

АНОТАЦІЯ

Боринський В.Ю. Магнітні та резонансні властивості багатошарових наноструктур з антиферомагнітними компонентами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». – Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячується дослідженню магнітостатичних та резонансних властивостей багатошарових структур з синтетичними та природними антиферомагнітними компонентами за умов, коли їх характерні лінійні розміри переходять до наномасштабу – критичної вимоги, що висувається до сучасних перспективних напрямків спінової електроніки. З використанням сучасних експериментальних методик (магнітометрія, спектроскопія феромагнітного резонансу і т.п.), а також підходу мікромагнітних моделювань, 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 нанорозмірних тришарових елементів $\text{Py}/\text{NiCu}/\text{Py}$ в залежності від температури, їх інтегральних компонент та геометричних параметрів. Виявлені нові фізичні ефекти можуть бути використані для налаштування та оптимізації функціональних характеристик кінцевих електронних пристроїв, дизайн яких передбачає залучення таких антиферомагнітних компонент.

У *Вступі (Розділ 1)* проводиться обґрунтування актуальності вибраної теми дисертаційного дослідження та надається загальна характеристика роботи. Формулюються головна мета та завдання, визначаються об'єкт та предмет дослідження. Представляються основні наукові положення, що засвідчують новизну отриманих результатів. Зазначається особистий внесок здобувача у роботу, винесені на захист дисертації. Надається інформація щодо апробації

результатів досліджень на наукових конференціях та зв'язку роботи з науково-дослідними темами.

Другий розділ роботи покликаний ознайомити читача з загальною проблематикою обраної теми дисертаційного дослідження, існуючими науковими здобутками в сфері синтетичних антиферромагнетиків (САФ) та подальших перспективах їх застосування у якості компонент магнетонних метаматеріалів, нейроморфних контактів та інших сучасних розробок нанoeлектроніки. Спочатку пропонується короткий історичний огляд досліджень, що привели до відкриття непрямої обмінної взаємодії Рудермана-Кіттеля-Касуї-Іосіди у багатошарових структурах та надгратках – основоположного явища, яке зробило можливим створення САФ. Наводиться порівняння таких матеріалів з природними антиферромагнітними (АФМ) кристалами, акцентуючи увагу на визначних характеристиках обох систем та їх індивідуальній важливій ролі у спінтроніці. Представляється загальноприйнятий формалізм для аналітичного опису непрямої міжшарової взаємодії у багатошарових структурах. Далі обговорюються низка прикладних застосувань структур з антиферромагнітними компонентами, від широко відомих комірок магнітної пам'яті, в яких поєднуються переваги як САФ, так і природніх АФМ, до передових самозміщених наномагнітів, розробка яких важлива для створення механізмів регулювання дисперсії спінових хвиль.

У третьому розділі представляються фізичні засади основних методів, що використовувались для виготовлення зразків, вимірювання їх магнітних параметрів та аналізу результатів: метод магнетронного напорошення багатошарових структур, спектроскопія феромагнітного резонансу (ФМР) та підхід мікромагнітних моделювань часової еволюції просторового розподілу магнітних моментів. 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.

Проводиться якісна та кількісна оцінка ключових магнітних параметрів: намагніченості, коерцитивної сили, ефективного поля міжшарової взаємодії, як в залежності від будови та геометрії наноструктур, так і від температури. У першій частині розділу обговорення зосереджується на плівкових багатшарових структурах САФ Fe/[Cr/FeCr/Cr]_n/Fe, для яких класична ідея втілення температурного керування ґрунтується на залученні легovanого слабко-ферромагнітного сплаву FeCr з термомагнітним фазовим переходом «ферромагнетик-парамагнетик». Завдяки цьому у системі виникає чутливий до температури механізм перемикавання типу обмінної взаємодії між ферромагнітними (ФМ) шарами Fe. Шляхом відтворення експериментальних кривих перемагнічування за феноменологічною моделлю досліджується конкуренція між прямою та непрямою обмінною взаємодією, а також між непрямою взаємодією АФМ та ФМ типів, які реалізуються у САФ з різною будовою спейсера. Показано, що використання композитного спейсера [Cr/FeCr/Cr]₂ звужує температурний інтервал перемикавання стану САФ від ≥ 100 К, типового для класичних структур з однорідним спейсером FeCr, до 15 К. Покращення ефективності перемикавання також проявляється на анізотропних властивостях САФ – температурна залежність коерцитивної сили набуває більш монотонного характеру. У другій частині розділу розглядаються масиви круглих планарних нанодисків САФ Ru/NiCu/Ru, у яких демонструється реалізація подібного механізму температурно-керованого перемагнічування САФ, однак без залучення непрямої обмінної взаємодії. Таким латерально обмеженим нанoeлементом притаманна магнітостатична дипольна взаємодія, яка діє між шарами Ru та сприяє антипаралельному розташуванню їх магнітних моментів, тобто АФМ стану САФ. Перемикавання ж стану відбувається внаслідок появи прямого обміну через спейсер NiCu, коли він набуває ферромагнітного впорядкування за низьких температур. За допомогою магнітометричних вимірювань виявлено характерні для нанoeлементів САФ особливості температурних змін намагніченості та гістерезису масивів. Аналіз та інтерпретація експериментально спостережуваних ефектів здійснювалися в рамках запропонованого виразу енергетичного балансу. Продемонстровано, що

