

**Поширення спінових хвиль в неоднорідних модульованих ферромагнітних структурах зі складними інтерфейсами**

**Распространение спиновых волн в неоднородных модулированных ферромагнитных структурах со сложными интерфейсами**

**Spin wave propagation in heterogeneous modulated ferromagnetic structures with complex interfaces**

**1. Номер державної реєстрації: 0115U000370.**

**2. Науковий керівник: (вчений ступінь, звання) д. ф.-м.н., проф. Решетняк С.О., Решетняк С.А., Reshetniak Serhii O.**

**3. Суть розробки, основні результати.**

**(укр.)**

Створено теорію відбивання спінових хвиль від періодичних модульованих ферромагнітних структур зі складними інтерфейсами з урахуванням узагальнених граничних умов, які враховують неоднорідний характер меж контакту двох однорідних середовищ, сформованих внаслідок накладання кристалічних ґраток двох контактуючих середовищ з урахуванням обмінної взаємодії як в межах кожної з таких підґраток, так і між магнітними моментами ґраток що накладаються. Враховано неоднорідний характер анізотропії та обмінної взаємодії всередині інтерфейсів, а також ефекти, пов'язані з порушенням симетрії інверсії. Окремі шари мультишарової структури можуть характеризуватися різними значеннями параметрів обмінної взаємодії, одноісної анізотропії та намагніченості насичення. Теорію розроблено з урахуванням моделі суцільного середовища в обмінному наближенні, яке відповідає високочастотній області спектру спінових хвиль. Отримано польові, частотні та матеріальні залежності коефіцієнта відбиття об'ємних спінових хвиль від магнетонного кристалу з інтерфейсами узагальненого вигляду. Враховано вплив зовнішнього однорідного магнітного поля, зміна величини якого слугуватиме ефективним засобом керування відбивальними характеристиками мультишарових ферромагнітних середовищ, в яких відбувається розсіяння спінових хвиль. Зокрема, без зміни матеріальних параметрів середовища для обраної частоти спінової хвилі можна досягти зміни інтенсивності відбитої хвилі практично від нуля до одиниці за рахунок зміни тільки величини зовнішнього однорідного постійного магнітного поля. Показано, що подібні магнетонні кристали можуть бути використані в якості ефективних багатосмугових спін-хвильових фільтрів з керованими зонами фільтрації.

**(рос.)**

Создана теория отражения спиновых волн от периодических модулированных ферромагнитных структур со сложными интерфейсами с учетом обобщенных граничных условий, учитывающих неоднородный характер границ контакта двух однородных сред, сформированных в результате наложения кристаллических решеток двух контактирующих сред с учетом обменного взаимодействия как в рамках каждой из таких подрешеток, так и между магнитными моментами налагаемых решеток. Учтен неоднородный характер анизотропии и обменного взаимодействия внутри интерфейсов, а также эффекты, связанные с нарушением симметрии инверсии. Отдельные слои многослойной структуры могут характеризоваться различными значениями параметров обменного взаимодействия, одноосной анизотропии и намагнитченности насыщения. Теория разработана на основе модели сплошной среды в обменном приближении, которое соответствует высокочастотной области спектра спиновых волн. Получены полевые, частотные и материальные зависимости коэффициента отражения объемных спиновых волн от магнетонного кристалла с интерфейсами обобщенного вида. Учтено влияние внешнего однородного магнитного поля, изменение величины которого может служить эффективным средством управления отражательными характеристиками многослойных

ферромагнитных сред, в которых происходит рассеяние спиновых волн. В частности, без изменения материальных параметров среды для выбранной частоты спиновой волны можно достичь изменения интенсивности отраженной волны практически от нуля до единицы за счет изменения только величины внешнего однородного постоянного магнитного поля. Показано, что подобные магнетонных кристаллы могут быть использованы в качестве эффективных многополосных спин-волновых фильтров с управляемыми зонами фильтрации.

(англ.)

