

UDK 537.6; 538.9
PACS: 75.30.Ds, 75.50.Dd**ДВОПРОМЕНЕЗАЛОМЛЕННЯ ТА ВІДБИТТЯ ПОВЕРХНЕВИХ СПІНОВИХ ХВИЛЬ
У ДВОХОСЬОВИХ ФЕРОДИЕЛЕКТРИКАХ****Ю.І. Горобець¹, С.О. Решетняк²**¹*Інститут магнетизму НАН та МОН України
бул. Вернадського, 36-б, 03142 Київ, Україна*²*Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”
пр. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна**E-mail: s.reshetnyak@kpi.ua*

Received 2 February 2012, accepted 20 February 2012

Розглядаються процеси заломлення та відбиття поверхневих спінових хвиль в неоднорідному діелектричному ферромагнітному середовищі. В рамках формалізму спінової густини в обмінному наближенні отримано рівняння динаміки магнітного моменту та закон дисперсії спінових хвиль. Отримано рівняння ейконалу та показники заломлення спінових хвиль. Визначено польові та частотні залежності показників заломлення та коефіцієнтів відбиття спінових хвиль на межі двох однорідних двоохосьових ферромагнетиків з різними параметрами обмінної взаємодії, магнітної анізотропії та намагніченості насичення. Показано можливість застосування запропонованої системи в якості спінхвильових аналогів оптичних приладів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: магнітне поле, спінові хвилі, заломлення, анізотропія, відбиття.**ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СПИНОВЫХ ВОЛН В ДВУОСНЫХ
ФЕРРОДИЕЛЕКТРИКАХ****Ю.И. Горобец¹, С.А. Решетняк²**¹*Інститут магнетизма НАН и МОН Украины
бул. Вернадского, 36-б, 03142 Киев, Украина*²*Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт”
пр. Победы, 37, 03056 Киев, Украина*

Рассматриваются процессы преломления и отражения поверхностных спиновых волн в неоднородной диэлектрической ферромагнитной среде. В рамках формализма спиновой плотности в обменном приближении получено уравнение динамики магнитного момента и закон дисперсии спиновых волн. Получено уравнение эйконала и показатели преломления спиновых волн. Определены полевые и частотные зависимости показателей преломления и коэффициентов отражения спиновых волн на границе двух однородных двуосных ферромагнетиков с различными параметрами обменного взаимодействия, магнитной анизотропии и намагнитченности насыщения. Показана возможность применения предложенной системы в качестве спинволновых аналогов оптических приборов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитное поле, спиновые волны, преломление, анизотропия, отражение.**DOUBLE REFRACTION AND REFLECTION OF SURFACE SPIN WAVES IN BIAxIAL FERROMAGNETIC
INSULATORS****Yu.I. Gorobets¹, S.O. Reshetnyak²**¹*Institute of Magnetism of NAS and MES of Ukraine
Vernadskiy av., 36-b, 03142 Kyiv, Ukraine*²*National Technical University of Ukraine „Kyiv Polytechnic Institute”
Peremohy av., 37, 03056 Kyiv, Ukraine*

The processes are considered of refraction and reflection of surface spin waves in inhomogeneous dielectric ferromagnetic medium. In the frameworks of the formalism of spin density in exchange mode the equation of magnetic moment dynamics and the dispersion law of spin waves are obtained. The eikonal equation and refraction indexes are obtained. The field and frequency dependencies of refraction indexes and reflection coefficients of spin waves are defined in an interface of two uniform biaxial ferromagnets with different parameters of exchange interaction, magnetic anisotropy and saturation magnetization. It is shown the possibility to use the proposed system as spinwave analogs of optical devices.

KEY WORDS: magnetic field, spin waves, refraction, anisotropy, reflection.