куполовидна форма наноелементів призводить до появи суттєвого залишкового моменту та додаткової петлі перемагнічування поблизу нуля зовнішнього магнітного поля, коли САФ перебуває у АФМ стані. У області температур нижче точки фазового переходу спейсера, що відповідає ФМ стану елементів, виявлено різке зростання коерцитивної сили, зумовлене посиленням магнітного порядку та магнітокристалічної анізотропії легованого спейсера NiCu.

Дослідження, представлені у *n'ятому розділі* роботи, зосереджуються на вивченні особливостей магнітного стану двошарової плівкової системи Ru/FeMn коли товщина АФМ шару FeMn стає меншою від типових значень обмінної довжини сплаву Ru ~ 5 нм. При цьому ефективна температура Нееля, тобто точка фазового переходу шару FeMn «антиферомагнетик-парамагнетик», є значно нижчою від такої для об'ємного кристалу, і АФМ шар перебуває на межі свого магнітного впорядкування у великому діапазоні температур. За таких умов природньо очікувати появу нетривіальних ефектів, що й демонструється у даному розділі. Для характеристики магнітного стану бішарів у першій частині розділу досліджуються температурно- та товщинно-залежні процеси дисипації струму спінової накачки у структурах Ru/FeMn(3–7 нм)/Cu/Ru, подібних за своєю будовою до спінових клапанів. Окрім традиційного внеску поглинання антиферомагнетиком поперечної компоненти спінового струму, виявлено додатковий неоднорідний внесок, який найяскравіше проявляється для випадку тонкого FeMn та за низьких температур. Феноменологічні розрахунки, виконані в рамках стандартного формалізму ФМР, дозволили пов'язати додатковий канал дисипації з формуванням обмінної пружини в області інтерфейсу Ru/FeMn, яка виникає за рахунок конкуренції ефекту близькості феромагнетика та антиферомагнітного обміну у FeMn. Встановлено, що анізотропна поведінка цього внеску визначається відхиленням вектора Нееля у АФМ шарі, що додатково збільшує ступінь неоднорідності розподілу спінів на інтерфейсі. У другій частині розділу представляється окреме дослідження резонансної динаміки намагніченості двошарових плівкових структур Ru/FeMn(3–7 нм). Продемонстровано можливість майже десятикратного ізотропного збільшення частоти ФМР за кімнатної температури шляхом залучення тонкого АФМ шару

FeMn(3 нм) у прямому контакті з ФМ шаром. На відміну від зразків з більшою товщиною FeMn, для яких чітко спостерігається явище обмінного закріплення та пов'язаної з ним однонаправленої анізотропії, у випадку тонкого АФМ шару за прискорення динаміки відповідає оборотна анізотропія, що домінує на всьому температурному інтервалі вимірювань. Проводиться оцінка ефективного поля оборотної анізотропії, яка при кімнатній температурі дає значення у 60 мТл. Розрахунок температурних залежностей частоти ФМР, виконаний для граничних випадків тонкого і товстого FeMn за допомогою модифікованого рівняння Кіттеля, дозволяє порівняти альтернативні механізми прискорення резонансної динаміки сусіднього ФМ шару Ru.

