

АНОТАЦІЯ

Бусел О.П. Спінові хвилі в наномасштабних елементах зі структурованими інтерфейсами в феромагнетиках та антиферомагнетиках. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія (10 - Природничі науки). – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню особливостей та характеру розповсюдження спінових хвиль в упорядкованих наномасштабних елементах зі структурованими інтерфейсами як в феромагнетиках, так і в антиферомагнетиках та спрямована на отримання нових знань в актуальному напрямку сучасних досліджень. Для дослідження було обрано феромагнітні та антиферомагнітні тонкі плівки з упорядкованими наномасштабними елементами (антидоти), зокрема їх композиції – мультишари, з відповідними структурованими інтерфейсами, які розглядаються як композитні матеріали як нескінченно тонкі, так і скінченної товщини. Спінові хвилі відкривають перспективу беззарядних пристроїв, які можуть бути конкурентоспроможними для поточних пристроїв. Основними перевагами використання магнітних матеріалів в електронних та телекомунікаційних пристроях є їх керованість зовнішнім магнітним полем, енергонезалежність та програмуваність. Штучне структурування нанорозмірних структур дає чудову можливість для модифікації їх спектрів збудження, а отже для проектування матеріалів із непередбачуваними властивостями, які потенційно можуть задовольнити постійну потребу в більш швидкому маніпулюванні більшим об'ємом інформації, більшими ємностями зберігання зі скороченням часу запису та читання, а також постійний попит на мініатюризацію та енергетичну ефективність, оскільки передача, зберігання та маніпулювання інформацією є важливою частиною високих технологій.

Основна частина дисертаційної роботи складається з п'яти розділів, які присвячені дослідженню особливостей розсіяння спінових хвиль в магнітних матеріалах з структурованими інтерфейсами на прикладі феромагнітних та антиферомагнітних тонких плівок.

Перший розділ присвячено докладному аналізу розповсюдження спінових хвиль в феромагнетиках та антиферомагнетиках та дослідженню, що пов'язане з граничними умовами на різноманітних структурованих інтерфейсах, оскільки одна з найважливіших проблем, що обмежує застосування спінових хвиль, стосується можливості когерентної та слабо затухаючої передачі сигналу – інформації, закодованої у фазу чи амплітуду спінових хвиль, між окремими частинами магнітного контура. Таким чином, управління фазою і амплітудою спінових хвиль є важливим для магнітоніки при виконанні як аналогових, так і цифрових обчислень оснований на спінових хвилях, оскільки обробка будь-якого виду хвиль залежить від інтерференційних ефектів, які залежать від основних характеристик хвиль – фази та амплітуди.

У другому розділі дисертаційної роботи розроблено метод ефективного керування спіновими хвилями, які когерентно розповсюджуються, в межах магнітних наноструктур (хвилеводів). Метод засновано на аномальному заломленні в метаматеріалі – тонкому феромагнітному прошарку у вигляді пластини з градуйованим індексом (ГРІН), вздовж якого поступова зміна параметрів матеріалу – намагніченості насичення або магнітної анізотропії дозволяє загинати фронт переданих спінових хвиль і контролювати заломлення. На основі аналітичних розрахунків фазового зсуву, набутого спіноюю хвилею внаслідок зміни параметрів матеріалу у обмеженій області, показано, що рефракцію спінової хвилі можна змінити на заданий кут. При аномальному заломленні хвильовий фронт заломлених спінових хвиль нахиляється під бажаним кутом відносно хвильового фронту падаючих спінових хвиль навіть при нормальному падінні. Це явище вимагає лінійної зміни фази переданих хвиль поряд із інтерфейсом, де відбувається заломлення.

Його опис вимагає узагальнення закону Снеліуса, що використовується для наведення спінових хвиль у хвилеводах вперше. Для цього було побудовано аналітичну модель розсіювання обмінних спінових хвиль на однорідній феромагнітній пластині кінцевої ширини – ГРІН пластині, вбудованій у феромагнітний шар (хвилевід). Мінімізуючи загальну енергію, виведено граничні умови на інтерфейсах між ГРІН пластиною та її оточенням з обох боків та досліджено повну залежність між зсувами фаз та амплітудами спінових хвиль, що падають та проходять.