Стрімкий прогрес в області мікро- та нанотехнологій, що спостерігається протягом останніх десятиліть, викликає необхідність розробки нових матеріалів і пристроїв, у яких реалізується можливість використання переваг високочастотних хвиль. Зокрема, становить інтерес прикладне використання характерних рис спінових хвиль. Відзначимо, що вже активно розробляються та досліджуються магнітні структури, здатні керувати інтенсивністю спінових хвиль, які в них поширюються [1,2]. Крім того, за допомогою спін-хвильових пристроїв може здійснюватися обробка сигналу безпосередньо в надвисокочастотному діапазоні: фільтрація, дисперсійна та бездисперсійна затримка, керування фазою, згортання сигналів, магнітооптична модуляція світла та ін. [3-6]

Як правило, при теоретичному описі особливостей поширення спінових хвиль традиційно

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} n < \frac{1 - \sqrt{\eta}}{1 + \sqrt{\eta}} \quad \text{або} \quad \frac{\alpha_2}{\alpha_1} n > \frac{1 + \sqrt{\eta}}{1 - \sqrt{\eta}}.$$

Наприклад, $|R|^2 > 0,9$ досягається для $\alpha_1 = \alpha_2$, $M_{01} = M_{02}$, $L_1 = L_2$ при $n < 0,03$ або $n > 37,97$.

Для виконання умови геометричності оптики (10) товщина лінзи або дзеркала обмежується нерівністю:

$$a \gg 2\pi \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha L^2 - \beta - \rho/2 - \tilde{H}_0 \pm \sqrt{\Omega^2 + \rho^2/4}}}. \quad (20)$$

Як видно з (15), (19) та (20), підбір параметрів для побудови лінзи або дзеркала не представляє труднощів для широкого спектру магнітних матеріалів [21]. Зокрема, у випадку ферит-гранатів з умови (20) для тонкої лінзи впливає, що за порядком $a > 10^{-6}$ см.

Фокусна відстань f лінзи визначається за формулою

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right),$$

де R_1 , R_2 – радіуси кривизни поверхонь лінзи. Наприклад, для лінзи, сформованої з ферит-гранату в іншому ферит-гранаті, при радіусі кривизни $R_1 = -R_2 = 1$ мкм (з урахуванням прийнятого в оптиці правила, що для двовипуклих лінз $R_1 > 0$, а $R_2 < 0$), товщині лінзи $a = 0,1$ мкм та показнику заломлення $n = 1,8$ отримуємо фокусну відстань $f \approx 0,6$ мкм, що на 2–3 порядки менше за глибину згасання в таких матеріалах.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

На рис. 2–3 зображені залежності інтенсивності відбиття $I_{R^+} = |R^+|^2$ й показника заломлення n^+ від частоти поверхневої спінової хвилі при характерних значеннях параметрів матеріалу [21]. Добре видно, що шляхом підбору параметрів матеріалу можна досягти необхідного співвідношення інтенсивностей відбитої хвилі та хвилі що пройшла для обраної частоти. Крім того, як впливає з рис. 4, інтенсивність відбиття істотно залежить від величини зовнішнього однорідного магнітного поля, що дає можливість керувати інтенсивністю відбитої хвилі в широких межах шляхом зміни лише тільки значення зовнішнього магнітного поля при фіксованих параметрах матеріалу. При цьому характер зміни показника заломлення відбитий на рис. 5.

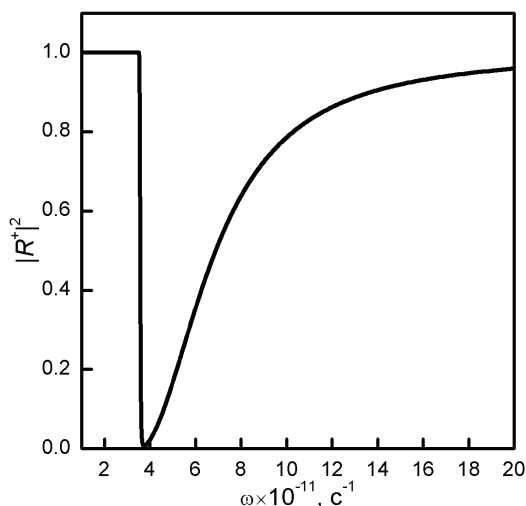


Рис. 2. Залежність коефіцієнту відбиття $|R^+|^2$ від частоти спінової хвилі ω при $\alpha_1 = 10^{-11}$ см², $\alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-11}$ см², $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 15$, $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$, $L_1 = L_2 = 10^5$ см⁻¹, $M_{01} = 100$ Гс, $M_{02} = 105$ Гс, $A/c = 10^7$ (c – стала гратки), $\theta_1 = \pi/80$, $\tilde{H}_{01} = 187$.

