

АНОТАЦІЯ

Харлан Ю. І. Вплив структури та конфігурації феромагнітних планарних наносистем на їхні магнітодинамічні властивості. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 — Фізика та астрономія. — Інститут магнетизму імені В.Г. Бар'яхтара Національної академії наук України, Київ, 2024.

Основною **метою** досліджень, проведених у дисертаційній роботі, було визначення впливу конфігурації та структури феромагнітних нанoeлементів на їхні магнітні властивості та встановлення методів керування такими характеристиками, як частота феромагнітного резонансу, закон дисперсії спінових хвиль, ширина резонансної лінії та магнітна анізотропія.

Зазначені структури є елементною базою для створення у світлому майбутньому приладів електроніки, заснованих на принципах магноніки, яка пропонує використання спінових хвиль - колективних магнітних збуджень - для запису і зчитування інформації. Використання спінових хвиль (СХ) дозволить на кілька порядків зменшити теплові втрати і значно підвищити швидкість запису інформації. У роботі розглянуто вплив конфігурації намагніченості та анізотропії форми магнітних нанoeлементів а також параметрів двійникової структури в магнітних сплавах з ефектом пам'яті форми (МСЕПФ) на їхні магнітодинамічні властивості, зокрема на дисперсійне співвідношення спінових хвиль. Використовуючи класичні методи математичної фізики для розв'язку рівняння Ландау–Ліфшиця (ЛЛ), було побудовано теоретичні моделі для опису низки експериментальних ефектів, виявлених за допомогою метода феромагнітного резонансу (ФМР).

Дисертаційна робота складається з п'яти розділів. У Вступі викладено аргументацію актуальності обраної теми, визначено основну мету та завдання дослідження, а також окреслено об'єкт і предмет вивчення. Крім того, представлено ключові наукові положення, що відображають новизну отриманих результатів, підкреслено особистий внесок здобувача у виконанні роботи, які

винесені на захист. Також надано інформацію про апробацію наукових результатів на конференціях та про зв'язок дисертаційного дослідження з науково-дослідними роботами.

Перший розділ дисертації має за мету ознайомити читача з явищем феромагнітного резонансу та поняттям спінових хвиль. Наведено рівняння Ландау–Ліфшиця – основне рівняння для опису магнітної динаміки, яке, зокрема, використовується для знаходження дисперсійного співвідношення для спінових хвиль. Розглянуто загальний вигляд повної енергії феромагнетика, обговорено внески диполь-дипольної, Зееманівської та обмінної взаємодій, а також магнітокристалічної анізотропії. Окрім того, представлена низка прикладів розв'язку рівняння Ландау–Ліфшиця для систем з різноманітними анізотропією форми та типом магнітокристалічної анізотропії; виведене дисперсійне співвідношення для випадку однорідного феромагнітного резонансу, стоячих по товщині плівки та біжучих спінових хвиль.

Другий розділ присвячено дослідженню впливу типу обмінної взаємодії на границях двійникових компонент в сплавах з ефектом пам'яті форми на їхні магнітні властивості.

У **підрозділі 2.1** теоретично пояснено експериментальні результати магнітного резонансу в епітаксialьних тонких плівках $\text{Ni}_{46.0}\text{Mn}_{36.8}\text{Sn}_{11.4}\text{Co}_{5.8}/\text{MgO}(001)$, згідно до яких одна резонансна лінія, що спостерігається в аустеніті, розщеплюється на три лінії в мартенситній фазі. Розвинутий теоретичний підхід показав, що додаткові резонансні лінії зумовлені слабким антиферомагнітним зв'язком феромагнітних двійникових компонентів через двійникові границі. Ця особливість демонструє сильну подібність між субмікронним двійниковим мартенситом і штучними антиферомагнітними надгратками, що дозволяє використовувати такі матеріали в якості самоорганізованих синтетичних антиферомагнетиків.

