

Спектральні характеристики магнітовпорядкованих низькорозмірних нано- та мікрооб'єктів в обмінному наближенні

Спектральные характеристики магнитоупорядоченных низкоразмерных нано- и микрообъектов в обменном приближении

Spectral characteristics of magnetically ordered low-dimensional nano- and micro-objects in the exchange mode

- 1. Номер державної реєстрації теми - 0112U001136, НТУУ «КПІ» - 2504-ф.**
- 2. Науковий керівник - д.ф.-м.н., проф. Горобець Ю.І., Горобець Ю.И., Gorobets Yuri I.**
- 3. Суть розробки, основні результати.**

(укр.)

Побудовано теорію поширення спінових хвиль у двопідгратковому антиферромагнетикі з одноосьовою магнітною анізотропією та в ферромагнітних наносистемах у формі сферичної нанооболонки, нанооболонки у формі еліпсоїду обертання («нанорис»), циліндричної нанотрубки кругового (круговий циліндр) та еліптичного (еліптичний циліндр) перерізу, а також для довільної ферромагнітної наносистеми з трансляційною симетрією. Знайдено рівняння для магнітного потенціалу цих хвиль у відповідних наносистемах у магнітостатичному наближенні з урахуванням обмінної взаємодії, магнітної диполь-диспольної взаємодії, ефектів магнітної анізотропії та дисипації. Отримані розв'язки рівняння, дисперсійні співвідношення для таких наносистем, а також спектр хвильових чисел для деяких наносистем. Розглянуто одноосьові ферромагнітні наносистеми як типу «легка вісь», так і типу «легка площина». Досліджено вплив спин-поляризованого струму на спінові хвилі у таких наносистемах. Отримано тривимірні нелінійні розв'язки рівняння Ландау-Ліфшиця для спінових хвиль для обох типів одноосьового антиферромагнетика – як «легка вісь», так і «легка площина».

Розроблено новий метод керування напрямками та інтенсивністю поширення обмінних спінових хвиль шляхом їх керованого заломлення в неоднорідних ферромагнітних структурах типу спінових лінз. Наведені умови, за яких спінова лінза може бути двофокусною завдяки наявності ефекту двопроменезаломлення. Отримані характеристики польових і частотних залежностей показників заломлення відповідних гілок спінових хвиль та фокусних відстаней спінових лінз, створених на основі двохосьових ферромагнетиків у зовнішньому постійному однорідному магнітному полі. Показано можливість регулювання прозорості подібних неоднорідностей, що дозволяє використовувати їх і як лінзи, і як дзеркала в залежності від величини зовнішнього поля та частоти хвилі. Це особливість дає змогу використовувати структури з подібною межею як високочутливі датчики зміни характеристик магнітних середовищ або зовнішніх умов, в яких вони знаходяться. Також показано, що подібні процеси можуть бути причиною генерації нелінійних спінових збуджень, зокрема спінових солітонів.

(рос.)

Построена теория распространения спиновых волн в двухподрешеточных антиферромагнетиках с одноосной магнитной анизотропией и в ферромагнитных наносистемах в форме сферической нанооболочки, нанооболочки в форме эллипсоида вращения («нанорис»), цилиндрической нанотрубки кругового (круговой цилиндр) и эллиптического (эллиптический цилиндр) сечения, а также для произвольной ферромагнитной наносистемы с трансляционной симметрией. Найдено уравнение для магнитного потенциала этих волн в соответствующих наносистемах в магнитостатическом приближении с учетом обменного взаимодействия, магнитного диполь-диспольного взаимодействия, эффектов магнитной анизотропии и диссипации. Получены решения уравнения, дисперсионные соотношения для таких наносистем, а также спектр волновых чисел для некоторых наносистем. Рассмотрены одноосные ферромагнитные наносистемы как типа «легкая ось», так и типа «легкая плоскость». Исследовано влияние спин-поляризованного тока на спиновые волны в таких наносистемах. Получено трехмерные нелинейные решения уравнения Ландау-Лифшица

для спиновых волн для обоих типов одноосного антиферромагнетика - как «легкая ось», так и «легкая плоскость».