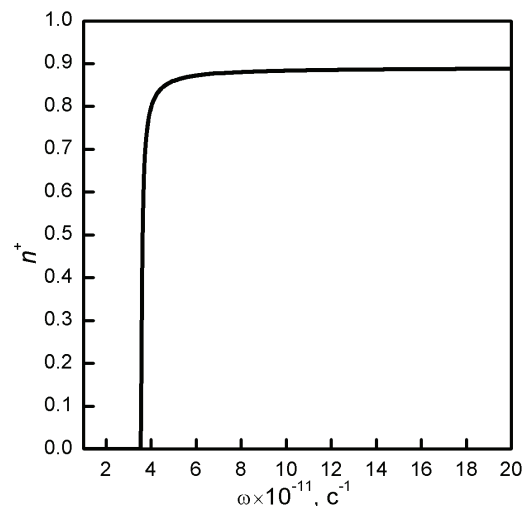


Рис. 3. Залежність показника заломлення n^+ від частоти ω при $\alpha_1 = 10^{-11}$ см², $\alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-11}$ см², $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 15$, $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$, $L_1 = L_2 = 10^5$ см⁻¹, $M_{01} = 100$ Гс, $M_{02} = 105$ Гс, $\tilde{H}_{01} = 187$.

Таким чином, існує можливість досягнення необхідного значення коефіцієнта відбиття від неоднорідного двохосового вкраплення, що грає роль лінзи або дзеркала, шляхом зміни значення зовнішнього магнітного поля. При цьому коефіцієнт відбиття може істотно змінюватися без зміни параметрів середовища, що дає можливість використати одну й ту ж саму неоднорідність як в якості лінзи, так і в якості дзеркала при тих самих параметрах структури.

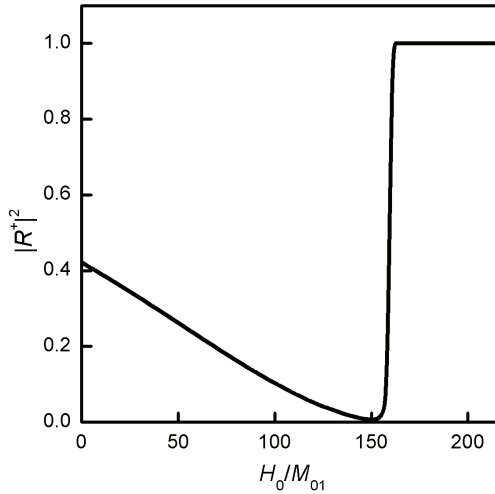


Рис. 4. Залежність коефіцієнту відбиття $|R^+|^2$ від величини зовнішнього постійного однорідного магнітного поля при $\alpha_1 = 10^{-11} \text{ см}^2$, $\alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$, $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 15$, $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$, $L_1 = L_2 = 10^5 \text{ см}^{-1}$, $M_{01} = 100 \text{ Гс}$, $M_{02} = 105 \text{ Гс}$, $A/c = 10^7$, $\theta_1 = \pi/80$, $\omega = 3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

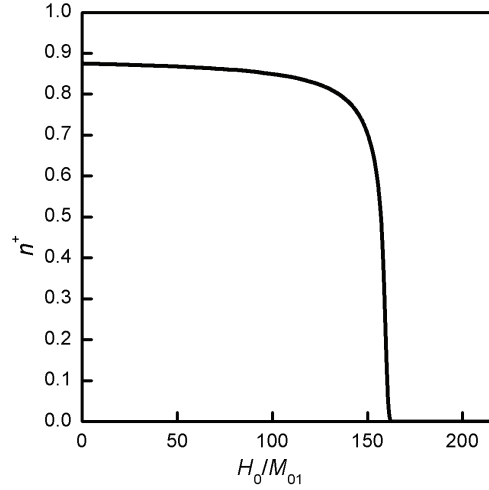


Рис. 5. Залежність показника заломлення n^+ від величини зовнішнього постійного магнітного поля при $\alpha_1 = 10^{-11} \text{ см}^2$, $\alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$, $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 15$, $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$, $L_1 = L_2 = 10^5 \text{ см}^{-1}$, $M_{01} = 100 \text{ Гс}$, $M_{02} = 105 \text{ Гс}$, $\omega = 3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

На рис. 6–9 наведені залежності інтенсивності відбиття $I_{R^-} = |R^-|^2$ й показника заломлення n^- від частоти поверхневої спінової хвилі й величини зовнішнього магнітного поля при значеннях параметрів матеріалу, що допускають існування цієї гілки спінових хвиль. Прямування до нескінченності показника заломлення на рис. 7,9 відповідає початку забороненої зони в першому матеріалі. На рис. 6,8 цей факт умовно відзначений лінією, що відповідає повному відбиттю, хоча насправді в цьому випадку відсутня падаюча хвиля через швидке загасання в першому середовищі.