У **підрозділі 2.2** експериментально спостережена гігантська магнітна анізотропія четвертого порядку у двійникованій епітаксialьній плівці NiMnGa . Її поява була пояснена феромагнітним зв'язком між варіантами двійників з сильними одновісними магнітокристалічними анізотропіями, спрямованими

ортогонально, за умови, коли поле міждвійникового обміну порівнянне з полем анізотропії. Виявлений ефект гігантської двохоної анізотропії має далекоглядні наукові та технологічні наслідки, такі як пристрої пам'яті з декількома виродженими магнітними станами, можливість суттєво зменшити критичні струми в перенесенні спіну тощо.

У **третьому** розділі побудовано теоретичну модель феромагнітного резонансу в просторово неоднорідних епітаксialьних плівках з ефектом пам'яті форми, в яких відбувається фероеластичний фазовий перехід. Запропонована теоретична модель базується на теорії мартенситного перетворення (МП) Ландау та статистичній моделі.

У **підрозділі 3.1** показано, що аномально сильна температурна залежність параметрів кристалічної ґратки мартенситної плівки привносить суттєвий внесок у температурну залежність резонансного значення зовнішнього магнітного поля. Більш того, пояснено звуження резонансного піку, яке експериментально спостерігалось при охолодженні плівки дещо нижче температури Кюрі. У **підрозділі 3.2** показано, що просторова неоднорідність матеріалу призводить до дисперсії локальних температур мартенситного перетворення, що спричиняє варіацію локальних значень магнітної анізотропії. Ця модель дозволяє пояснити різке розширення лінії феромагнітного резонансу, що спостерігається в експериментах при низьких температурах. Розроблений підхід може бути використаний для аналізу інших магнітних даних, таких як магнітна сприйнятливність, петлі магнітного гістерезису і т.д.

Дослідження, представлені в **четвертому** розділі, зосереджені на розгляді впливу конфігурації намагніченості та розмагнічуючого поля на спектр стоячих спінових хвиль в магнітних нанoeлементax. У **підрозділі 4.1** експериментально і теоретично досліджено стоячі спінові хвилі в масиві нікелевих трикутних точках. Спектри феромагнітного резонансу були отримані в зовнішньому насичуючому магнітному полі, спрямованому перпендикулярно до площини масиву. Розроблений теоретичний підхід дозволяє описувати стоячі спін-хвильові моди як у перпендикулярно намагнічених правильних призмах, так і в близьких до них зрізаних пірамідах. З прикладної точки зору, дані дослідження

відкривають можливість збільшення щільності запису інформації, оскільки анізотропія магнітних властивостей трикутних частинок зумовлює різноманітність спін-хвильових мод.

У підрозділі 4.2 теоретично пояснюється експериментальне спостереження нетрадиційного одночастотного резонансного відгуку плоских циліндричних пермалоєвих нанoeлементів, який досягається прикладанням магнітного поля під певним критичним кутом відносно нормалі до точки. Це явище пояснюється злиттям спін-хвильових власних мод при переході спін-хвильової дисперсії від типу "прямі об'ємні хвилі" до типу "зворотні об'ємні хвилі" і може бути корисним для створення систем зі спектрально вузьким магнітним шумом.

Ключові слова: спінові хвилі, феромагнітний резонанс, магнітні нанoeлементи, динаміка намагніченості, магнітна анізотропія, магнітні сплави з ефектом пам'яті форми, мартенситне перетворення, просторова неоднорідність, магноніка, спінтроніка.

ABSTRACT

Kharlan Y. I. The influence of the structure and configuration of ferromagnetic planar nanostructures on their magnetodynamic properties.—Qualification scientific work in the form of manuscript.

Thesis for doctor of philosophy degree in specialty 104—Physics and Astronomy. — V.G. Baryakhtar Institute of Magnetism of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

This thesis focuses on studying the control of magnetodynamic properties of ferromagnetic nanostructures, which are the ground for developing of future electronic devices based on magnonics. Magnonics proposes using spin waves—collective magnetic excitations — for recording and reading information, as they do not involve Joule heating and allow for significantly higher information recording speeds. The work investigates the impact of magnetization configuration and shape anisotropy in magnetic nanoelements, as well as the parameters of twin structures in shape memory alloys, on their magnetodynamic properties, particularly on the dispersion relation of spin waves. Theoretical models were developed using classical methods of mathematical physics to solve the Landau-Lifshitz equation to describe several experimental effects observed via ferromagnetic resonance methods.