Шостий розділ дисертації присвячується систематичному вивченню специфіки спін-хвильової динаміки просторово обмежених нанорозмірних елементів САФ, у яких не лише товщина шарів, але й латеральні розміри наближаються до порядку обмінної довжини. Розглядаються як поодинокі тришарові нанoelementи САФ круглої та еліпсоподібної форми, так і їх впорядковані періодичні масиви з різними геометричними параметрами. У першій частині на прикладі поодинокого перпендикулярно намагніченого САФ демонструються потужності підходу мікромагнітних моделювань як зручного інструменту для спектрального аналізу багатомодового спін-хвильового резонансу таких систем. У рамках мікромагнітної моделі відтворено умови, за яких одночасно встановлюються коливання однорідної моди та двох вибраних мод вищих порядків, польові дисперсії яких добре узгоджуються з експериментальними даними для реального спінтронного осцилятора, збудженого ефектом передачі моменту сили спін-поляризованим струмом. Також показано як порушення симетрії статичного розподілу намагніченості у еліптичному нанoelementі САФ призводить до суттєвої якісної трансформації просторової структури стоячих спінових хвиль. У другій частині досліджується резонансна поведінка масивів планарно намагнічених нанодисків САФ Ru/NiCu/Ru з номінальним діаметром 150 нм. Експериментальні спектри ФМР виявляють розщеплення граничної спін-хвильової моди на коливання акустичного та оптичного типів за кімнатної температури, що також успішно

відтворюється на мікромагнітних моделюваннях. З'ясовано причину появи додаткової високочастотної граничної моди, яка полягає у асиметрії внутрішньої дипольної взаємодії куполовидних нанoeлементів, де два ФМ шари САФ мають суттєво відмінні діаметри (~15%). Продemonстровано можливість безпосереднього температурного контролю над спін-хвильовою динамікою нанoeлементів САФ – за температур нижче точки фазового переходу спейсера NiCu $T < 220$ К вони перетворюються у квазі-одношарові ФМ диски, при цьому дві граничні моди зливаються в один широкий пік. Третя частина розділу розглядає масиви нанoeлементів САФ аналогічної будови, однак еліпсоподібної форми та вдвічі меншого розміру, довжина великої осі яких становить 75 нм. На відміну від попереднього випадку, у таких нанoeлементах спостерігається збудження єдиної виродженої моди з суттєво гібридизованим розподілом коливань. Мікромагнітні розрахунки відтворюють анізотропну поведінку цієї моди та вказують на те, що її профілі є результатом суперпозиції коливань центральної та граничної стоячих спінових хвиль. Обговорюються фізичні механізми, відповідальні за таку гібридизацію просторової структури виродженої моди.

Ключові слова: багатшарові структури, синтетичні антиферромагнетики, РККІ взаємодія, магнітний гістерезис, магнітний фазовий перехід, термомагнітні ефекти, динаміка намагніченості, феромагнітний резонанс, стоячі спінові хвилі, спінтронні наноосцилятори, спінтроніка, магноніка.

ABSTRACT

Borynskyi V.Yu. Magnetic and resonant properties of multilayered nanostructures with antiferromagnetic components. – Qualifying scientific work on the manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy scientific degree in the Specialty 105 "Applied physics and nanomaterials". – Institute of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to the study of magnetostatic and resonant properties of multilayered structures with synthetic and natural antiferromagnetic components when their characteristic linear sizes reach nanoscale – the critical requirement for promising modern avenues of spin electronics. 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 nanoelements $\text{Py}/\text{NiCu}/\text{Py}$, using experimental magnetometric methods, ferromagnetic resonance spectroscopy and micromagnetic simulation technique. New reported physical effects can be utilized to adjust and optimize the final functional characteristics of electronic devices, the design of which implies the involvement of such antiferromagnetic components.

In the Introduction (Chapter 1), the relevance of the chosen topic of the doctoral research is substantiated and a general description of this work is provided. The primary goal and tasks are formulated, the object and subject of the study are described. The main scientific provisions are presented, proving the novelty of the obtained results. Personal PhD candidate's contribution to the works, submitted for the defense of the dissertation, is noted. Information on public approval of research findings at scientific conferences, as well as on the association of this work with R&D topics is provided.