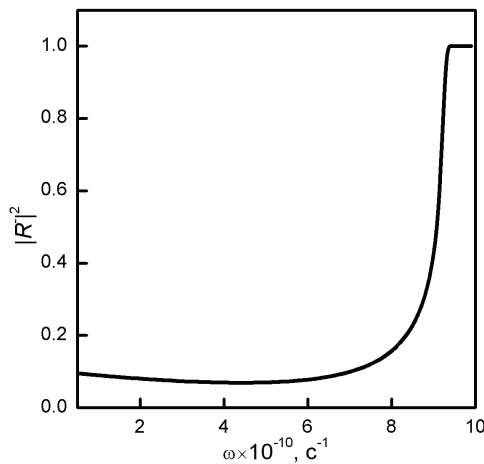


Рис. 6. Залежність коефіцієнту відбиття $|R^-|^2$ від частоти спінової хвилі ω при $\alpha_1 = 10^{-11} \text{ см}^2$, $\alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$, $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 15$, $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$, $L_1 = L_2 = 10^6 \text{ см}^{-1}$, $M_{01} = 100 \text{ Гс}$, $M_{02} = 105 \text{ Гс}$, $A/c = 10^7$, $\theta_1 = \pi/80$, $\tilde{H}_{01} = 37$.

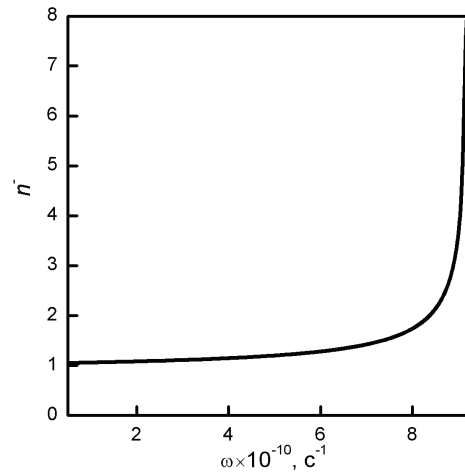


Рис. 7. Залежність показника заломлення n^- від частоти ω при $\alpha_1 = 10^{-11} \text{ см}^2$, $\alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$, $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 15$, $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$, $L_1 = L_2 = 10^6 \text{ см}^{-1}$, $M_{01} = 100 \text{ Гс}$, $M_{02} = 105 \text{ Гс}$, $\tilde{H}_{01} = 37$.

Слід відзначити, що при необхідності можна підібрати параметри матеріалу таким чином, що через границю розділу будуть проходити лише хвилі, які відповідають одній з гілок, в той час як хвилі другої гілки будуть повністю відфільтровуватися. Звичайно, при певних параметрах можна реалізувати й ситуацію, при якій «мінусова» гілка при зростанні частоти (або зовнішнього поля) спочатку потрапить у заборонену зону другого матеріалу, у той час як у першому матеріалі зона буде усе ще дозволеною. Це буде відповідати реальному повному відбиттю від границі розділу.

Відзначимо також, що, оскільки фокусна відстань f лінзи залежить від показника заломлення, магнітне поле та частота можуть бути тими чинниками, які разом із зміною показника заломлення спінової хвилі змінюють також фокусну відстань спін-хвильової лінзи без зміни магнітних параметрів середовищ.