У третьому розділі дисертаційної роботи виведено граничні умови для динаміки намагніченості як для інтерфейсу скінченної товщини, так і для нескінченно тонкого між феромагнітним та антиферомагнітним матеріалами в наближенні неперервного середовища застосовуючи систематичний підхід. Граничні умови визначені з точки зору деяких середніх властивостей інтерфейсу. Припускаючи, що інтерфейс має скінченну товщину, яка набагато менша за довжину спінової хвилі, враховується анізотропія інтерфейсу, симетричний обмінний зв'язок на інтерфейсі та зв'язок на інтерфейсі, що виникає внаслідок порушення інверсійної симетрії в області інтерфейсу. Використовуючи узагальнені граничні умови на інтерфейсі феромагнетик/антиферомагнетик, беручи до уваги лише енергії однорідного та неоднорідного обміну між усіма підґратками, теоретично досліджено збудження та проходження поверхневої згасаючої спінової хвилі в антиферомагнетик, коли спінова хвиля в феромагнетик падає на цей інтерфейс.

У четвертому розділі представлено нову концепцію некомпенсованості підґраток двопідґраткового антиферомагнетика, вводячи нову фізичну характеристику для інтерфейсів скінченної товщини, а саме ступінь некомпенсованості підґраток антиферомагнетика (СНПА), яка робить суттєвий крок до вирішення критичної проблеми управління розповсюдженням спінових хвиль через інтерфейси антиферомагнетика з феромагнетиком. Було продемонстровано, що проходження спінових хвиль

від антиферомагнетику до феромагнетику стає можливим лише за конкретної конструкції інтерфейсу. В іншому випадку спінові хвилі повністю відбиваються від поверхні феромагнетику. Вперше виведено граничні умови для будь-якого випадку СНПА на інтерфейсі антиферомагнетик/феромагнетик. Продемонстровано залежність пропускання, відбиття та відповідних фазових зсувів на цьому інтерфейсі від СНПА відповідно до обґрунтованої довжини хвилі спінових хвиль.

У п'ятому розділі побудовано аналітичну модель малих відхилень від значень рівноваги магнітного моменту та магнітного поля у феромагнітній тонкій плівці Pu з круговим антидотом. В результаті аналітичного моделювання у рамках обґрунтованої фізичної моделі вперше досліджено просторово залежний феромагнітний резонанс у феромагнітній тонкій плівці з одним круговим антидотом під впливом зовнішнього магнітного поля перпендикулярного до поверхні зразка. Лінеаризоване рівняння Ландау-Ліфшиця було розв'язано як власну задачу у прямому просторі для створення аналітичної моделі малих відхилень від значень рівноваги магнітного моменту та магнітного поля. Було встановлено, що основною причиною виникнення неоднорідних коливань є магнітостатичне поле, спричинене наявністю антидоту. Модель показала, що існує максимум амплітуди поля розмагнічування, локалізованого біля краю антидота, і амплітуда зменшується зі збільшенням відстані від краю. Також були визначені умови локальних феромагнітних резонансів, які відрізняються на різній відстані від краю антидоту через неоднорідність магнітостатичного поля.

Усі результати, що виносяться на захист, є новими. Вони неодноразово обговорювалися на міжнародних конференціях. За матеріалами дисертації опубліковано 4 статті та 9 тез, які повною мірою відображають її зміст.

Ключові слова: спінова хвиля, згасаюча спінова хвиля, феромагнетик, антиферомагнетик, інтерфейс, граничні умови, антидот, градуйований індекс,

аномальне заломлення, ступінь некомпенсованості підґраток антиферомагнетика.

Список публікацій здобувача за темою дисертації, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. S. Mieszczak, O. Busel, P. Gruszecki, A. N. Kuchko, J. W. Kłos, and M. Krawczyk: Anomalous Refraction of Spin Waves as a Way to Guide Signals in Curved Magnonic Multimode Waveguides, *Physical Review Applied* (Vol. 13 (2020), Ps. 054038 – 13), DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.054038.

Szymon Mieszczak and Oksana Busel contributed equally to this work.

2. O. Busel, O. Gorobets, Yu. Gorobets: Propagation of Spin Waves Through an Interface Between Ferromagnetic and Antiferromagnetic Materials, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* (Vol. 32 (2019), Ps. 3097–3102), DOI: 10.1007/s10948-019-5021-8.

3. O. Busel, O. Gorobets, Yu. Gorobets: Boundary Conditions at The Interface of Finite Thickness Between Ferromagnetic and Antiferromagnetic Materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (Vol. 462 (2018), Ps. 226-229), DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.04.066.

4. O. Busel, M. Zelent, O. Gorobets, Yu. Gorobets, M. Krawczyk: The Resonant Dynamic Magnetization Distribution in Ferromagnetic Thin Film with the Antidot, *Acta Physica Polonica A* (Vol. 133 (2018) No. 3, Ps. 492-496), DOI: 10.12693/APhysPolA.133.492.

Список публікацій здобувача за темою дисертації які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. S. Mieszczak, O. Busel, P. Gruszecki, J.W. Kłos and M. Krawczyk: Spin-Wave Phase Change via Resonant Transmission through Magnetic Spacer. IEEE 9th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties” (NAP2019), Odesa, Ukraine.

2. S. Mieszczak, O. Busel, P. Gruszecki, J.W. Kłos and M. Krawczyk: Spin-Wave Phase Change via Resonant Scattering in Magnetic Spacer. Joint European Magnetic Symposia (JEMS2019), Uppsala, Sweden.
3. O. Busel, O. Gorobets, Yu. Gorobets: Inclined Spin Waves in Antiferromagnet/Ferromagnet System with Different Degree of Sublattice Noncompensation at the Interface. International workshop “Curvilinear Micromagnetism” (CurvMag2019), Kyiv, Ukraine.
4. O.P. Busel, O.Yu. Gorobets, Yu.I. Gorobets: Boundary Conditions at the Interface of Finite Thickness between Ferromagnetic and Antiferromagnetic Materials. 2nd IEEE Conference on Advances in Magnetism (IEEE AIM 2018), La Thuile, Italy.
5. O.P. Busel, O.Yu. Gorobets, Yu.I. Gorobets: Propagation of Spin Waves Through an Interface Between Ferromagnetic and Antiferromagnetic Materials. 6th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2018), Turkey.
6. O. Busel, O. Gorobets, Yu. Gorobets: Boundary conditions at an antiferromagnet/ferromagnet interface of finite thickness. Propagation of spin wave through this interface. 3rd International Advanced School on Magnonics2018 (ICSM2018), Kyiv, Ukraine.
7. O. Busel, M. Zelent, O. Gorobets, Yu. Gorobets, M. Krawczyk: Dynamics of spin waves in ferromagnet thin film with an antidote. International Conference on Magnetism and Spintronics (Sol-SkyMag 2017), San Sebastian, Spain.
8. O. Busel, M. Zelent, O. Gorobets, Yu. Gorobets, M. Krawczyk: Spin wave eigenoscillations in ferromagnetic thin film with the single hole. The European Conference Physics of Magnetism 2017 (PM'17) Poznań, Poland.
9. O. Busel, M. Zelent, O. Gorobets, Yu. Gorobets, M. Krawczyk: The magnetization distribution in ferromagnetic thin film with the antidot. Workshop MagIC2017 – Magnetism, Interactions and Complexity: a multifunctional aspects of spin wave dynamics, Trzebaw, Poland.

ABSTRACT

Busel O.P. Spin waves in nanoscale elements with structured interfaces in ferromagnets and antiferromagnets. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation in support of a Doctor of Philosophy scientific degree in specialty 104 - Physics and astronomy (10 - Natural sciences). – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the research of features and character of spin wave propagation in ordered nanoscale elements with structured interfaces in both ferromagnets and antiferromagnets and is aimed at gaining new knowledge in the prospective direction of modern research. Ferromagnetic and antiferromagnetic thin films with ordered nanoscale elements (antidots), in particular their multilayer compositions, with appropriate structured interfaces, which are considered as composite materials of both infinitely thin and finite thickness, were selected for the study. Spin waves open the prospect of non-volatile devices that can be competitive with modern devices. The main advantages of using magnetic materials in electronic and telecommunication devices are their controllability by an external magnetic field, energy independence and programmability. Artificial structuring of nanoscale patterns provides an excellent opportunity to modify their excitation spectra, and therefore to design materials with unpredictable properties that can potentially meet the constant need for faster manipulation of larger amounts of information, larger storage capacities with reduced write and read time, and the constant demand for miniaturization and energy efficiency, as the transmission, storage and manipulation of information is an important part of high technology.

The main part of the dissertation consists of five sections, which are devoted to the study of the scattering of spin waves in magnetic materials with structured interfaces on the example of ferromagnetic and antiferromagnetic thin films.

The first section is devoted to a detailed analysis of the propagation of spin waves in ferromagnets and antiferromagnets and the study of boundary conditions

at various structured interfaces, as one of the most important problems limiting the use of spin waves concerns the possibility of coherent and weakly damped transmission of a signal - information encoded in phase or amplitude of spin waves, - between individual parts of the magnon circuit. Thus, the control of the phase and amplitude of spin waves is important for magnonics for performing both analog and digital calculations based on spin waves, because the processing of any type of wave depends on interference effects that depend on the main characteristics of waves – phase and amplitude.

In the second section of the dissertation the method is developed for an effective guiding of spin waves, which coherently propagate, within magnetic nanostructures (waveguides). The method is based on anomalous refraction in a metamaterial – a thin ferromagnetic layer in the form of a slab with a graded index (GRIN), along which a gradual change in the parameters of the material – saturation magnetization or magnetic anisotropy – allows to tilt the front of transmitted spin waves and control the bending. Based on analytical calculations of the phase shift acquired by the spin wave due to changes in the parameters of the material in a limited region, it is shown that the refraction of the spin wave can be changed for a desired angle. In the case of anomalous refraction, the wavefront of the refracted spin waves tilts at the desired angle relative to the wavefront of the incident spin waves, even at normal incidence. This phenomenon requires a linear change in the phase of the transmitted waves near the interface where the refraction occurs. Its description requires a generalization of Snell's law, which is used to guide spin waves in waveguides for the first time. For this purpose, an analytical model was developed for the exchange spin wave scattering on a homogeneous ferromagnetic slab of finite width – GRIN slab embedded in a ferromagnetic layer (waveguide). Minimizing the total energy, the boundary conditions at the interfaces between the GRIN slab and its surrounding on both sides are derived and the complete dependence between the phase shifts and the amplitudes of the incident and transmitted spin waves is investigated.

In the third section of the dissertation, the boundary conditions for the magnetization dynamics for both the finite thickness interface and the infinitely thin interface between ferromagnetic and antiferromagnetic materials in the continuous medium approximation are derived using a systematic approach. The boundary conditions are defined in terms of some average interface properties. Assuming that the interface has a finite thickness that is much less than the spin wave wavelength, the anisotropy of the interface, the symmetric exchange interaction on the interface, and the interaction on the interface resulting from the inversion symmetry breaking in the interface area are taken into account. Using the generalized boundary conditions at the ferromagnet/antiferromagnet interface and taking into account only the energies of homogeneous and inhomogeneous exchange between all sublattices, the excitation and transmission of a surface evanescent spin wave into the antiferromagnet when this spin wave enters the interface from the ferromagnet is theoretically investigated.

The fourth section presents a new concept of noncompensation of sublattices in a two-lattice antiferromagnet, introducing a new physical characteristic for finite-thickness interfaces, namely the degree of sublattice noncompensation of antiferromagnet (DSNA), which makes a significant step towards solving the critical issue of controlling the spin wave propagation through an interface of antiferromagnet with ferromagnet. It has been shown that the transmission of spin waves from the antiferromagnet to the ferromagnet becomes possible only with a specific design of the interface. Otherwise, the spin waves are completely reflected from the surface of the ferromagnet. For the first time, the boundary conditions for any case of DSNA on the antiferromagnet/ferromagnet interface are derived. The dependence of transmission, reflection and corresponding phase shifts in this interface on DSNA is demonstrated in accordance with the reasonable wavelengths of spin waves.

In the fifth section, an analytical model of small deviations from the equilibrium values of magnetic moment and magnetic field in a Py ferromagnetic thin film with a circular antidot is constructed. As a result of analytical modeling, a

spatially dependent ferromagnetic resonance in a ferromagnetic thin film with one circular antidot under the influence of an external magnetic field perpendicular to the sample surface was studied for the first time within the framework of a substantiated physical model. The linearized Landau-Lifshitz equation was solved as an eigenproblem in the direct space to create an analytical model of small deviations from the equilibrium values of magnetic moment and magnetic field. It was found that the main cause of inhomogeneous oscillations is the magnetostatic field caused by the presence of the antidot. The model showed that there is a maximum of the amplitude of the demagnetization field localized near the edge of the antidot, and the amplitude decreases with increasing distance from the edge. The conditions of local ferromagnetic resonances, which vary at different distances from the edge of the antidot due to the heterogeneity of the magnetostatic field, were also determined.

All the results submitted for defense are new. They have been repeatedly discussed at international conferences. Based on the materials of the dissertation, 4 articles and 9 conference proceedings have been published, which fully reflect the content of the dissertation.

Keywords: spin wave, evanescent spin wave, ferromagnet, antiferromagnet, interface, boundary conditions, antidot, graded index, anomalous refraction, degree of sublattice noncompensation of antiferromagnet.

List of publications of the applicant on the topic of the dissertation where the main scientific results of the dissertation are published:

1. S. Mieszczak, O. Busel, P. Gruszecki, A. N. Kuchko, J. W. Kłos, and M. Krawczyk: Anomalous Refraction of Spin Waves as a Way to Guide Signals in Curved Magnonic Multimode Waveguides, *Physical Review Applied* (Vol. 13 (2020), Ps. 054038 – 13), DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.054038.

Szymon Mieszczak and Oksana Busel contributed equally to this work.

2. O. Busel, O. Gorobets, Yu. Gorobets: Propagation of Spin Waves Through an Interface Between Ferromagnetic and Antiferromagnetic Materials, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* (Vol. 32 (2019), Ps. 3097–3102), DOI: 10.1007/s10948-019-5021-8.

3. O. Busel, O. Gorobets, Yu. Gorobets: Boundary Conditions at The Interface of Finite Thickness Between Ferromagnetic and Antiferromagnetic Materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (Vol. 462 (2018), Ps. 226-229), DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.04.066.

4. O. Busel, M. Zelent, O. Gorobets, Yu. Gorobets, M. Krawczyk: The Resonant Dynamic Magnetization Distribution in Ferromagnetic Thin Film with the Antidot, *Acta Physica Polonica A* (Vol. 133 (2018) No. 3, Ps. 492-496), DOI: 10.12693/APhysPolA.133.492.

List of publications of the applicant on the topic of the dissertation which certify the approbation of the dissertation materials:

1. S. Mieszczak, O. Busel, P. Gruszecki, J.W. Kłos and M. Krawczyk: Spin-Wave Phase Change via Resonant Transmission through Magnetic Spacer. IEEE 9th International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties” (NAP2019), Odesa, Ukraine.

2. S. Mieszczak, O. Busel, P. Gruszecki, J.W. Kłos and M. Krawczyk: Spin-Wave Phase Change via Resonant Scattering in Magnetic Spacer. Joint European Magnetic Symposia (JEMS2019), Uppsala, Sweden.

3. O. Busel, O. Gorobets, Yu. Gorobets: Inclined Spin Waves in Antiferromagnet/Ferromagnet System with Different Degree of Sublattice Noncompensation at the Interface. International workshop “Curvilinear Micromagnetism” (CurvMag2019), Kyiv, Ukraine.

4. O.P. Busel, O.Yu. Gorobets, Yu.I. Gorobets: Boundary Conditions at the Interface of Finite Thickness between Ferromagnetic and Antiferromagnetic Materials. 2nd IEEE Conference on Advances in Magnetism (IEEE AIM 2018), La Thuile, Italy.

5. O.P. Busel, O.Yu. Gorobets, Yu.I. Gorobets: Propagation of Spin Waves Through an Interface Between Ferromagnetic and Antiferromagnetic Materials. 6th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2018), Turkey.

6. O. Busel, O. Gorobets, Yu. Gorobets: Boundary conditions at an antiferromagnet/ferromagnet interface of finite thickness. Propagation of spin wave through this interface. 3rd International Advanced School on Magnonics2018 (ICSM2018), Kyiv, Ukraine.

7. O. Busel, M. Zelent, O. Gorobets, Yu. Gorobets, M. Krawczyk: Dynamics of spin waves in ferromagnet thin film with an antidote. International Conference on Magnetism and Spintronics (Sol-SkyMag 2017), San Sebastian, Spain.

8. O. Busel, M. Zelent, O. Gorobets, Yu. Gorobets, M. Krawczyk: Spin wave eigenoscillations in ferromagnetic thin film with the single hole. The European Conference Physics of Magnetism 2017 (PM'17) Poznań, Poland.

9. O. Busel, M. Zelent, O. Gorobets, Yu. Gorobets, M. Krawczyk: The magnetization distribution in ferromagnetic thin film with the antidot. Workshop MagIC2017 – Magnetism, Interactions and Complexity: a multifunctional aspects of spin wave dynamics, Trzebaw, Poland.