плівкових структур  $\text{Py}/\text{FeMn}(3-7 \text{ nm})$ . Продемонстровано можливість майже десятикратного ізотропного збільшення частоти ФМР за кімнатної температури, яке зумовлюється обертовою анізотропією у тонкому АФМ шарі  $\text{FeMn}(3 \text{ nm})$ . Проведені за допомогою модифікованого рівняння Кіттеля розрахунки дозволяють порівняти альтернативні механізми прискорення динаміки сусіднього ФМ шару. Шостий розділ дисертації присвячується систематичному вивченню специфіки спін-хвильової динаміки просторово обмежених наноелементів САФ, латеральні розміри яких наближаються до порядку обмінної довжини. В рамках мікромагнітної моделі відтворено експериментальні умови, за яких у поодинокому перпендикулярно намагніченому нано-САФ збуджуються коливання однорідної моди та двох вибраних мод вищих порядків. У другій частині досліджується ФМР масивів планарно намагнічених нанодисків САФ  $\text{Py}/\text{NiCu}/\text{Py}$  з номінальним діаметром 150 нм. Показано, що асиметрія внутрішньої дипольної взаємодії куполовидних наноелементів призводить до розщеплення граничної моди на коливання акустичного та оптичного типів – ефекту, яким можливо керувати за рахунок фазового переходу спейсера  $\text{NiCu}$ . Третя частина розділу розглядає аналогічні масиви нано-САФ, однак еліпсоподібної форми та вдвічі меншого розміру. У таких наноелементах виявлено збудження єдиної виродженої моди. Мікромагнітні розрахунки відтворюють анізотропну поведінку цієї моди та вказують на те, що її просторова структура є результатом суперпозиції коливань центральної та граничної стоячих спінових хвиль.

2. The dissertation is devoted to the study of magnetostatic and resonant properties of multilayered structures with synthetic and natural antiferromagnetic components when their linear sizes reach nanoscale. A systematic analysis of temperature- and geometry-dependent changes in key magnetic parameters is carried out for the continuous-film heterostructures  $\text{Fe}/[\text{Cr}/\text{FeCr}/\text{Cr}]_n/\text{Fe}$ ,  $\text{Py}/\text{FeMn}/[\text{Cu}/\text{Py}]$ , as well as the three-layer nanelements  $\text{Py}/\text{NiCu}/\text{Py}$ . New reported physical effects can be utilized to adjust functional characteristics of electronic devices involving such components. In the Introduction (the First chapter), the relevance of the chosen