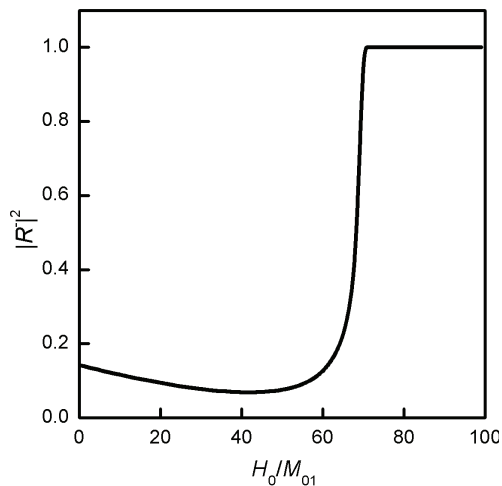


Рис. 8. Залежність коефіцієнту відбиття $|R|^{-2}$ від величини зовнішнього постійного однорідного магнітного поля при $\alpha_1 = 10^{-11}$ см², $\alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-11}$ см², $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 15$, $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$, $L_1 = L_2 = 10^6$ см⁻¹, $M_{01} = 100$ Гс, $M_{02} = 105$ Гс, $A/c = 10^7$, $\theta_1 = \pi/80$, $\omega = 3,6 \cdot 10^{10}$ с⁻¹.

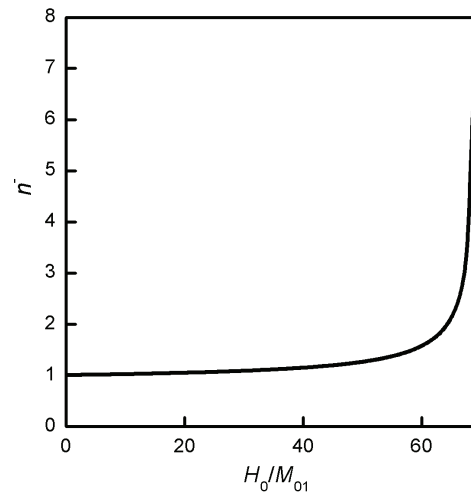


Рис. 9. Залежність показника заломлення n^- від величини зовнішнього постійного однорідного магнітного поля при $\alpha_1 = 10^{-11}$ см², $\alpha_2 = 1,2 \cdot 10^{-11}$ см², $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 15$, $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$, $L_1 = L_2 = 10^6$ см⁻¹, $M_{01} = 100$ Гс, $M_{02} = 105$ Гс, $\omega = 3,6 \cdot 10^{10}$ с⁻¹.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в рамках ВКБ-наближення, застосованого до випадку поширення поверхневих спінових хвиль у двохосьових феромагнетиках, показано, що характер заломлення спінової хвилі на межі розділу двох однорідних середовищ проявляє ефект двопронезаломлення завдяки закріпленню спінів на поверхні матеріалу. При цьому кожна із двох гілок має свій вигляд коефіцієнту відбиття спінової хвилі від границі розділу середовищ, що дозволяє досягти необхідного співвідношення інтенсивностей пройшовших крізь границю хвиль, які відповідають різним гілкам, аж до повного виключення однієї з гілок. Отримано вклад параметру обміну в інтерфейсі в амплітуду відбитої та пройшовшої хвиль. Показано, що при великих значеннях цього параметру відповідні граничні умови зводяться до звичайних обмінних граничних умов. Аналізуючи вираз (19), слід відзначити, що в двохосьових феромагнітних структурах можливість досягнення будь-якого значення коефіцієнту відбиття для обраної частоти шляхом зміни тільки величини зовнішнього магнітного поля при фіксованих параметрах матеріалу існує лише при великих значеннях параметру обміну в інтерфейсі, а при зменшенні цього параметру відбиття хвиль стає превалюючим над проходженням, і значення максимуму амплітуди проходження хвилі зменшується, прямуючи до нуля при $A \rightarrow 0$.

Виявлені закономірності можуть бути з успіхом використані при розробці приладів спінхвильової мікроелектроніки як в якості фільтрів, так й у якості спінхвильових аналогів оптичних пристроїв. Зокрема, наведені розрахунки дозволяють побудувати лінзи або дзеркала зі змінною фокусною відстанню та змінною відбиттевою здатністю, керувати властивостями яких можна за допомогою зовнішнього магнітного поля. Відзначимо, що фокусні відстані та інші параметри двофокусної спінхвильової лінзи були визначені та досліджені в роботі [22].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gorobets Yu.I., Kuchko A.N., Vasil'ev S.V. Vozbuzhdenie modulirovannykh spinovykh voln odnomernym defektom anizotropii // FMM. – 1998. – Т. 85, № 3. – С. 40-45.
2. Kruglyak V.V., Hicken R.J., Kuchko A.N., Gorobets V.Yu. Spin waves in a periodically layered magnetic nanowire // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 98, № 1. – P. 014304.
3. Vázquez M. Soft magnetic wires // Physica B: Condensed Matter. – 2001. – Vol. 299, № 3-4. – P 302-313.