The Second chapter of the work is designed to acquaint the reader with general problems of the doctoral research topic, existing scientific achievements in the field of

synthetic antiferromagnets (SAF) and further prospects for their use as integral components for magnon metamaterials, neuromorphic junctions and other modern nanoelectronic devices. The discussion begins with a brief historical overview of the studies that led to the discovery of Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida indirect exchange interaction acting in multilayered structures and superlattices – a fundamental phenomenon underlying SAF. A comparison of such materials with natural antiferromagnetic (AFM) crystals is presented, emphasizing both their common remarkable features and individual roles in spintronics. The conventional formalism for analytical treatment of indirect interlayer interaction in multilayered structures is introduced. Next, a number of antiferromagnetic components applications are mentioned, from the well-known magnetic memory cells, which combine the advantages of both SAF and natural AFM, to advanced self-biased nanomagnets, the development of which should enrich the available mechanisms for spin-wave dispersion control.

The Third chapter presents 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 approach for simulating time evolution of spatial magnetization distribution in complex magnetic systems. Technical specifications of all the samples studied in this work are also provided.

The Fourth chapter provides the results of the studies of the changes in magnetostatic properties and the nature of the temperature-controlled switching between ferromagnetic and antiferromagnetic states of SAF materials in the context of the transition from two-dimensional thin-film structures to laterally confined nanoelements. The qualitative and quantitative estimation is carried out in accordance with the composition, geometry and temperature of the samples, for the following key magnetic parameters: magnetization, coercive force and effective field of interlayer interaction. In the first part of the chapter, the discussion focuses on the continuous multilayered films $\text{Fe}/[\text{Cr}/\text{FeCr}/\text{Cr}]_n/\text{Fe}$, the classical idea of temperature control for which is based on the use of a diluted weakly ferromagnetic FeCr alloy, possessing thermomagnetic phase transition "ferromagnet-paramagnet". As such, it introduces

temperature-sensitive mechanism for the switching of the type of exchange interaction, acting between the ferromagnetic (FM) Fe layers in the system. Reproducing the experimental magnetization reversal curves according to the proposed phenomenological model, the competition between direct and indirect exchange interaction, as well as between the indirect interaction of AFM and FM types, which act in the SAFs with different spacer designs, 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 ≥ 100 K, inherent to classical structures with a homogeneous FeCr spacer, to 15 K. The enhancement of the switching performance also manifests itself in the anisotropic properties of the SAF – the temperature dependence of the coercive force acquires notably monotonous character. The second part of the chapter considers the arrays of round planar SAF nanodisks Py/NiCu/Py, in which the implementation of a similar mechanism of temperature-controlled SAF magnetization reversal is demonstrated, without, however, the involvement of indirect exchange interaction. Such laterally confined nanoelements have inherent magnetostatic dipole interaction, occurring between the Py layers via stray fields and favoring the antiparallel alignment of their respective magnetic moments, i.e. the AFM state of the SAF. Whereas the switching to FM state occurs due to transmission of direct exchange through the NiCu spacer, when it acquires magnetic ordering at low temperatures. Using magnetometric measurements, the features of the temperature-induced changes in magnetization and hysteresis of the SAF nanodisk arrays were determined. The analysis and interpretation of the experimentally observed effects were treated within the framework of the proposed energy balance expression. It was demonstrated that the dome-like shape of the nanoelements leads to a significant remnant magnetic moment and the appearance of an additional hysteresis loop near the zero-field region at room temperature, when the SAF is in the AFM state. In the temperature range below the phase transition point, which corresponds to the FM state of the elements, they revealed a sharp increase in the coercive force, caused by the enhancement of the magnetic ordering, as well as magnetocrystalline anisotropy, of the doped NiCu spacer.

The study presented *in the Fifth chapter* of the dissertation focuses on investigating the peculiar magnetic state of the bilayer film system Py/FeMn when the

