

Взаємодія спінових хвиль та спин-поляризованого струму з магнітними неоднорідностями в наноструктурованих ферромагнітних матеріалах

Взаимодействие спиновых волн и спин-поляризованного тока с магнитными неоднородностями в наноструктурированных ферромагнитных материалах

Interaction of spin waves and spin-polarized current with magnetic inhomogeneities in nanostructured ferromagnetic materials

1. Номер державної реєстрації - 0118U003523

2. Науковий керівник - д. ф.-м.н., проф. Решетняк С.О., Решетняк С.А., Reshetniak Serhii O.

3. Суть розробки, основні результати.

(укр.) Побудовано теорію поширення спінових хвиль в гетерогенних ферромагнітних системах, яка передбачає генерацію спінових хвиль за допомогою спин-поляризованого струму та керування процесом поширення спінових хвиль в таких середовищах. Зокрема, представлено механізм збудження дипольно-обмінних спінових хвиль в багатошаровій ферромагнітній наносистемі. Отримано закони дисперсії дипольно-обмінних спінових хвиль в багатошаровій ферромагнітній наносистемі за наявності спин-поляризованого струму, а також параметри ефективної дисипації та умови генерації спінової хвилі. Знайдено спектральні характеристики спінових хвиль у двох конфігураціях одновимірного та одній конфігурації двовимірного магнетного кристалу. Показано наявність в спектрах досліджуваних магнетних кристалів зонної структури. Встановлено характеристики процесу заломлення обмінних спінових хвиль в неоднорідних ферромагнітних структурах типу спінових лінз з основи ферромагнітних гетерогенних структур для об'ємних спінових хвиль в обмінному наближенні з урахуванням обмінної неоднорідності інтерфейсів, які є засобом керування процесами поширення спінових хвиль в ферромагнітних середовищах. Для ряду конфігурацій спінових лінз показана можливість ефективного керування інтенсивністю спінової хвилі, а також регулювання прозорості подібних неоднорідностей, що дозволяє використовувати їх і як лінзи, і як дзеркала в залежності від величини зовнішнього поля та частоти хвилі. Отримані характеристики польових і частотних залежностей показників заломлення спінових хвиль та фокусних відстаней спінових лінз, створених на основі одновісних ферромагнетиків у зовнішньому постійному однорідному магнітному полі. Також виявлено існування вузької перехідної зони в польових та спектральних залежностях показників заломлення та коефіцієнтів відбиття, в якій відбувається різкий стрибок амплітуди хвилі, відбитої від межі двох однорідних середовищ.

(рос.) Построена теория распространения спиновых волн в гетерогенных ферромагнитных системах, которая предусматривает генерацию спиновых волн с помощью спин-поляризованного тока и управление процессом распространения спиновых волн в таких средах. В частности, представлен механизм возбуждения дипольно-обменных спиновых волн в многослойной ферромагнитной наносистеме. Получены законы дисперсии дипольно-обменных спиновых волн в многослойной ферромагнитной наносистеме при наличии спин-поляризованного тока, а также параметры эффективной диссипации и условия генерации спиновой волны. Найденны спектральные характеристики спиновых волн в двух конфигурациях одномерного и одной конфигурации двумерного магнетного кристалла. Показано наличие в спектрах исследуемых магнетных кристаллов зонной структуры. Установлены характеристики процесса преломления обменных спиновых волн в неоднородных ферромагнитных структурах типа спиновых линз с основе ферромагнитных

гетерогенных структур для объемных спиновых волн в обменном приближении с учетом обменной неоднородности интерфейсов, которые являются средством управления процессами распространения спиновых волн в ферромагнитных средах. Для ряда конфигураций спиновых линз показана возможность эффективного управления интенсивностью спиновой волны, а также регулирования прозрачности подобных неоднородностей, что позволяет использовать их и как линзы, и как зеркала в зависимости от величины внешнего поля и частоты волны. Получены характеристики полевых и частотных зависимостей показателей преломления спиновых волн и фокусных расстояний спиновых линз, созданных на основе одноосных ферромагнетиков во внешнем постоянном магнитном поле. Также обнаружено существование узкой переходной зоны в полевых и спектральных зависимостях показателей преломления и коэффициентов отражения, в которой происходит резкий скачок амплитуды волны, отраженной от границы двух однородных сред.