4. Rutkin O. G., Kovshikov N.G., Stashkevich A.A., Kalinikov B. A., Ageev A.N. , Trifonov A.C., Kravchenko V. B., Filimonova L. M. Vzaimodeystvie opticheskikh volnovodnykh mod so spinovymi volnami v plynke ING // Pis'ma v ZhTF. – 1985. – T.11., № 15. – S. 933-936.
5. Gulyaev Yu.V., Ignat'ev I.A., Plekhanov V.G., Popkov A.F. Rasseyanie sveta v girotropnom volnovode na spinovoy volne // Radiotekhnika i elektronika. – 1985. – T.30, № 8. – S.1522-1530.
6. Gurevich A.G. Magnetizm na sverkhvysokikh chastotakh // Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal. – 1999. – № 1. – S. 98-104.
7. Gan J.Y., Zhang F.C., Su Z.B. Spin wave theory for antiferromagnetic XXZ spin model on a triangle lattice in the presence of an external magnetic field // Phys. Rev. B. - 2003. – Vol. 67, №14. – P. 4427.
8. Buchmeier M., Kuanr B.K., Gareev R.R., Bürgler D.E., Grünberg P. Spin waves in magnetic double layers with strong antiferromagnetic interlayer exchange coupling: Theory and experiment // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 67, №18. – P. 4404.
9. Fransson J., Holmström E., Eriksson O., Sandalov I. Theory of spin filtering through quantum dots // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 67, №20. – P. 5310.
10. Antropov V.P. The exchange coupling and spin waves in metallic magnets: removal of the long-wave approximation // JMMM. – 2003. – Vol. 262. – P. 192–197.
11. Gorobets Yu.I., Reshetnyak S.A. Otrazhenie i prelomlenie spinovykh voln v odnoosnykh magnetikakh v priblizhenii geometricheskoy optiki // ZhTF. – 1998. – T. 68, № 2. – S. 60–63.
12. Gorobets Yu.I., Reshetnyak S.O., Khomenko T.A. Filtration of spin-wave signal at transmission of data through a ferromagnetic medium // Data Science Journal. – 2008. – Vol. 7, №12. – P. 167–170.
13. Reshetnyak S.O. Kharakterystyky spin-khvil'ovykh analogiv optychnykh pryladiv dlya spinovogo promeny v neodnorodnomu magnitnomu seredovyshchi // Naukovi visti NTUU «KPI». – 2001. – № 6. – S. 133–136.
14. Gorobets' Yu.I., Reshetnyak S.O. Nablizhennya geometrichnoyi optyky dlya poverkhnevyykh spinovykh khvyly' v odnovisnomu magnitnomu seredovyshchi // Naukovi visti NTUU «KPI». – 2003. – № 1. – S. 132–137.
15. Gorobets Yu.I., Reshetnyak S.A. Refraction and reflection of bulk spin waves on a boundary of two homogeneous dielectric ferromagnets having biaxial anisotropy // Functional materials. – 2004. – Vol. 11, №3. – P. 436–440.
16. Bar'yakhtar V.G., Gorobets Yu.I.. Tsilindricheskie magnitnye domeny i ikh reshetki. – K.: Naukova dumka. – 1988. – 168 s.
17. Akhiezer A.I., Bar'yakhtar V.G., Peletminskiy S.V. Spinovye volny – M.: Nauka, 1967. – 368 s.
18. Kravtsov Yu.A., Orlov Yu. I. Geometricheskaya optika neodnorodnykh sred – M.: Nauka, 1980. – 302 s.
19. Mors F.M., Feshbakh G. Metody teoreticheskoy fiziki, T. 2. – M.: Izd-vo in. lit., 1960. – 896 s.
20. Kurant R. Uravneniya s chastnymi proizvodnymi – M.: Mir, 1964. – 830 c.
21. Eshenfel'der A.. Fizika i tekhnika tsilindricheskikh magnitnykh domenov – M.: Mir, 1983. – 496 s.
22. Berezhinskiy A.S., Reshetniak S.A. Refraction of spin waves by bifocal surface ferromagnetic lens // JMMM. – 2012. – Vol. 324, №2. – P. 231-234.