A theory is developed for the reflection of spin waves from periodic modulated ferromagnetic structures with complex interfaces, taking into account the generalized boundary conditions including the inhomogeneous character of the contact boundaries of two homogeneous media formed as a result of the superposition of crystal lattices of two contacting media, taking into account the exchange interaction both within each of such sublattices and between the magnetic moments of the imposed lattices. The inhomogeneous character of anisotropy and exchange interaction inside the interfaces is taken into account, as well as the effects associated with the violation of inversion symmetry. Separate layers of the multilayer structure can be characterized by different values of the parameters of exchange interaction, uniaxial anisotropy, and saturation magnetization. The theory is developed on the basis of the model of a continuous medium in the exchange mode that corresponds to the high-frequency region of the spectrum of spin waves. Field, frequency and material dependences of the reflection coefficient of bulk spin waves from a magnonic crystal with interfaces of a generalized form are obtained. The influence of an external homogeneous magnetic field is considered. The change in its magnitude can serve as an effective means of controlling the reflective characteristics of multilayer ferromagnetic media in which spin-wave scattering occurs. In particular, without changing the material parameters of the medium for the chosen frequency of the spin wave, it is possible to achieve a change in the intensity of the reflected wave from zero to one due to a change in the magnitude of the external uniform permanent magnetic field. It is shown that similar magnonic crystals can be used as effective multiband spin-wave filter with controlled filtering zones.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.**

1. Патент України №114105. Пристрій для очищення води / Крупа М.М., Дейна О.А., Коваленко Н.О., Скирта Ю.Б., Шарай І.В.– Оpubл. 10.06. 2016, бюл. №11, публікація відомостей про видачу патенту 25.04.2017, бюл. №8.
2. Патент України на корисну модель № 114299, МПК (2006.01) C02F 1/48. Спосіб отримання магнітокерованого біосорбенту / Горобець С.В., Горобець О.Ю., КиричокЛ.В., Ковальов О.В. – № u201607800; Заявл. 15.07.2016; Оpubл. 10.03.2017, бюл. № 5.
3. Патент України на корисну модель № 115249, МПК (2006.01) C02F 33/483. Спосіб оцінки чутливості клітин раку молочної залози до дії доксорубіцину/ Горобець О.Ю., Чехун В.Ф., Горобець С.В. Медведєв О.В., Лук'янова Н.Ю.– № a201504848; Заявк. 18.05.2015; Оpubл. 10.10.2017, бюл. № 19.

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Запропоновано узагальнення граничних умов типу Барнаса-Міллса в двох аспектах. По-перше, автори додали в граничні умови ефекти, пов'язані з порушенням симетрії інверсії, а по-друге, автори розглянули модель, в якій границя залишається скінченно тонкою. В такому випадку граничні умови змінюються, оскільки включатимуть доданки антисиметричного обмінного зв'язку, які призводять до сильних неколінеарних магнітних конфігурацій у нецентросиметричному магнітному матеріалі. Розглядаючи два альтернативні методи наближення, отримано відповідні граничні умови, відповідність між якими така ж, як і відповідність між граничними умовами Хофмана, що об'єднують розв'язки рівнянь, визначені на скінченній відстані між двома однорідними

середовищами, і граничними умовами Барнаса-Міллса, що об'єднують розв'язки в одній точці. Показано, що вплив параметрів нелокального обмінного зв'язку в інтерфейсі та асиметричної обмінної взаємодії конкурує з впливом параметру обміну, домінуючого у випадку інтерфейсу типу «плоский дефект», і може призводити до суттєвої зміни спектру спінових хвиль в мультишаровій структурі.

Більше того, введені граничні умови пропонуються використовувати не лише для процесів, пов'язаних з динамікою лінійних спінових хвиль, а також для теорії нелінійних спінових хвиль. Не зважаючи на те, що обговорення в роботі спрямовано на обмінні спінові хвилі, подібний підхід отримання граничних умов також можна застосувати до теорії магнітостатичних, диполь-обмінних, або навіть запізвених спінових хвиль. Відзначимо також, що отримані граничні умови можна застосувати для розрахунку статичних неоднорідних мікромагнітних конфігурацій (наприклад, магнітні доменні стінки біля границі між матеріалами).

Отримані нові граничні умови дозволили розширити перелік засобів впливу та керування процесами поширення спінових хвиль в мультишарових феромагнетиках.

Отже, отримані результати розширюють можливості сучасної науки в плані врахування характеристик магнітних інтерфейсів скінченої товщини на межах середовищ на поведінку спінових хвиль в магнетних кристалах, що відповідає світовому рівню досліджень в галузі фізики магнітних явищ.