The dissertation consists of five chapters. The **introduction** substantiates the relevance of the chosen topic, defines the primary aim and objectives of the research, and outlines the object and subject of study. It also presents key scientific propositions showing the novelty of the obtained results, highlights the author's personal contribution to the work proposed for defense, and provides information on the dissemination of scientific results at conferences and their relation to research projects.

The **first chapter** introduces the phenomenon of ferromagnetic resonance and the concept of spin waves. It presents the Landau-Lifshitz equation — the fundamental equation describing magnetic dynamics — used to derive the dispersion relation for spin waves. A general representation of the total energy of a ferromagnet is provided, with discussions of the contributions of dipole-dipole, Zeeman, and exchange interactions, as well as magnetocrystalline anisotropy. Furthermore, several examples

of solutions to the Landau-Lifshitz equation for systems with various shape anisotropies and types of magnetocrystalline anisotropy are provided. The dispersion relation is derived for cases including uniform ferromagnetic resonance, standing spin waves across the film thickness, and propagating spin waves.

The **second chapter** investigates the influence of the type of exchange interaction at the twin boundaries in shape memory alloys on their magnetic properties.

Section 2.1 explains experimental results of magnetic resonance in epitaxial thin films of $\text{Ni}_{46.0}\text{Mn}_{36.8}\text{Sn}_{11.4}\text{Co}_{5.8}/\text{MgO}(001)$. These results show the splitting of a single resonance line observed in the austenite phase into three lines in the martensite phase. The developed theoretical approach revealed that the additional resonance lines result from weak antiferromagnetic coupling between ferromagnetic twin components across twin boundaries. This demonstrates a strong similarity between submicron twin martensite structures and artificial antiferromagnetic superlattices, enabling the use of such materials as self-organized synthetic antiferromagnets.

Section 2.2 presents the experimental observation of a giant fourfold magnetic anisotropy in a twinned epitaxial NiMnGa film. Its appearance is explained by ferromagnetic coupling between twin variants with strong uniaxial magnetocrystalline anisotropies oriented orthogonally, provided the inter-twin exchange field is comparable to the anisotropy field. The discovered effect has significant scientific and technological implications, such as the development of multi-degenerate state memory devices and reduction of critical spin-transfer current densities.

The **third chapter** develops a theoretical model of ferromagnetic resonance in spatially inhomogeneous epitaxial films with shape memory effects undergoing ferroelastic phase transitions. The model is based on Landau's theory of martensitic transformation and a statistical approach.

Section 3.1 shows that the anomalously strong temperature dependence of the lattice parameters in martensitic films significantly contributes to the temperature dependence of the resonance magnetic field. Moreover, the narrowing of the resonance peak observed experimentally during cooling just below the Curie temperature is explained.

Section 3.2 demonstrates that material inhomogeneity causes dispersion in local martensitic transformation temperatures, resulting in variations in local magnetic anisotropy values. This model explains the sharp broadening of the ferromagnetic resonance line observed experimentally at low temperatures. The proposed approach can be applied to analyze other magnetic data, such as susceptibility and hysteresis loops.

The **fourth chapter** explores the influence of magnetization configuration and demagnetizing fields on the spectrum of standing spin waves in magnetic nanodots.

In **Section 4.1** one experimentally and theoretically studies standing spin waves in arrays of nickel triangular nanodots. Ferromagnetic resonance spectra were obtained in a saturating magnetic field perpendicular to the array plane. The developed theoretical approach describes standing spin-wave modes in perpendicularly magnetized prisms and truncated pyramids, offering potential for the increasing information storage density due to the diversity of spin-wave modes in triangular nanoparticles.

Section 4.2 explains the unconventional single-frequency resonance response of flat cylindrical permalloy nanodots observed experimentally under a critical magnetic field angle. This phenomenon is attributed to the merging of spin-wave eigenmodes as the spin-wave dispersion transitions between forward and backward volume wave types, which may benefit systems requiring spectrally narrow magnetic noise.

Keywords: spin waves, ferromagnetic resonance, magnetic nanodots, magnetization dynamics, magnetic anisotropy, shape memory alloys, martensitic transformation, spatial inhomogeneity, magnonics, spintronics.