(англ.) A theory is developed for the propagation of spin waves in heterogeneous ferromagnetic systems. The theory provides for the generation of spin waves using a spin-polarized current and control of the process of propagation of spin waves in such media. In particular, the mechanism of excitation of dipole-exchange spin waves in a multilayer ferromagnetic nanosystem is presented. The dispersion laws of dipole-exchange spin waves in a multilayer ferromagnetic nanosystem in the presence of a spin-polarized current are obtained, as well as the parameters of effective dissipation and the conditions for generation of a spin wave. The spectral characteristics of spin waves are found for two configurations of a one-dimensional and one configuration of a two-dimensional magnonic crystal. The presence of a band structure in the spectra of the studied magnonic crystals is shown. The characteristics of the process of refraction of exchanged spin waves in inhomogeneous ferromagnetic structures such as spin lenses based on ferromagnetic heterogeneous structures for bulk spin waves in the exchange approximation with taking into account the exchange inhomogeneity of interfaces, which are means of controlling the processes of propagation of spin waves in ferromagnetic media, are found. For a number of configurations of spin lenses, it has been shown that it is possible to effectively control the intensity of the spin wave, as well as to control the transparency of such inhomogeneities, which makes it possible to use them both as lenses and as mirrors, depending on the magnitude of the external field and the wave frequency. The characteristics of the field and frequency dependences of the refractive indices of spin waves and the focal lengths of spin lenses based on uniaxial ferromagnets in an external constant magnetic field are obtained. The existence of a narrow transition zone in the field and spectral dependences of refractive indices and reflection coefficients was also discovered, in which a sharp jump in the amplitude of the wave reflected from the boundary of two homogeneous media occurs.

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

1. Патент на винахід «Спосіб знешкодження мікроорганізмів магнітною гіпертермією» / Горобець С.В., Горобець О.Ю., Кузьмініх Л.В. // Номер заявки: а 201907584 від 08.07.2019.

2. Патент на корисну модель «Спосіб знешкодження мікроорганізмів магнітною гіпертермією» / Горобець С.В., Горобець О.Ю., Кузьмініх Л.В. // Номер заявки: у 201907585 від 08.07.2019.

3. Патент на корисну модель «Спосіб визначення мікроорганізмів для оптимізації процесу знешкодження магнітною гіпертермією»/ Горобець С.В., Горобець О.Ю., Кузьмініх Л.В. // Номер заявки: у 201907586 від 08.07.2019.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Запропоновано узагальнення доданку Слончевського-Берже до лінеаризованого рівняння Ландау-Ліфшиця для дипольно-обмінних спинових хвиль на неплосинні конфігурації ферромагнітної наносистеми зі спін-поляризованим струмом. З модифікованого таким чином рівняння Ландау-Ліфшиця знайдено закон дисперсії досліджуваних спинових

хвиль, параметри ефективної дисипації та умови генерації спінової хвилі. Таким чином, отримані в роботі результати дозволяють розробляти прилади генерації спінових хвиль на основі трубчастих хвилеводів різної конфігурації - не обмежуючись лише площинним випадком. Варто також зауважити, що велика кількість аналогічних досліджень концентрується на однорідних спінових коливаннях, а не змінних в просторі хвилях, або на виключно диполь-дипольних спінових хвилях (врахування обмінної взаємодії є суттєвим для систем нанорозмірного масштабу).

Знайдено спектральні характеристики спінових хвиль у магнетонних кристалах, недосліджених на момент початку роботи авторів над тематикою. Зокрема, у відомих теоретичних дослідженнях дипольно-обмінних хвиль у одновимірних магнетонних кристалах (а також суцільних нанодротах та наотрубках) на момент початку роботи авторів над тематикою дослідники обмежувались суцільним одновимірним дротом чи багат шаровою тонкою плівкою, або ж дослідженням тільки спектру частот у спрощеному формалізмі.

Що стосується вивчення процесів заломлення спінових хвиль, то тільки в 2014 році з'явилися перші публікації японських авторів про експериментальне спостереження виконання закону Снелля для спінових хвиль на межі феромагнітних плівок та про експериментальне виготовлення спінових лінз та технологічні деталі дизайну таких лінз, автори ж даної роботи теоретично досліджують фізичні характеристики процесів розсіяння обмінних спінових хвиль з урахуванням неоднорідних властивостей інтерфейсів. До цього ж в світовій літературі були представлені лише теоретичні розрахунки, причому більшість з них (а для обмінних спінових хвиль – практично всі) виконані авторами цього проекту.

Отже, отримані результати розширюють можливості сучасної науки в плані можливостей генерації та керування параметрами спінових хвиль (за допомогою магнетонних кристалів та спінових лінз), 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. Представлено механізм збудження дипольно-обмінних спінових хвиль в багат шаровій феромагнітній наносистемі, що може бути використаний у пристроях спін-хвильової електроніки; отримано відповідні умови генерації спінової хвилі. Проаналізовано параметри вузької перехідної зони в польових та спектральних залежностях показників заломлення та коефіцієнтів відбиття обмінних спінових хвиль в неоднорідних феромагнітних структурах типу спінових лінз, в якій відбувається різкий стрибок амплітуди хвилі, відбитої від межі двох однорідних середовищ. Ця особливість дає змогу використовувати структури з подібною межею як високочутливі датчики зміни характеристик магнітних середовищ або зовнішніх умов, в яких вони знаходяться.

9. Існуючі результати впровадження.

За результатами НДР розроблено і впроваджено 2 нових розділи («Генерація спінових хвиль на основі spin-torque-ефекту» та «Розсіяння об'ємних спінових хвиль на спінових

лінзах») дисципліни «Магнетизм», що викладається в рамках освітньої частини програми підготовки аспірантів спеціальності 104 Фізика та астрономія, 1 лабораторну роботу «Доменна структура феромагнетиків» для дисципліни «Фізика твердого тіла» для бакалаврів спеціальності 104 Фізика та астрономія. Захищена 1 докторська та підготовлено до захисту 2 кандидатських дисертації. Видано 2 монографії та 1 підручник, опубліковано 18 статей у журналах, що входять до міжнародних наукометричних БД, з них 15 – у закордонних виданнях; 4 статті у фахових українських виданнях, 5 статей у закордонних фахових виданнях, що не входять до міжнародних наукометричних БД. Захищено 6 магістерських дисертацій. зроблено 22 доповіді на 15 міжнародних конференціях, отримано 3 патенти України. Опубліковано зі студентами 1 стаття в фаховому журналі.

10. Форма участі інвестора

На договірних засадах.

11. Обсяг інвестицій

На договірних засадах.

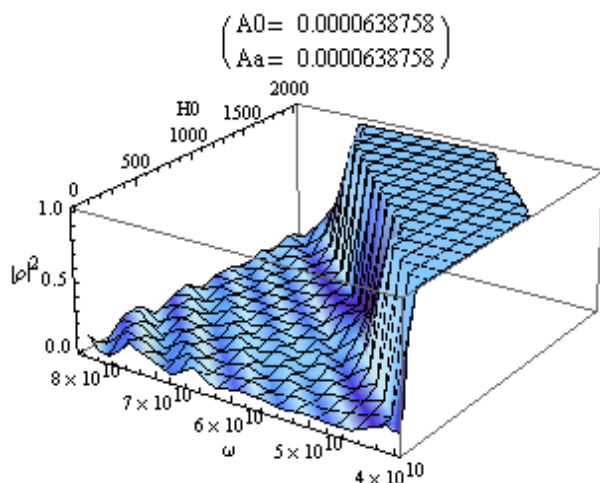
12. Мета інвестицій

Створення експериментальної лабораторії.

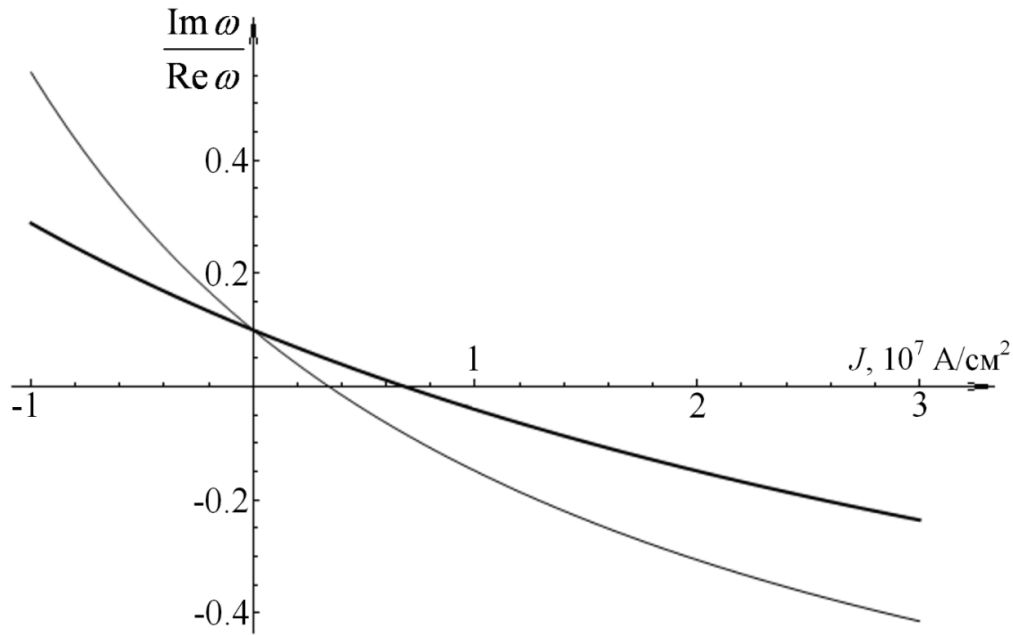
13. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, фізико-математичний факультет, кафедра загальної та експериментальної фізики, (044) 204-82-48, fmf_kzef@kpi.ua

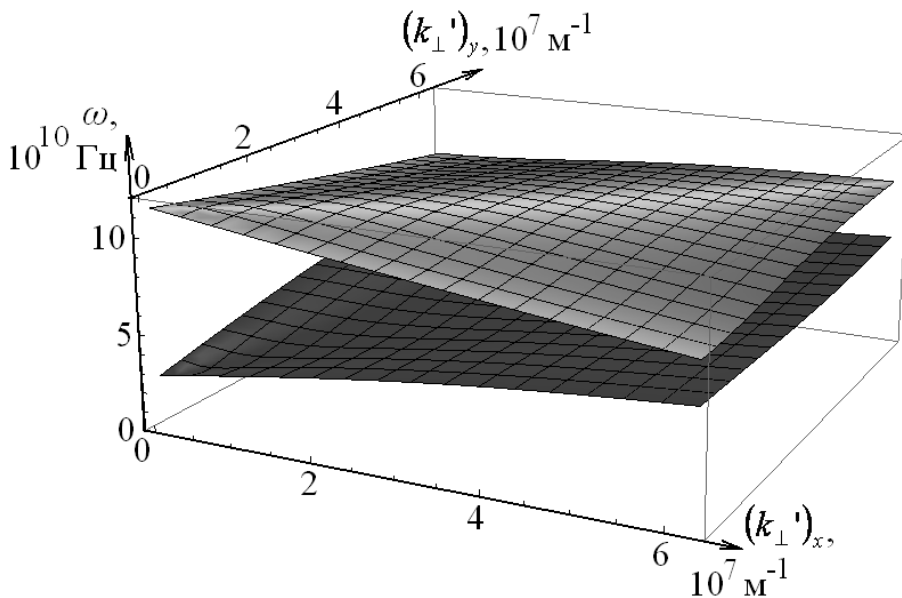
14. Фото розробки



Залежність коефіцієнту відбиття $|\rho|^2$ від модуля напруженості зовнішнього магнітного поля H_0 та частоти спінової хвилі ω при проходженні через досліджувану спінову лінзу для наведених значень параметрів обміну на границях A_0 та A_a . Значення частоти наведено у рад/с, напруженості поля - у ерстедах.



Залежність відношення уявної частини частоти спінової хвилі, що відповідає за дисипацію, до дійсної від густини спін-поляризованого струму для феромагнітної нанотрубки за наявності спін-поляризованого струму для граничних значень хвильового числа (тонка лінія представляє залежність для хвильового числа $k=10^2 \text{ см}^{-1}$, товста – для $k=10^6 \text{ см}^{-1}$). Параметри феромагнетика: константа обмінної енергії $\alpha=10^{-12} \text{ см}^{-2}$, константа одноосьової анізотропії $\beta=1$, гіромагнітне відношення $\gamma=10^5 \text{ Гц/Гс}$, рівноважна намагніченість феромагнетика $M_0=10^3 \text{ Гс}$.



Залежність частоти спінових хвиль у феромагнітній плівці з періодичною двовимірною системою однакових колових антиточок від площинного хвильового вектора для товщини плівки 10 нм, відстанями між центрами сусідніх антиточок 50 нм, радіусу однієї антиточки 20 нм, першої гілки залежності частоти спінових хвиль від поздовжньої компоненти хвильового вектора та наступних параметрів феромагнетика: константа обмінної енергії $\alpha=10^{-12} \text{ см}^{-2}$, константа одноосьової анізотропії $\beta=1$, гіромагнітне відношення $\gamma=10^5 \text{ Гц/Гс}$, рівноважна намагніченість феромагнетика $M_0=10^3 \text{ Гс}$. Наведено область, що є аналогом першої та другої зон Бриллюена.

15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання

1. O. Gorobets, Yu. Gorobets, I. Tiukavkina. Spin-polarized Current-driven Ferromagnetic Domain Wall Motion with a Skyrmion Building Block, *Ukr. J. Phys.*, 2020. – 65 (10), 919-923.
2. OY Gorobets, YI Gorobets. Topological characteristics of building blocks in the domain wall of an antiferromagnet with the Dzyaloshinskii–Moriya interaction / *Low Temperature Physics*, 2020. – 46 (8), pp. 851-855.
3. OY Gorobets, YI Gorobets. 3D analytical model of skyrmion-like structures in an antiferromagnet with DMI. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 166800.
4. OS Latcham, YI Gusieva, AV Shytov, OY Gorobets, VV Kruglyak. Hybrid magnetoacoustic metamaterials for ultrasound control / *Applied Physics Letters*, 2020. – 117 (10), 102402.
5. Mieszczak S., Busel O., Gruszecki P., Kuchko A.N., Kłos J.W., Krawczyk M. An anomalous refraction as a way to bend spin waves. *Physical Review Applied*.- 2020.- 13(5), 054038 (13).
6. S.V. Gorobets, O.Y. Gorobets, I.V. Sharau, Y.V. Milenko Magnetically controlled vector based on E coli Nissle 1917 // *arXiv preprint arXiv:2002.01958*, (2020).
7. В.В. Данильчук, В.В. Куліш, Дипольно-обмінні спінові хвилі в системі одновимірного періодичного ланцюжка еліптичних антиточок // *Металофізика та новітні технології*. – 2019. – №7. – С. 837-849.
8. Gorobets S., Gorobets O., Bulaievska M., Sharay I. Detection of Biogenic Magnetic Nanoparticles in Ethmoid Bones of Migratory and Non-migratory Fishes // *SN Applied Sciences*. – 2019. –1: 63. <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0072>.
9. M Zelent, M Mailyan, V Vashistha, P Gruszecki, OY Gorobets, YI Gorobets et al. Spin wave collimation using a flat metasurface. *Nanoscale* 2019, 11(19), 9743-9748.
10. O Busel, O Gorobets, Y Gorobets. Propagation of Spin Waves Through an Interface Between Ferromagnetic and Antiferromagnetic Materials. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2019, 1-6.
11. M Mailian, OY Gorobets, YI Gorobets, M Zelent, M Krawczyk. Exchange spin waves transmission through the interface between two antiferromagnetically coupled ferromagnetic media. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, 484, 484-489.
12. OS Latcham, YI Gusieva, AV Shytov, OY Gorobets, VV Kruglyak. Controlling acoustic waves using magneto-elastic Fano resonances. *Applied Physics Letters*, 2019, 115 (8), 082403.
13. Yu I Gorobets, O Yu Gorobets, DO Derecha, Yu B Skirta, IV Gerasimchuk, VV Konovalova, AA Kyba. Electrolyte–electrolyte phase separation under the influence of a DC magnetic field // *Applied Nanoscience*. – 2019. – 9 (5). – P. 859-863.
14. S.Gorobets, O.Gorobets, L. Kuzminykh, R. Shevgalishyn. Magnetic hyperthermia of microorganisms with natural ferrimagnetic properties / *Proceedings of the National Aviation University*. 2019. No. 2 (79): P. 76–84.
15. Ultra-narrow spin wave metasurface for focusing application M Zelent, M Mailyan, V Vashistha, P Gruszecki, OY Gorobets, YI Gorobets, et al, *arXiv preprint arXiv:1811.04613*.
16. Р.В. Захарченко, В.Н. Захарченко. Поглинання та випромінювання в золь-гель SiO₂ матрицях, легованих карміновою кислотою та родаміном // *Materialy XV Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji , «Europejska nauka XXI powieką - 2019»*, 07 -15 maja 2019 roku , *Fizyka, Fizyka ciała stałego*. – 2019. - Volume 8 *Przemysł: Nauka i studia* -72 p. Vol. 8. - P. 3-10.
17. S.V. Gorobets, O. Yu. Gorobets, A.V. Magerman, Yu. I. Gorobets, I.V. Sharay. Biogenic magnetic nanoparticles in plants // *arXiv preprint: 1901.07212*, 2019/1/22.
18. 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*. – 2018. – Vol. 462, 15. – Ps. 226-229.
19. Y. Gusieva, P. Graczyk, O. Gorobets, M. Krawczyk Excitation of bulk spin waves by acoustic wave at the plane defect of a ferromagnet // *Acta Physica Polonica A*, 2018, No. 3, Vol. 133.

20. Gorobets S. Biogenic magnetic nanoparticles in human or gansand tissues / Gorobets S., Medviediev O., Gorobets O., Ivanchenko A. // *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. – 2018. – Vol. 135. – P.49-57.
21. Gorobets S., Gorobets O., Bulaievska M., Sharau I. Magnetic force microscopy of the ethmoid bones of migratory and non-migratory fishes // *Acta Physica Polonica A*. – 2018. – No. 3. – Vol. 133. – P. 734-737.
22. Gorobets O. Yu. Detection of biogenic magnetic nanoparticles in human's a ortica neurysms / O. Yu. Gorobets, S.V. Gorobets, Y.A. Darmenko, I. V. Sharay, O.M. Lazarenko // *Acta Physica Polonica A*. – 2018. – Vol. 133. – № 3. – P.738-741.
23. Mikeshyna H. I. Influence of biogenic magnetic nanoparticles on the vesicular transport / H. I. Mikeshyna, Y.A. Darmenko, O. Yu. Gorobets, S.V. Gorobets, I. V. Sharay, O.M. Lazarenko // *Acta Physica Polonica A*. – 2018. – Vol. 133. – № 3. – P.731-733.
24. V.V. Kulish. Theory of Dipole-Exchange Spin Waves in a Ferromagnetic Nanotube. Consideration of Volume and Surface Modes. *International Journal of Engineering Research & Science*. – 2018. – Vol.4. – P. 18-23.

16. Ключові слова: спінові хвилі, спін-поляризований струм, спінова лінза, граничні умови, мультишарова структура, магнітне поле, частота, анізотропія, обмінна взаємодія.