topic of the doctoral research is substantiated and a general description of this work is provided. The Second chapter of the work acquaints the reader with general problems of the chosen research topic, the existing scientific achievements in the field of synthetic antiferromagnets (SAF) and further prospects for their use as integral components in magnonic metamaterials, neuromorphic junctions and other modern nanoelectronic devices. The Third chapter introduces the physical principles of the main methods used for the samples fabrication, magnetic parameters measurements and analysis of the results, namely magnetron sputtering of multilayered structures, ferromagnetic resonance spectroscopy (FMR) and micromagnetic modelling. Technical specifications of all the samples studied in this work are also provided. The Fourth chapter presents the studies of the changes in magnetostatic properties and the nature of the temperature-controlled SAF state switching in the context of the transition from two-dimensional thin-film structures to laterally confined nanoelements. The first part of the chapter focuses on the continuous multilayered SAF films  $\text{Fe}/[\text{Cr}/\text{FeCr}/\text{Cr}]_n/\text{Fe}$ . The competition between direct and indirect exchange interaction, as well as between the indirect interaction of antiferromagnetic (AFM) and ferromagnetic (FM) types, which arise due to the ferromagnet-to-paramagnet phase transition of the FeCr alloy, are investigated. It is shown that the use of the composite spacer  $[\text{Cr}/\text{FeCr}/\text{Cr}]_2$  narrows the temperature range of the SAF state switching from  $\geq 100$  K, inherent to structures with a homogeneous FeCr spacer, to 15 K. The second part of the chapter considers the arrays of round planar SAF nanodisks  $\text{Py}/\text{NiCu}/\text{Py}$ , for which a similar mechanism of temperature-controlled magnetization reversal is demonstrated without the indirect exchange interaction. It is shown that the dome-like shape of the nanoelements leads to a significant remnant magnetic moment and a double hysteresis loop, when the SAF is in the dipole-coupled AFM state. The study presented in the Fifth chapter of the work focuses on investigating the peculiar magnetic state of the bilayer film system  $\text{Py}/\text{FeMn}$ . In the first part of the chapter the temperature- and thickness-dependent dissipation processes of spin-pumping current in  $\text{Py}/\text{FeMn}(3-7 \text{ nm})/\text{Cu}/\text{Py}$  structures are examined. Apart from the traditional contribution of spin current absorption in the volume of the AFM layer, an additional inhomogeneous contribution is revealed, which is explained as due to the formation of an exchange spring in the  $\text{Py}/\text{FeMn}$  interface region, caused by the competition between FM proximity effect and AFM exchange in FeMn. The separate FMR study for the bilayer film structures  $\text{Py}/\text{FeMn}(3-7 \text{ nm})$  is also presented. The possibility of an almost tenfold isotropic increase in the FMR frequency at room temperature has been demonstrated and prescribed to the strong rotatable anisotropy acting in thin AFM layer  $\text{FeMn}(3 \text{ nm})$ . The calculations, performed using the modified Kittel equation, allow one to compare alternative mechanisms for the acceleration of the adjacent FM layer magnetic dynamics. The Sixth chapter of the dissertation is devoted to the systematic study of the features of spin-wave dynamics in spatially confined nanoscale SAF elements, the lateral sizes of which approach the order of exchange length. Within the framework of the micromagnetic model we reproduce the experimental conditions under which the oscillations of a homogeneous mode and two selected higher order modes are established in a single perpendicularly magnetized nano-SAF. The second part of the chapter investigates resonant behavior of the in-plane magnetized arrays of  $\text{Py}/\text{NiCu}/\text{Py}$  SAF nanodisks with the nominal diameter of 150 nm. It is shown that the asymmetry of the intra-element dipolar interaction in the dome-shaped nanoelements causes the splitting of the edge spin-wave mode into oscillations of acoustic and optical types – an effect that can be controlled via the phase transition of the NiCu spacer. The third part of the chapter addresses the analogous arrays of SAF nanoelements with, however, twice the smaller size. The spatial structure of a single degenerate mode, inherent to such nanoelements, is discussed.

**Державний реєстраційний номер ДіР:**

**Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки:** Нові речовини і матеріали

**Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності:** Освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій

**Підсумки дослідження:** Нове вирішення актуального наукового завдання

## Публікації:

- 1) Магнітна та термоіндукована динаміка у наноелементах синтетичних антиферромагнетиків / Р.В. Верба, Ю.І. Джежеря, В.Ю. Боринський, Д.М. Поліщук, А.Ф. Кравець. – Харків: «Діса плюс», 2023. – 164 с. ISBN 978-617-8122-54-6
- 2) Borynskiy V.Yu., Polishchuk D.M., Savina Yu.O., Pashchenko V.O., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Thermomagnetic transition in nanoscale synthetic antiferromagnets Py/NiCu/Py // Low Temperature Physics. – 2023. – V. 49. – P. 863-869. DOI 10.1063/10.0019699
- 3) Borynskiy V.Yu., Polishchuk D.M., Sharai I.V., Melnyk A.K., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Spin-wave Resonance in Arrays of Nanoscale Synthetic-antiferromagnets // Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties. – 2022. – P. NMM0701. DOI 10.1109/NAP55339.2022.9934337
- 4) Borynskiy V.Yu., Polishchuk D.M., Melnyk A.K., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Higher-order ferromagnetic resonances in periodic arrays of synthetic-antiferromagnet nanodisks // Applied Physics Letters. – 2021. – V. 119. – P. 192402. DOI 10.1063/5.0068111
- 5) Polishchuk D.M., Polek T.I., Borynskiy V.Yu., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Isotropic FMR frequency enhancement in thin Py/FeMn bilayers under strong magnetic proximity effect // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021. – V. 54. – P. 305003. DOI 10.1088/1361-6463/abfe39
- 6) Polishchuk D.M., Polek T.I., Borynskiy V.Yu., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Pogorily A.M., Korenivski V. / Spin-current dissipation in a thin-film bilayer ferromagnet/antiferromagnet // Low Temperature Physics. – 2020. – V. 46. – P. 813-819. DOI 10.1063/10.0001547
- 7) Polishchuk D.M., Tykhonenko-Polishchuk Yu.O., Borynskiy V.Yu., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Magnetic Hysteresis in Nanostructures with Thermally Controlled RKKY Coupling // Nanoscale Research Letters. – 2018. – V. 13. – P. 1-7. DOI 10.1186/s11671-018-2669-0

**Наукова (науково-технічна) продукція:** методи, теорії, гіпотези

**Соціально-економічна спрямованість:** створення принципово нової продукції (матеріалів, технологій тощо) для забезпечення експортного потенціалу та заміщенню імпорту

**Охоронні документи на ОПВ:**

Наукові відкриття

Розробка різноманітних концепцій запам'ятовуючих пристроїв, транзисторів, сенсорів на базі магнітних багат шарових структур.

**Впровадження результатів дисертації:** Планується до впровадження

**Зв'язок з науковими темами:**

## VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Товстолиткін Олександр Іванович

2. Oleksandr I. Tovstolytkin

**Кваліфікація:** д.ф.-м.н., професор, 01.04.11

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-4852-6605

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України

**Код за ЄДРПОУ:** 23494128

**Місцезнаходження:** бульв. Академіка Вернадського, буд. 36-б, Київ, 03142, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Національна академія наук України

**Ідентифікатор ROR:**

## **VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів**

### **Офіційні опоненти**

#### **Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Прокопенко Олександр Володимирович

2. Oleksandr V. Prokopenko

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., професор, 01.04.03

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

#### **Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Київський національний університет імені Тараса Шевченка

**Код за ЄДРПОУ:** 02070944

**Місцезнаходження:** вул. Володимирська, буд. 60, Київ, 01033, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

#### **Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Владимирський Ігор Анатолійович

2. Vladymyrskyi Ihor A.

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., с.д., 01.04.07

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

#### **Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Код за ЄДРПОУ:** 02070921

**Місцезнаходження:** проспект Берестейський, буд. 37, Київ, 03056, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **Рецензенти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Герасимчук Ігор Вікторович
2. Ihor V. Herasymchuk

**Кваліфікація:** д. ф.-м. н., старший науковий співробітник, 01.04.02

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-2208-7050

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України

**Код за ЄДРПОУ:** 23494128

**Місцезнаходження:** бульв. Академіка Вернадського, буд. 36-б, Київ, 03142, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Національна академія наук України

**Ідентифікатор ROR:**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Дереча Дмитро Олександрович
2. Dmytro Derecha

**Кваліфікація:** к. ф.-м. н., с.д., 01.04.11

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-2442-3759

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України

**Код за ЄДРПОУ:** 23494128

**Місцезнаходження:** бульв. Академіка Вернадського, буд. 36-б, Київ, 03142, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Національна академія наук України

**Ідентифікатор ROR:**

### **VIII. Заключні відомості**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
голови ради**

Лось Віктор Федорович

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
головуючого на засіданні**

Лось Віктор Федорович

**Відповідальний за підготовку  
облікових документів**

Шарай Ірина Вікторівна

**Реєстратор**

УкрІНТЕІ

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є  
відповідальним за реєстрацію наукової  
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна