

АНОТАЦІЯ

Гусева Ю.І. Спінові й акустичні хвилі в системах з плоскими неоднорідними дефектами - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена дослідженню поведінки спінових та акустичних хвиль в системах з неоднорідностями, в яких порушується симетрія інверсії просторової осі, та з магнітопружними дефектами. Зокрема, розглядається вплив порушення симетрії інверсії просторової осі на межі двох феромагнетиків на розповсюдження спінових хвиль, модель збудження об'ємних спінових хвиль акустичною хвилею Косевича та вплив магнітних включень в пружній системі на розповсюдження акустичних хвиль.

Сучасний стан проблем, які існують на теперішній момент стосовно впливу неоднорідних дефектів на магнітні властивості матеріалів, відображений у першій частині наведеної роботи. Велика кількість робіт присвячена опису ефектів в магнітних матеріалах без центра інверсії, проте для всіх масивних матеріалів ефекти слабкі. Тому увагу привернули порушення симетрії інверсії в якості неоднорідних інтерфейсів, дефектних шарів на поверхні. В заданій тематиці багато важливих задач ще не вирішено. Одна з таких - це урахування впливу межі розділу, в якій порушується симетрія інверсії. Крім того, аналіз робіт про перспективність поєднання переваг магнітики з фононікою в нанoeлектроніці дає запит на дослідження методів збу-

дження спінових хвиль в тонких плівках поверхневими акустичними хвилями і вирішення проблеми швидкого демпфування спінових хвиль за рахунок магнітоакустичних пристроїв.

Частина друга присвячена вивченню поведінки спінових хвиль в системі двох феромагнетиків на межі яких порушена симетрія інверсії просторової осі. На основі теоретичної моделі, що враховує вплив порушення симетрії типу інверсії просторових осей на межі між двома феромагнетиками скінченної товщини на збудження спінових хвиль, отримано додаткову умову до закону дисперсії, що модифікує дискретний спектр дозволених частот. Встановлено, що значення параметра порушення симетрії пропорційно значенню обмінної константи в тонкому неоднорідному шарі границі між матеріалами та зворотно пропорційно товщині межі між феромагнетиками. З'ясовано умови посилення впливу параметра порушення симетрії інверсії на границі двох феромагнетиків на зміни значення коефіцієнта проходження чи відбиття спінової хвилі від границі та зміни значення і знака фазового зсуву між фазами спінової хвилі, що пройшла та що падає. Таким чином, параметр порушення симетрії є додатковим фактором управління фазовим зсувом. Встановлено, що ефект невзаємності виникає при розповсюдженні спінової хвилі в системі двох однакових феромагнетиків в результаті порушення симетрії інверсії просторової осі на границі між ними. Визначено, що величина параметра порушення симетрії інверсії на межі між двома феромагнітними матеріалами може виступати методом керування кутом нелінійної спінової хвилі (кут відхилення намагніченості від основного стану) в другому матеріалі при збудженні лінійної спінової хвилі в першому.

У частині третій здійснено теоретичне моделювання збудження

об'ємних спінових хвиль у феромагнітній системі поверхневою акустичною хвилею Косевича в планарному дефектному шарі. На основі теоретичної моделі визначено умови для збудження максимальної амплітуди магнітних збуджень.

В четвертому розділі теоретично досліджено клас магніто-акустичних пристроїв, у яких сигнал передається акустичними хвилями, тоді як магнітне поле керує його поширенням через магнітопружні взаємодії в тонких ізольованих магнітних включеннях. Визначено, що змінюючи прикладене магнітне поле, можна змінити резонансну частоту, при якій падаючі акустичні хвилі гібридизуються з магнітними режимами включень. Показано, що частотна залежність коефіцієнта відбиття хвиль від включень має фаноподібну лінійну форму, яка особливо чутлива до магнітного демпфування. Показано, що метаматеріальний підхід, який полягає у розгляді акустичної хвилі в періодичному масиві, утвореному тонкими магнітними шарами в немагнітній матриці, справді корисний для магнітоакустики. Встановлено, що гібридні метаматеріали, утворені 1D масивами резонаторів, збільшують вплив магнітопружного зв'язку та зменшують магнітні втрати при загасанні Гілберта. Розглянуті структури регулюються застосованим полем зміщення і демонструють багату і складну поведінку, таку як індукована передача та асиметрія Боррмана. Припускається, що характеристики, показані тут, виявляться корисними при створенні датчиків, пускачів та радіочастотних модуляторів.

Ключові слова: спінові хвилі, акустичні хвилі, феромагнетик, граничні умови, симетрія інверсії, магнітопружна взаємодія.

Список опублікованих праць, що відображають основні наукові результати дисертації:

1. O. S. Latcham, Y. I. Gusieva, A. V. Shytov, O. Y. Gorobets, and V. V. Kruglyak, "Controlling acoustic waves using magneto-elastic Fano resonances," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 115, no. 8, 2019, doi: 10.1063/1.5115387.
2. Y. Gusieva, P. Graczyk, O. Gorobets, and M. Krawczyk, "Excitation of bulk spin waves by acoustic wave at the plane defect of a ferromagnet," in *Acta Physica Polonica A*, 2018, vol. 133, no. 3, doi: 10.12693/APhysPolA.133.489.
3. O. S. Latcham, Y. I. Gusieva, A. V. Shytov, O. Y. Gorobets, and V. V. Kruglyak, "Hybrid magnetoacoustic metamaterials for ultrasound control," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 117, no. 10, 2020, doi: 10.1063/5.0018801.
4. Y. Gusieva and O. Gorobets, "Nonlinear spin wave excitation at the interface between two ferromagnets with broken spatial inversion symmetry," in 2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2017 - Proceedings, 2017, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100333.

Публікації у збірниках матеріалів конференції:

1. Gorobets Y., Gorobets O., Guseva Y. Estimation of the value of energy of broken spatial inversion symmetry at the interface between two ferromagnets. VII Young Scientists Conference Problems of Theoretical Physics , Kyev, Ukraine, 13-15 December 2016.
2. Gusieva Y., Graczyk P. , Gorobets O. and Krawczyk M. Excitation of the interface spin waves using acoustic Kosevich wave . IEEE International Magnetism Conference, INTERMAG Europe 2017, Dublin, Ireland, from April 24th to April 28th, 2017.

3. Gusieva Y., Gorobets O. Nonlinear spin wave excitation at the interface between two ferromagnets with broken spatial inversion symmetry. Presenting the paper in IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), May 29 – June 2, 2017.
4. Gusieva Y., Gorobets O. Excitation of nonlinear spin wave in the system of two ferromagnets with broken spatial inversion symmetry inside the interface. International conference on Magnetism and Spintronics (SolSkyMag 2017), San Sebastian, Spain, June 19-23, 2012.
5. Gusieva Y., Graczyk P., Gorobets O., and Krawczyk M. Excitation of bulk spin waves by acoustic wave at the plane defect of a ferromagnet. The European Conference Physics of Magnetism 2017 (PM'17), Poznan, Poland, June 26-30, 2017.
6. Gusieva Y., Rychły J., Gruszecki P., Krawczyk M., Gorobets O. and Gorobets Y. Spin-waves transmission through the interface with broken spatial inversion symmetry. The European Conference Physics of Magnetism 2017 (PM'17), Poznan, Poland, June 26-30, 2017.
7. Gusieva Y., Graczyk P., Gorobets O. and Krawczyk M. Forced magnetic oscillations and excitation of bulk spin waves by acoustic wave at the plane defect of a ferromagnet. Workshop Magic2017, Trzebaw, Poland, July 2-7, 2017.
8. Y. Gusieva, O. Latcham, A. V. Shytov, O. Y. Gorobets, V. V. Kruglyak Scattering of Acoustic Waves from 1D Arrays of Magnetic Inclusions, 2019 Joint MMM-INTERMAG, January 14-18, 2019 Washington, DC

9. Y. Gusieva, O. Gorobets, Y. Gorobets, Propagation of spin wave in magnonic crystal with interface of asymmetrical properties, 2018 IEEE International Conference on Microwave Magnetism , ICMM-2018, Exeter, UK.
10. Y. Gusieva, O. Gorobets, Y. Gorobets, Phase shift of spin waves traveling through the interface with asymmetrical properties, “3rd International Advanced School on Magnonics2018”, September 17-21, 2018, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"(KPI), Kyiv, Ukraine
11. Y. Gusieva, O. Gorobets, Y. Gorobets, The influence of broken spatial inversion symmetry inside interface on the phase shift of spin waves in magnonic crystals, 6th International Conference “Nanotechnologies and Nanomaterials” Nano-2018, August 27-30, Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine.
12. Yu.I. Gorobets, O.Yu. Gorobets, Yu.I. Guseva Nonlinear spin wave excitation at the interface between two ferromagnets with broken spatial inversion symmetry, Poster presentation at the JEMS (Glasgow, United Kingdom, 21-26 August, 2016).
13. Y. Gusieva, O. Gorobets, Y. Gorobets, Spin wave excitations in magnetic bilayers with inhomogeneous interface, International Research and Practice Conference “Nanotechnologies and Nanomaterials” Nano-2019, August 27-30, Lviv, Ukraine.

ABSTRACT

Gusieva Y.I. Spin and acoustic waves in the system with flat inhomogeneous defects. - Qualifying scientific paper accepted as monograph.

Dissertation for the degree of phd doctor on a specialty 104 - Physics and astronomy. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" and the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the research of the behavior of spin and acoustic waves in systems with inhomogeneities in which the broken inversion spatial axis symmetry and with magnetoelastic defects. In particular, the influence of the broken inversion spatial axis symmetry at the boundary of two ferromagnets on the propagation of spin waves, the model of excitation of bulk spin waves by Kosevich's acoustic wave and the influence of magnetic inclusions in the elastic system on the propagation of acoustic waves are considered.

The current state of the problems that currently exist regarding the influence of inhomogeneous defects on the magnetic properties of materials is reflected in the first part of this paper. A large number of works are devoted to the description of effects in magnetic materials without an inversion center, but for all massive materials the effects are weak. Therefore, attention was drawn to the broken inversion symmetry in inhomogeneous interfaces and in defect layers on the surface. In a given topic, many important problems have not yet been solved, one of which is to take into account the influence of the boundary interface in which the symmetry of inversion is broken. In addition, the analysis of the prospects of combining the advantages of magnonics with phononics in nanoelectronics gives a request to study methods for excitation of spin

waves in thin films by surface acoustic waves and to solve the problem of rapid damping of spin waves due to magnetoacoustic devices.

Part two is devoted to the study of the behavior of spin waves in a system of two ferromagnets on the boundary of which the symmetry of the inversion of the spatial axis is broken. Based on the theoretical model, which takes into account the effect of broken inversion spatial axis symmetry at the boundary between two ferromagnets of finite thickness on the excitation of spin waves, an additional condition to the dispersion law is obtained, which modifies a discrete spectrum of allowed frequencies. It is established that the value of the symmetry breaking parameter is proportional to the value of the exchange constant in the boundary layer between materials and inversely proportional to the thickness of the boundary between ferromagnets. It is found conditions for increasing the influence of the inversion symmetry breaking parameter at the boundary of two ferromagnets on a change in the value of the coefficient of transmission or reflection of the spin wave from the boundary and on the value and sign of the phase shift between the phases of the transmitted and the incident spin wave. Thus, the symmetry breaking parameter is an additional factor of phase shift control. It is established that the nonreciprocity effect occurs when the spin wave propagates in a system of two identical ferromagnets as a result of breaking the symmetry of the inversion of the spatial axis at the boundary between them. It is determined that the value of the inversion symmetry breaking parameter at the boundary between two ferromagnetic materials can be a method of controlling the angle of the nonlinear spin wave in the second material when the linear spin wave is excited in the first.

In the third part, the theoretical modeling of the excitation of bulk spin waves in a ferromagnetic system by a surface acoustic Kosevich wave

in a planar defective layer was carried out. On the basis of the theoretical model the conditions for excitation of the maximum amplitude of magnetic excitations were determined.

The fourth section theoretically investigated the class of energy-efficient magneto-elastic devices in which signals are carried by transverse acoustic waves while the bias magnetic field controls their scattering from a magneto-elastic slab. It is determined that by tuning the bias field, one can alter the resonant frequency at which the propagating acoustic waves hybridize with the magnetic modes. It is shown that the frequency dependence of the waves' reflection coefficient from the inclusions has a Fano-like lineshape, which is particularly sensitive to magnetic damping. It is shown that the metamaterial approach is to consider an acoustic wave in a periodic array of thin magnetic layers embedded in a nonmagnetic matrix is really useful for magnetoacoustics. Hybrid metamaterials, formed by 1D arrays of resonators, magnify the effect of magnetoelastic coupling upon the acoustic scattering, thereby mitigating the Gilbert damping to tolerable levels. The considered structures are regulated by the applied displacement field and demonstrate rich and complex behavior, such as induced transmission and Bragg asymmetry. It is assumed that the characteristics shown here will be useful in the creation of sensors, starters, radio frequency modulators and tunable magnetic devices.

Key words: spin waves, acoustic waves, ferromagnetic, boundary conditions, inversion symmetry, magnetoelastic interaction.