Разработан новый метод управления направлениями и интенсивностью распространения обменных спиновых волн путем их контролируемого преломления в неоднородных ферромагнитных структурах типа спиновых линз. Приведенные условия, при которых спиновая линза может быть двухфокусной благодаря наличию эффекта двулучепреломления. Получены характеристики полевых и частотных зависимостей показателей преломления соответствующих ветвей спиновых волн и фокусных расстояний спиновых линз, созданных на основе двухосных ферромагнетиков во внешнем постоянном магнитном поле. Показана возможность регулирования прозрачности подобных неоднородностей, что позволяет использовать их и как линзы, и как зеркала в зависимости от величины внешнего поля и частоты волны. Эта особенность позволяет использовать структуры с подобной чертой как высокочувствительные датчики изменения характеристик магнитных сред или внешних условий, в которых они находятся. Также показано, что подобные процессы могут быть причиной генерации нелинейных спиновых возбуждений, в частности спиновых солитонов.

(англ.)

The theory was developed of propagation of spin waves in two-sublattice antiferromagnet with uniaxial magnetic anisotropy and ferromagnetic nano-shaped spherical nanoshell, nanoshell of an ellipsoid of rotation form ("nanorise"), cylindrical nanotubes of circular (circular cylinder) and elliptical (elliptical cylinder) section and for arbitrary ferromagnetic nanosystems with transmitting symmetry. Equations were found for the magnetic potential of these waves in the corresponding nanosystems in magnetostatic approximation based on exchange interaction, magnetic dipole-dipole interaction effects of magnetic anisotropy and dissipation. The resulting solution of the equation, the dispersion relation for these nanosystems and range of wave numbers for some nanosystems were found. Uniaxial ferromagnetic nanosystems were considered as a type of "easy axis", and a type of "easy plane". The influence of spin-polarized current on spin waves in such nanosystems was studied. We obtain three-dimensional solutions of nonlinear Landau-Lifshitz equation for spin waves for both types of uniaxial antiferromagnet - as "easy axis" and "easy plane".

A new method was developed to control directions of propagation and intensity of exchange spin waves guided by their refraction in non-uniform ferromagnetic structures of the type of spin lenses. These conditions were defined under which spin lens may be two-focus due to the presence of birefringence effect. The characteristics were obtained of the field and frequency dependences of the refractive indices of corresponding branches of spin waves and focal length of spin lenses constructed from biaxial ferromagnet in an external constant homogeneous magnetic field. The possibility was shown to adjust the transparency of these irregularities, that allow them can be used as a lens and a mirror in dependence of the external field and the frequency of the wave. This feature allows one to use a similar structure as highly sensitive sensors of changes in the characteristics of magnetic media or external environment in which they are located. It's also shown that these processes can cause the generation of nonlinear spin excitations including spin solitons.

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

- С.В. Горобець, О.Ю. Горобець, І.В. Дем'яненко. Спосіб визначення місця локалізації магнітної фази в околі біомембрани клітин. Патент на корисну модель Кл. МПК (2006) B82Y 35/00, № u201209374, подано 31.07.2012, опубліковано 25.03.2013, бюл. №6.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Результати відповідають світовому рівню, а підходи до керування поширенням лінійних спинових хвиль та генерацією нелінійних спинових хвиль не мають аналогів у світовій практиці.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

Застосування результатів дослідження в приладах спіні 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 (галузі, міністерства, підприємства, організації). Результати досліджень можуть бути корисними для застосування в магнітній мікро- та наноелектроніці, магнітоніці та спінхвильовій електроніці, електрохімічній галузі.

8. Стан готовності розробки.

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

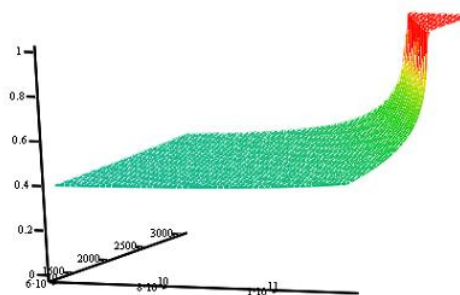
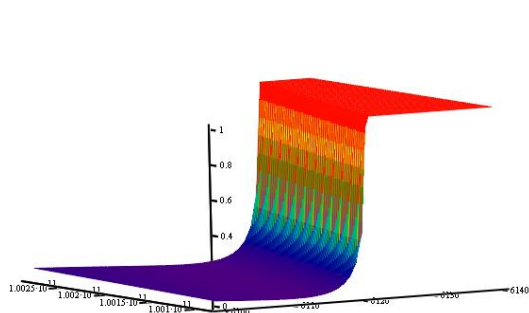
9. Існуючі результати впровадження.

За результатами роботи захищено 3 кандидатські дисертації за темами: «Фінітна динаміка руху частинки з власним магнітним моментом в осцилюючому неоднорідному магнітному полі», «Мікро- та наномасштабне структурування поверхні методом магнітоелектролізу і магнітокерованої корозії», «Надвисокочастотні властивості штучних магнітонних кристалів на основі ґраток магнітних нанoeлементів», підготовлено до захисту ще 1 кандидатську дисертації, видано 3 монографії (1 з них - в закордонному видавництві), 1 розділ в закордонній енциклопедії (Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, USA), 4 навчальних посібники з грифом НТУУ «КПІ», опубліковано 46 статей, зроблено 13 доповідей на конференціях (з них 12 – на міжнародних), отримано 2 патенти, студентами захищено 7 магістерських робіт і 4 дипломних роботи спеціалістів.

Результати роботи впроваджено в навчальний процес: запроваджено 1 новий розділ «Спінові хвилі в неоднорідних магнітних середовищах» дисципліни «Фізика магнітних явищ». Розроблено 1 лабораторну роботу «Вивчення властивостей напівпровідників за допомогою USB–осцилографа» з дисципліни «Вибрані питання фізики».

10. Назва організації, телефон, E-mail

НТУУ"КПІ", фізико-математичний факультет, кафедра загальної та експериментальної фізики,
406-82-48, fmf_kzef@kpi.ua



Залежності коефіцієнтів відбиття $|R^+|^2$ та $|R^-|^2$ для різних гілок спінової хвилі від частоти спінової хвилі та величини зовнішнього магнітного поля.

11. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. Ю.И. Горобец, С.А. Решетняк. Спинволновая оптика ферромагнитных сред. – Deutschland, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing. – 2014. – 120 p.

2. Ю.И. Горобец, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сирюк. Особенности доменных структур в феррит-гранатовых пленках с точкой компенсации и спиновой переориентации. – ДонНУ 2014г., Донецк. – 194 стр.
3. В.Г. Барьяхтар, Б.А. Иванов, В.Н. Криворучко, А.Г. Данилевич. Современные проблемы динамики намагниченности: от основы до сверхбыстрой релаксации. – К.: Химджест. – 2013. – 316 с.
4. O.Y. Gorobets, S.V. Gorobets, Y.I. Gorobets. Biogenic Magnetic Nanoparticles: Biomineralization in Prokaryotes and Eukaryotes // In Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, USA. – 2014. – 3, 300–306.
5. A.S. Berezhinskiy, S.A. Reshetniak. Refraction of spin waves by bifocal surface ferromagnetic lens // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2012. – Vol. 324, №2. – P. 231-234.
6. S. Reshetnyak, A. Berezhinsky. Reflection and refraction of bulk exchange spin wave on the interface of two ferromagnetic media in planar magnetic field // Global Journal of Science Frontier Research. – 2012. –V. 12, Issue 3. – P. 61-64.
7. Yu.I. Gorobets, S.O. Reshetnyak. Bulk Spin-Wave Filtration at the Interface of Two Uniaxial Ferromagnetic Media // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2012. – V. 4, № 2. – С. 02001-02003 (3pp).
8. R. Verba, G. Melkov, V. Tiberkevich, and A. Slavin Collective spin-wave excitations in a two-dimensional array of coupled magnetic nanodots // Phys. Rev. B. – 2012. – Vol. 85 - #014427 (14 pages).
9. R. Verba, G. Melkov, V. Tiberkevich, and A. Slavin Fast switching of a ground state of a reconfigurable array of magnetic nano-dots // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 100 - #192412 (3 pages).
10. Kulish V.V., Tomchuk P.M. One-electron optical properties of a nanorice with a nonconcentric core // Particle & Particle Systems Characterization. – 2012. – №29. – P. 238-252.
11. V. G. Bar'yakhtar, V. I. Butrim, A. K. Kolezhuk, B. A. Ivanov, «Dynamics and relaxation in spin nematics», Phys. Rev. B, V. 87, Is 22, 224407, 2013.
12. В. Г. Барьяхтар, В. И. Бутрим, Б. А. Иванов. Обменная релаксация как механизм сверхбыстрой переориентации спинов в ферритмагнетике с двумя подрешетками. – Письма в ЖЕТФ, Т 98, № 5, С. 327-331, 2013.
13. Y.I. Gorobets, V.V. Kulish, Dipole-exchange spin excitations in a thin ferromagnetic nanoshell, Central European Journal of Physics, 11(3), 2013, p.375-379.
14. Yu.I. Gorobets, O.Yu. Gorobets, I.A. Bondar, Yu.A. Legenkiy. Quasi-stationary heterogeneous states of electrolyte at electrodeposition and etching process in a gradient magnetic field of a magnetized ferromagnetic ball// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2013. – V. 330. – P. 76–80.
15. S.V. Gorobets, O.Yu. Gorobets, I.V. Demyanenko. Self-organization of magnetite nanoparticles in providing *Saccharomyces cerevisiae* yeasts with magnetic properties// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2013. – V. 337. – P. 53-57.
16. R. Verba, V. Tiberkevich, K. Guslienko, G. Melkov, and A. Slavin Theory of ground-state switching in an array of magnetic nanodots by application of a short external magnetic field pulse // Phys. Rev. B. – 2013. – Vol. 87 - #134419 (12 pages).
17. R. Verba, V. Tiberkevich, E. Bankowski, T. Meitzler, G. Melkov, and A. Slavin Conditions for the spin wave nonreciprocity in an array of dipolarly coupled magnetic nanopillars // Appl. Phys. Lett. – 2013. Vol. 103. – #082407 (5 pages).
18. R. Verba, V. Tiberkevich, E. Bankowski, T. Meitzler, G. Melkov, and A. Slavin Localized defect modes in a two-dimensional array of magnetic nanodots // IEEE Magn. Lett. – 2013. Vol. 4. – #4000404 (4 pages).

19. Reshetnyak S., Berezhinsky A. Reflection of surface spin waves from the interface of uniaxial and biaxial ferromagnets in a planar magnetic field // *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*. – 2014, Vol. 9. – p. 71-83.
20. V V Kruglyak, O Yu Gorobets, Yu I Gorobets and A N Kuchko. Magnetization boundary conditions at a ferromagnetic interface of finite thickness // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2014. – Vol.26. – P. 406001 (13 pp.)
21. R. Verba, V. Tiberkevich, I. Krivorotov, and A. Slavin Parametric excitation of spin waves by voltage-controlled magnetic anisotropy // *Phys. Rev. Appl.* – 2014. Vol. 1. – #044006 (6 pages).
22. О.Ю. Горобець, М.М. Потьомкін. Локалізація сферичної ферромагнітної мікрочастинки під дією швидко осцилюючого магнітного поля в потоці рідини // *Український фізичний журнал*. – 2012. – Т. 57, №9. – С. 915–919.
23. С.А. Решетняк, А.С. Бережинский. Влияние внешнего магнитного поля на параметры поверхностной двухфокусной спин-волновой ферромагнитной линзы // *Физика низких температур*. – 2012. – Т. 38, №2. – P.209-213.
24. С.А. Решетняк. Релаксация и преломление спиновых волн в многоподрешеточном антиферромагнетике типа CsCuCl₃ // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 323-332.
25. Ю.І. Горобець, О.Ю. Горобець, В. П. Роспотнюк. Електрорушійна сила при щавленні однорідно магнетованої крицевої кулі в електроліті // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2012. – Т. 34, № 7. – С. 895-906.
26. Ю.І. Горобець, О.Ю. Горобець, Ю.А. Легенький, І.А. Бондар. Гетерогенний стан електроліту при травленні сталеві кулі в магнітному полі // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2012. - №4. – С.143-147.
27. Verba R. Microwave properties of hexagonal arrays of magnetic nano-dots // *Вісник Київського університету. Радіофізика та електроніка*. – 2012. – вип. 17. – С. 29-32.
28. Ю.І. Горобець, С.О. Решетняк. Двопроменезаломлення та відбиття поверхневих спінових хвиль у двохосьових феродіелектриках // *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія: фізична «Ядра, частинки, поля»*. – 2012. – №991. – Вип. 1(53). – С. 4-13.
29. С.О. Решетняк, М.Ю. Настенко. Відбиття поверхневих спінових хвиль від межі одновісного та двохосьового ферромагнетиків в планарному магнітному полі // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2012. – № 4. – С.
30. С.В. Горобець, О.Ю. Горобець, О.К. Двойненко. Кореляція між розмірними характеристиками доменної структури та фігур травлення сталевого циліндру // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2012. – Т. 34, № 8.
31. Горобець Ю., Порев С., Федоров В. Питання трансформації університетів на засадах науково-технологічного підприємництва // *Теорія і методика професійної освіти*. – 2012. – №3. – 11с.
32. А.Д. Суханов, О.Н. Голубева, В.Г. Барьяхтар. Квантовомеханический аналог нулевого начала термодинамики (К проблеме инкорпорации термодинамики в квантовую теорию). – *Український Фізичний Журнал*. – 2013. – Т 58, № 8. – С. 789-798,.
33. Y.I. Gorobets, V.V. Kulish. Dipole-exchange spin waves in a periodically layered ferromagnetic nanotube // *Functional materials*. – 2013. – 20, №4 – P. 516-522.
34. Горобець Ю.І., Куліш В.В. Спінові хвилі у тонкій ферромагнітній оболонці: врахування ефектів дисипації // *Металофізика та новітні технології*. – 2013. – т. 35, № 10 – сс. 1001—1011.
35. Р. В. Верба Спінові хвилі у масивах магнітних наноточок, пов'язаних магніто дипольною взаємодією // *Укр. Фіз. Ж.* – 2013. – Т. 58. - № 8 – С. 759-769.

36. В. Г. Барьяхтар, А. Г. Данилевич. Феноменологическая теория релаксации намагниченности // Физика низких температур. – Т. 39, № 12. – С. 1279-1297, 2013.
37. Горобець Ю.І., Куліш В.В., Дипольно-обмінні спінові хвилі у феромагнітній нанотрубці // Український фізичний журнал. – 2014. – т.59, №5. – С. 544-549.
38. Куліш В.В., Спінові хвилі у довільній феромагнітній наносистемі з трансляційною симетрією. Нанотрубка кругового перерізу. Нанотрубка еліптичного перерізу // Журнал нано- та електронної фізики. – 2014. – т.6, №2. – 02021.
39. Gorobets Yu.I., Gorobets O.Yu., Kulish V.V., Distribution of the antiferromagnetic vector for a periodic system of remote circular antidots and a couple of circular antidots in an antiferromagnetic film // Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University Series : Physics and Mathematics Sciences. – 2013. – Vol. 26 (65), No 2. – P. 38-52.
40. Ю.І. Горобець, О.Ю. Горобець, В.П. Роспотнюк. Електрорушійна сила при травленні однорідно намагніченого сталевого циліндра в електроліті// Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – №1 (87). – С. 135-141.
41. S.V. Gorobets, Yu.I. Gorobets, O.Yu. Gorobets. Biomineralization of intracellular biogenic magnetic nanoparticles and their possible functions// Research Bulletin of NTUU "KPI". – 2013. – № 3. – P.28-33.
42. Куліш В.В. Спінові хвилі у феромагнітній нанооболонці. Врахування ефектів дисипації у короткохвильовому наближенні // Вісник Донецького національного університету. Сер. А: Природничі науки. – 2014. – №1. – с.124-128.
43. Горобець Ю.І., Горобець О.Ю., Куліш В.В., Розподіл вектора антиферромагнетизму для ізольованої антиточки та системи віддалених антиточок у антиферромагнетику // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2014. - №4(96). – с.113-118.
44. С.О. Решетняк, О. М. Андрієвська. Поведінка поверхневих спінових хвиль при відбитті від одновісного мультишарового феромагнетику // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – № 4. – С.
45. Р.В. Захарченко, В.Н. Захарченко, С.О. Решетняк. Вибрані питання фізики. Р-п перехід. Чорне випромінення. Електропровідність металів та напівпровідників. Ефект Холла. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 86 с. – Навчальний посібник.
46. В.К. Ковальов, С.О. Решетняк, П.О. Юрачківський. Фізика. Механіка. Розв'язання задач. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 91 с. – Навчальний посібник.
47. Ю.І. Джежеря, О.С. Климук, С.О. Решетняк. Теоретична фізика. Електродинаміка. Теорія поля з розв'язанням задач. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 74 с. – Навчальний посібник.
48. Потьомкін М.М. Фінітна динаміка руху частинки з власним магнітним моментом в осцилюючому неоднорідному магнітному полі // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук, спеціальність 01.04.11 – магнетизм. – 2013. (Науковий керівник д.ф.-м.н., проф. О.Ю. Горобець)
49. О.К. Двойненко. Мікро- та наномасштабне структурування поверхні методом магнітоелектролізу і магнітокерованої корозії // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, спеціальність 01.04.07 – фізика твердого тіла. – 2012. (Науковий керівник д.т.н., проф. С.В. Горобець)
50. Р.В. Верба. Надвисокочастотні властивості штучних магнетонних кристалів на основі ґраток магнітних наноелементів // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук, спеціальність 01.04.03 – радіофізика. – 2014. (Науковий керівник – д.ф.-м.н., проф. Мелков Г.А.)