thickness of the AFM FeMn layer becomes smaller than the value of the characteristic exchange length of Py alloy ~ 5 nm. At the same time, the effective Néel temperature, i.e., the actual point of the FeMn layer phase transition "antiferromagnet-paramagnet", also reduces well below such of a bulk crystal, so the AFM layer retains weak antiferromagnetic ordering in a wide temperature range. Under such conditions, it is natural to expect the emergence of non-trivial effects, which are demonstrated in this chapter. In order to characterize the magnetic state of the bilayers, the first part of the chapter examines the temperature- and thickness-dependent dissipation processes of spin-pumping current in Py/FeMn(3–7 nm)/Cu/Py structures, akin to spin valves. Apart from the traditional contribution of the transverse spin current component absorption, taking place in the volume of the antiferromagnetic layer, a second inhomogeneous contribution was revealed, which is most clearly manifested in the case of thin FeMn and at low temperatures. Phenomenological calculations performed within the framework of the standard FMR formalism made it possible to associate this additional dissipation channel with the formation of an exchange spring in the Py/FeMn interface region, which arises due to the competition between ferromagnetic proximity effect and antiferromagnetic exchange in FeMn. It was shown that the anisotropic behavior of this contribution is determined by the deviation of the Néel vector in the AFM layer, what additionally increases the degree of inhomogeneity of the spatial spin distribution at the interface. In the second part of the chapter, a separate study of the resonant magnetization dynamics of the bilayer Py/FeMn (3–7 nm) film structures is presented. The possibility of an almost tenfold isotropic increase in the FMR frequency at room temperature has been demonstrated by the use of a thin AFM layer FeMn(3 nm) in direct contact with the FM layer. In contrast to the samples with larger FeMn thickness values, which clearly exhibit the exchange pinning and related unidirectional anisotropy, in the case of the thin AFM layer, the acceleration of the dynamics is due to the appearance of rotatable anisotropy, which dominates in the entire temperature measurements range. The value of the effective field of the rotatable anisotropy is estimated, and yields about 60 mT at room temperature. Calculations of the FMR frequency temperature dependences, performed for the limiting cases of thin and thick FeMn using the modified Kittel equation, quantitatively compare these two

alternative mechanisms for the acceleration of the adjacent FM Py layer resonant 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, where not only the thickness of the layers, but also the lateral sizes approach the order of the characteristic exchange length. Both single three-layer SAF nanoelements of round and elliptical shape, as well as their periodic arrays with different geometric parameters, are considered. In the first part, using the example of a single perpendicularly magnetized SAF, the capabilities of micromagnetic modeling approach are demonstrated as a convenient tool for the spectral analysis of the multimode spin-wave resonance of such systems. Within the framework of the micromagnetic model, the conditions under which the oscillations of a homogeneous mode and two selected higher order modes are simultaneously established. The field-resolved dispersions of these modes are in good agreement with the experimental data of a real spintronic oscillator excited by the spin-transfer-torque effect. It is also shown how a violation of the symmetry of the static magnetization distribution in elliptical SAF nanoelements leads to a significant qualitative transformation of the spatial structure of standing spin waves. The second part of the chapter investigates the resonant behavior of in-plane magnetized arrays of the Py/NiCu/Py SAF nanodisk with the nominal diameter of 150 nm. Experimental FMR spectra reveal the splitting of the edge spin-wave mode into oscillations of acoustic and optical types at room temperature, which is also successfully reproduced by micromagnetic simulations. The reason behind the arrival of an additional high-frequency edge mode is the asymmetry of the intrinsic dipole interaction inherent to the dome-shaped nanoelements, which creates the notable difference in the FM layers diameters (~15%). The possibility for direct temperature control over the SAF spin-wave dynamics has been demonstrated – at temperatures below the phase transition point of the NiCu spacer ($T < 220$ K), the nanoelements transform into quasi-single-layer FM disks, and the two edge modes merge into a single broad peak. The third part of the chapter considers arrays of SAF nanoelements with analogous multilayered structure, but elliptical shape and twice the smaller size, the length of the major axis of which is 75 nm. In contrast to the previous case, such

nanoelements exhibit the excitation of a single degenerate mode with a strongly hybridized oscillations distribution. Micromagnetic calculations reproduce the anisotropic behavior of this mode and indicate that its spatial profiles result from the superposition of a central and an edge standing spin waves. The physical mechanisms, responsible for such hybridization of the degenerate mode spatial structure, are also discussed.