## **6. Економічна привабливість для просування на ринок.**

Застосування результатів дослідження в приладах спін хвильової електроніки дасть можливість розробки нових приладів типу датчиків, фільтрів і т.п., дія яких заснована на поширенні обмінних спінових хвиль. Завдяки високим частотам спінових хвиль, застосування подібних приладів призведе до подальшої мініатюризації елементної бази мікроелектроніки.

## **7. Потенційні користувачі**

Результати досліджень можуть бути корисними для застосування в магнітній мікро- та наноелектроніці, магнетоніці та спінхвильовій електроніці.

## **8. Стан готовності розробки.**

Проведені комплексні теоретичні дослідження модельних процесів, що мають місце при поширенні спінових хвиль в досліджених магнітних структурах. Проаналізовані основні характеристики багатосмугових спін-хвильових фільтрів, які можуть бути розроблені на основі отриманих результатів досліджень.

## **9. Існуючі результати впровадження.**

За результатами НДР розроблено і впроваджено новий лекційний курс «Властивості мультишарових феромагнітних систем» дисципліни «Фізика магнітних явищ» для магістрів фізико-математичного факультету та розділ «Магнетонні кристали» дисципліни «Магнетизм» для аспірантів фізико-математичного факультету. Захищено 2 кандидатські дисертації; підготовлено до захисту 1 докторську дисертацію, видано 1 підручник, 3 навчальні посібники; опубліковано: 26 статей у журналах, що входять до міжнародних наукометричних БД, з них 18 – у закордонних виданнях; 15 статей у фахових українських виданнях, зроблено 43 доповіді на міжнародних конференціях та 4 доповіді на всеукраїнських; одержано 3 патенти України. Захищено 11 магістерських робіт та 5 дипломних робіт спеціаліста. За участю студентів опубліковано 3 статті в фахових виданнях та зроблено 2 доповіді на міжнародній конференціях.

## **10. Форма участі інвестора**

На договірних засадах.

## 11. Обсяг інвестицій

На договірних засадах.

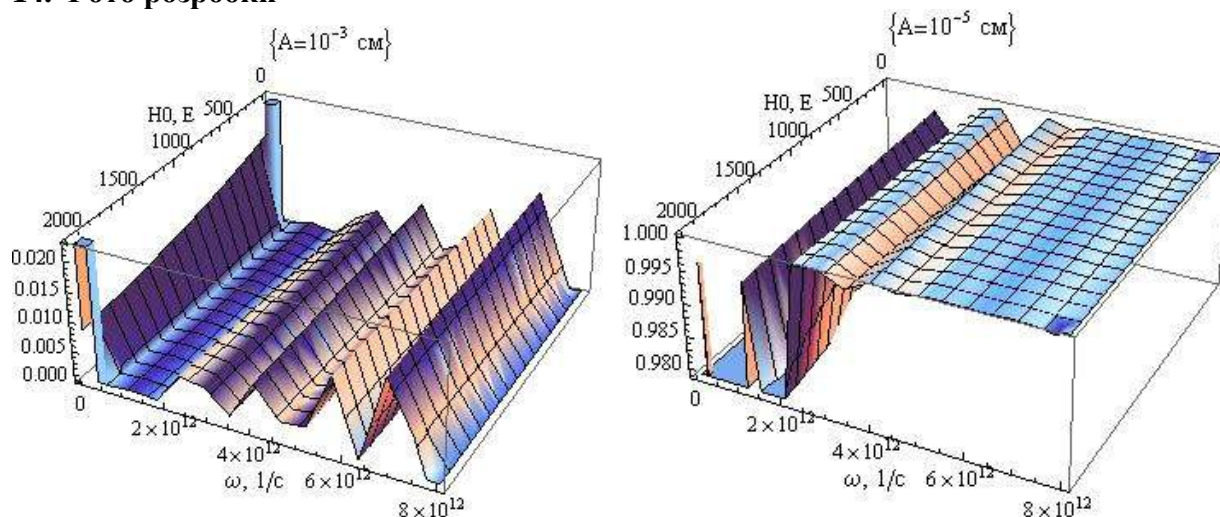
## 12. Мета інвестицій

Створення експериментальної лабораторії.

## 13. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, фізико-математичний факультет, кафедра загальної та експериментальної фізики, (044) 204-82-48, [fmf\\_kzef@kpi.ua](mailto:fmf_kzef@kpi.ua)

## 14. Фото розробки



Залежності інтенсивностей відбиття спінових хвиль  $|\rho|^2$  від частоти та зовнішнього магнітного поля для мультишарової структури зі складними інтерфейсами.

## 15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання

1. Ю.І. Горобець, О.Ю. Горобець, А.М. Кучко, С.О. Решетняк, А.М. Красіко, М.Г. Мусієнко, Т.М. Ніколаєва, П.О. Юрачківський, Л.Г. Лосицька. Фізика. Механіка. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 190 с.
2. O.Yu. Gorobets, Yu.I. Gorobets, V.P. Rospotniuk, A.A. Kyba, Yu.A. Legenkiy. Liquid-liquid phase separation occurring under the influence of inhomogeneous magnetic field in the process of the metal deposition and etching of the magnetized ferromagnetic ball / Journal Solid State Electrochem, 2015, Vol. 19 (10).
3. O.Yu. Gorobets, Yu.I. Gorobets, V.P. Rospotniuk. Magnetophoretic potential at the movement of cluster products of electrochemical reactions in an inhomogeneous magnetic field / Journal of Applied Physics 118, 073902 (2015).
4. O.Yu. Gorobets, Yu.I. Gorobets. Statistical characteristics of trajectories of diamagnetic unicellular organisms in a magnetic field / Progress in biophysics and molecular biology, 2015, V. 117 (1).
5. S.V. Gorobets, O.Yu. Gorobets, O.V. Kovalyov, A.V. Sopina, Yu.M. Chyzh, S.V. Cherepov. Fractal dimension and magnetic susceptibility of magnetically labelled biosorbent based on Saccharomyces cerevisiae yeast / Functional materials, 2015, Vol. 22, № 2.
6. Gorobets Yu.I., Kulish V.V., Spin waves in a ferromagnetic nanotube with an elliptic cross-section in the presence of a spin-polarized current. // Open Physics. – 2015. – 13:263–271.
7. Yu.I. Gorobets, O.Yu. Gorobets, A.A. Kyba, Yu.A. Legenkiy. Phase Separation of an Electrolyte during Etching and Sedimentation of Metals on a Surface of a Ferromagnetic Metal Ball in an External Magnetic Field / Journal of Materials Science and Engineering A, 2015, 5 (3-4)
8. M.M. Krupa. Magnetic field sensors based on the foil of amorphous cobalt alloy and NiMnGa martensite single-crystals. Yu.B. Skirta, I.V. Gerasimchuk, I.V. Sharay // Sensors