Keywords: multilayers, synthetic antiferromagnets, RKKY interaction, magnetic hysteresis, magnetic phase transition, thermomagnetic effects, magnetization dynamics, ferromagnetic resonance, standing spin waves, spintronic nanooscillators, spintronics, magnonics.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

– монографії:

1) Магнітна та термоіндукована динаміка у нанoeлементax 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

– публікації у фахових наукових журналах:

2) **Borynskyi 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 (Q3, Scopus)

3) **Borynskyi 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 (без квартилію, Scopus)

4) **Borynskyi 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 (Q1, Scopus)

5) Polishchuk D.M., Polek T.I., **Borynskyi 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 (Q1, Scopus)

6) Polishchuk D.M., Polek T.I., **Borynskyi 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 (Q3, Scopus)

7) Polishchuk D.M., Tykhonenko-Polishchuk Yu.O., **Borynskyi 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 (Q1, Scopus)

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1) **Боринський В.Ю.**, Верба Р.В., Поліщук Д.М., Кравець А.Ф., Товстолиткін О.І. / Особливості вищих спін-хвильових мод наноелемента синтетичного антиферромагнетика еліптичної форми // Тези доповідей конференції «ІХ українська наукова конференція з фізики напівпровідників» (УНКФН-9, Ужгород). – Травень 22-26, 2023. – С. 143.

2) **Borynskyi V.Yu.**, Verba R.V., Polishchuk D.M., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I. / Shape-induced modification of spin waves in elliptical synthetic antiferromagnet with perpendicular anisotropy // *Proceedings of the XXIII International Young Scientists Conference on Applied Physics (ICAP-23, Kyiv)*. – May 16-20, 2023. – P. 38.

3) **Borynskyi V.Yu.**, Polishchuk D.M., Sharai I.V., Melnyk A.K., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., V. Korenivski V. / Spin-wave resonance in arrays of nanoscale synthetic-antiferromagnets // *Abstracts of the 2022 IEEE 12th International Conference "Nanomaterials: Applications & Properties" (NAP-2022, Krakow)*. – September 11-16, 2022. – P. 07nmm-19.

4) **Borynskyi V.Yu.**, Polishchuk D.M., Melnyk A.K., Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Enhanced magnetic anisotropy in small-sized elliptical synthetic-antiferromagnets // *Abstract Book of the International research and practice conference "Nanotechnology and Nanomaterials" (NANO-2022, Lviv)*. – August 25-27, 2022. – P. 51.

5) Tovstolytkin A.I., Kravets A.F., Polishchuk D.M., **Borynskyi V.Yu.**, Korenivski V. / Exchange coupling/decoupling effects in composite magnetic nanostructures // *Abstracts of the 2021 IEEE 11th International Conference "Nanomaterials: Applications & Properties" (NAP-2021, Odesa)*. – September 5-11, 2021. – P. NMM-A-09.

6) Polishchuk D.M., Polek T.I., **Borynskyi V.Yu.**, Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Isotropic FMR frequency enhancement in Py/FeMn bilayers under strong magnetic proximity effect // Abstracts of the 2021 IEEE 11th International Conference "Nanomaterials: Applications & Properties" (NAP-2021, Odesa). – September 5-11, 2021. – P. NMM-A-06.

7) Поліщук Д.М., Наконечна О.І., Литвиненко Я.М., **Боринський В.Ю.**, Савіна Ю.О., Пащенко В.О., Кравець А.Ф., Товстолиткін О.І. / Особливості міжшарового зв'язку в багатошарових наноструктурах з антиферомагнітним компонентом // Тези доповідей конференції «Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем» (СПФММС-2021, Київ). – Травень 25-27, 2021. – С. 70.

8) Tovstolytkin A.I., Kravets A.F., Polishchuk D.M., Lytvynenko Ya.M., **Borynskyi V.Yu.**, Korenivski V. / Advanced spin-valve type nanostructures with weakly ferromagnetic and antiferromagnetic spacers // Conference abstracts "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-12, Kamianets-Podilskyi). – June 1-5, 2020. – P. 64.

9) Polishchuk D.M., Polek T.I., **Borynskyi V.Yu.**, Kravets A.F., Tovstolytkin A.I., Korenivski V. / Coupled FMR modes and frequency enhancement in Py/FeMn bilayers under magnetic proximity effect // Abstracts of the 2019 IEEE 9th International Conference "Nanomaterials: Applications & Properties" (NAP-2019, Odesa). – September 15-20, 2019. – P. 02M35-1.

10) Polishchuk D.M., **Borynskyi V.Yu.**, Polek T.I., Tovstolytkin A.I. / Temperature-induced changes in static and dynamic magnetic properties of Py/FeMn bilayers // Proceedings of the XIX International Young Scientists Conference on Applied Physics (ICAP-19, Kyiv). – May 21-25, 2019. – P. 26.