- and Actuators A: Physical V.264, №1 September 2017, P. 165-171.
9. O.Yu. Gorobets, Yu.I. Gorobets, V.P. Rospotniuk, V.I. Grebinaha, A.A. Kyba. Liquid-liquid phase separation of an electrolyte at metals deposition on the surface of a steel plate under the influence of two-domain magnetic system. // *Journal of Molecular Liquids*. – Vol. 235 – P. 163-171. – 2017.
  10. P. Gruszecki, M. Mailyan, O. Gorobets, M. Krawczyk. Goos-Hänchen shift of a spin-wave beam transmitted through anisotropic interface between two ferromagnets. // *Physical Review B*. – Vol. 95, 014421. – DOI: 10.1103/PhysRevB.95.014421. – 2017.
  11. Yu.I. Gorobets, O.Yu. Gorobets, V.V. Kulish. Spin waves in a two-sublattice antiferromagnet. A self-similar solution of the Landau-Lifshitz equation. // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. – V. 42, P. 52–61. – 2017.
  12. V.V. Kruglyak, C.S. Davies, V.S. Tkachenko, O.Y. Gorobets, Y.I. Gorobets, A.N.Kuchko. Formation of the band spectrum of spin waves in 1D magnonic crystals with different types of interfacial boundary conditions // *Journal of Physics D: Applied Physics*, volume 50, no. 9, pages 094003-094003, DOI:10.1088/1361-6463/aa536c. – 2017.
  13. M. Mailyan, O.Y. Gorobets, Y.I. Gorobets, M. Zelent, M. Krawczyk. Control of the spin wave phase in transmission through the ultrathin interface between exchange coupled ferromagnetic materials // Accepted for publication in *Acta Physica Polonica A*.
  14. O. Gorobets, S. Gorobets, M. Koralewski. Physiological origin of biogenic magnetic nanoparticles in health and disease: from bacteria to humans // *International Journal of Nanomedicine*. – Vol. 12. – P. 4371—4395. – 2017.
  15. Y. Gusieva, P. Graczyk, O. Gorobets, M. Krawczyk. Excitation of bulk spin waves by acoustic wave at the plane defect of a ferromagnet // Accepted for publication in *Acta Physica Polonica A*.
  16. M. Mailyan, P. Gruszecki, O. Gorobets, and M. Krawczyk. Goos-Hänchen shift of a spin-wave beam at the interface between two ferromagnets // *IEEE Transactions on Magnetics*. – Vol. PP, Issue: 99. – 2017. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2696581.
  17. O. Yu. Gorobets<sup>1</sup>, Yu. I. Gorobets, V. P. Rospotniuk, V. I. Grebinaha, A. A. Kyba. Liquid-liquid phase separation and cluster formation at deposition of metals under inhomogeneous magnetic field // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 903 (2017) 012057* doi: 10.1088/1742-6596/903/1/012057.
  18. O. Medvediev, O. Yu. Gorobets, S. V. Gorobets, V. S. Yadrykhins'ky. The prediction of biogenic magnetic nanoparticles biomineralization in human tissues and organs // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 903 (2017) 012002* doi :10.1088/1742-6596/903/1/012002.
  19. S. Gorobets, o. Gorobets, V. Golub, M. Gromnadska. Ferromagnetic resonance in the ethmoid bones of salmon and silver carp // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 903 (2017) 012001* doi :10.1088/1742-6596/903/1/012001.
  20. Горобець Ю.І., Куліш В.В. Спінові коливання у ферромагнітній нанооболонці типу «нанорис» // *Металофізика та новітні технології*. – 2014. - №8. – с.1023-1033.
  21. Куліш В.В. Спінові хвилі у ферромагнітній плівці з періодичною системою антиточок // *Журнал нано- та електронної фізики*. – 2015. – т.7, №1. – 01020 (5с).
  22. Горобець Ю.І., Куліш В.В., Дипольно-обменные спиновые волны в нанотрубке из одноосного ферромагнетика типов «легкая плоскость» и «легкая ось» // *Low Temperature Physics // Физика низких температур*, 2015, т. 41, № 7, с. 664–670
  23. V.V. Kulish, O.Yu. Gorobets, Energy method of finding distribution constants of an antiferromagnetic vector for an antidot system in a two-sublattice antiferromagnet // *Journal of nano- and electronic physics*, Vol. 7 No 2, 02027(9pp) (2015).
  24. В.В. Куліш, Спінові хвилі у ферромагнітній нанотрубці. Урахування дисипації та спінополяризованого струму. // *Український фізичний журнал* – 2016 – Т. 61, № 1 – с. 61-67.
  25. В.В. Куліш. Спінові збудження у дисипативних ферромагнітних нанооболонках // *Журнал нано- та електронної фізики* – 2016 – Т.8, № 3 – 03050(4с).
  26. Ю.І. Горобець, О.Ю. Горобець. Сингулярная оптика спиновых волн в

- двухподрешеточном антиферромагнетике с одноосной магнитной анизотропией // Low Temperature Physics/Физика низких температур. – т. 43, № 5. – 2017.
27. Н.Н. Крупа. Фазовые превращения и магнитное состояние в наноразмерном металлооксидном соединении  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6\text{-}\delta$ . Н. А. Каланда, М.В. Ярмолич, С.Е. Демьянов, М.В. Силибин, И.В. Шарай // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – т. 39. – № 1. – с. 11—32.
28. С.О. Решетняк, С.В. Ковальчук. Частотні характеристики коефіцієнтів відбиття і заломлення об'ємних спінових хвиль у спіновій лінзі з неідеальними інтерфейсами // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – № 4. – С.107-115.
29. С.О. Решетняк, А.В. Лисак. Частотні залежності коефіцієнта відбивання обмінних спінових хвиль від одновимірного магнонного кристала зі складними інтерфейсами // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2017. – № 4. – С. 93-101.

**16. Ключові слова:** спінові хвилі, граничні умови, мультишарова структура, амплітуда відбиття, магнітне поле, частота, анізотропія, обмінна взаємодія.