

УДК 538.11

**ОТРАЖЕНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН ОТ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО  
МАГНОННОГО КРИСТАЛЛА С КОСИНУСОИДАЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ  
МЕЖСЛОЙНОЙ ГРАНИЦЫ**

*В. С. Ткаченко*

В данной работе исследуется частотная зависимость коэффициентов отражения спиновых волн от магнито-го кристалла с периодически изменяющимся значением одноосной анизотропии и конечной толщиной межслойных границ. Рассматривается косинусоидальное распределение анизотропии в межслойной границе. Проанализировано влияние размера межслойной границы на значение коэффициента отражения.

*Ключевые слова:* магнотный кристалл, спиновые волны, периодическая структура, магнетоника.

**Введение.** Периодические магнитные структуры вызывают большой интерес, так как они могут стать основой нового класса магнитных устройств, в которых магнотны будут использоваться в качестве носителей информации. Эта область магнетизма получила название магнетоники [1, 2]. Магнетонные кристаллы (МК) представляют собой искусственно созданные периодические структуры, в которых распространяются возбуждения магнетонов.

Существует огромное число работ, посвященных исследованию МК с бесконечно тонкими меж-слойными границами [3, 4]. Однако больший интерес представляют модели, более близкие к реальным магнетикам и позволяющие учесть наличие дефектов [5], неоднородность периода [6], влияние толщины и профиля межслойной границы [7] на спектр спиновых волн (СВ).

Спектральные характеристики дают возможность сделать некоторые выводы о внутренней струк-туре МК, как это было показано в [8]. Для ее реализации требуется работа в нескольких направлениях. Одно из них связано с изучением спектра стоячих волн, в экспериментах с которыми исследуется закон дисперсии. В экспериментах с бегущими волнами исследуются другие параметры – коэффициенты от-ражения и прохождения, поэтому необходимо подробное изучение случая распространяющихся волн.

Так в работе [9] были получены результаты для МК с идеальными межслойными границами. В работе [10] была предложена модель МК с неидеальным обменным взаимодействием между слоями.

Влияние конечной толщины межслойных границ было учтено в [11], но предложенная модель не позволяла сделать вывод о влиянии профиля распределения анизотропии в межслойной границе на про-цесс отражения СВ. В работе [12] был проведен анализ влияния профиля межслойной границы на спектр СВ, но приведены результаты только для частот, ограниченных первой запрещенной зоной спектра.

В данной работе предложена модель с косинусоидальным профилем межслойной границы, полу-чена частотная зависимость коэффициента отражения СВ в большем частотном диапазоне, проведено сравнение с линейным профилем.

**Модель материала.** Рассмотрим МК, представляющий собой цилиндр, состоящий из чередую-щихся однородных магнитных слоев равной толщины, характеризующихся различными величинами одноосной анизотропии в каждом слое, магнитную вязкость не учитываем. Будем предполагать, что «ос-новные» слои разделены «переходными» слоями конечной толщины. Выберем в качестве оси  $z$  направ-ление, перпендикулярное к плоскости слоев.

Координатная зависимость анизотропии для такого МК может быть представлена в виде соотно-шения

$$\beta(z) = \begin{cases} \beta_- = \langle \beta \rangle - \frac{\Delta\beta}{2} & z_0 + nL < z < (z_0 + d) + nL, \\ \langle \beta \rangle + \frac{\Delta\beta}{2} \cos \left[ \frac{\pi}{\delta} (z - z_0 - d - \delta) \right] & (z_0 + d) + nL < z < (z_0 + d + \delta) + nL, \\ \beta_+ = \langle \beta \rangle + \frac{\Delta\beta}{2} & (z_0 + d + \delta) + nL < z < (z_0 + d + \delta) + nL, \\ \langle \beta \rangle - \frac{\Delta\beta}{2} \cos \left[ \frac{\pi}{\delta} (z - z_0 - 2d - 2\delta) \right] & (z_0 + 2d + \delta) + nL < z < (z_0 + 2d + 2\delta) + nL, \end{cases} \quad (1)$$

где  $L$  – величина одного периода МК,  $\langle \beta \rangle$  – среднее значение анизотропии,  $d$  – размер однородного слоя,  $\delta$  – размер переходного слоя,  $n$  – номер периода,  $z_0$  – координата границы раздела однородного материала и МК. Координатная зависимость анизотропии схематически изображена на рис. 1.

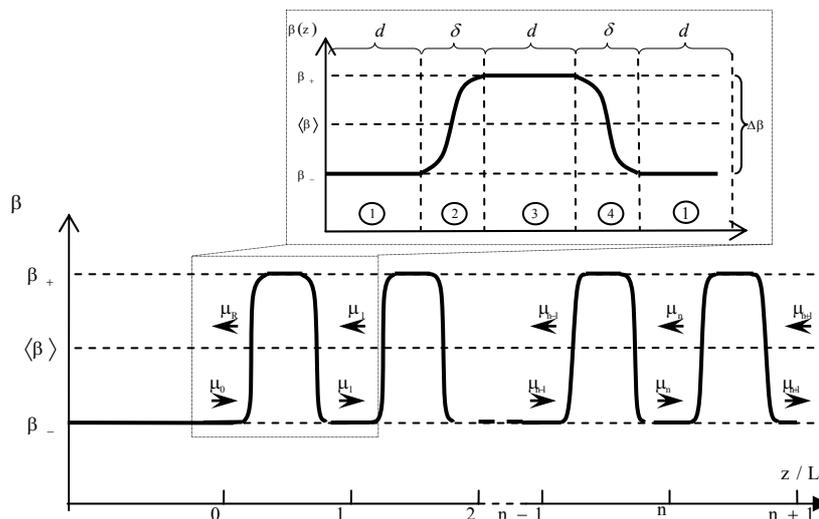


Рис. 1. Координатная зависимость распределения анизотропии

**Метод решения.** Предположим, что на МК перпендикулярно плоскости слоев падает спиновая волна с  $\mu_0$ . Амплитуда отраженной волны  $\mu_r$  связана с ней как

$$\mu_r = R\mu_0 \quad (2)$$

где  $R$  – коэффициент отражения спиновой волны от МК.

С помощью метода, предложенного в [13] для коэффициента отражения можно получить следующее соотношение

$$R = \frac{\sqrt{(\rho+1)^2 - \tau^2} - \sqrt{(\rho-1)^2 - \tau^2}}{\sqrt{(\rho+1)^2 - \tau^2} + \sqrt{(\rho-1)^2 - \tau^2}} \quad (3)$$

Здесь введены обозначения:  $\rho$  – коэффициент отражения от одного периода МК,  $\tau$  – коэффициент прохождения.

С помощью коэффициентов  $\rho$  и  $\tau$  можно получить выражение для квазиволнового числа

$$\exp(iKL) = \frac{\sqrt{(\tau+1)^2 - \rho^2} - \sqrt{(\tau-1)^2 - \rho^2}}{\sqrt{(\tau+1)^2 - \rho^2} + \sqrt{(\tau-1)^2 - \rho^2}}, \quad (4)$$

где  $L$  – значение периода МК.

Для того чтобы определить значения  $\rho$  и  $\tau$ , используем метод, изложенный в [12].

$$\rho = \sqrt{1 - 4\tilde{M}^2}, \quad \tau = -2\tilde{M}. \quad (5)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \tilde{M} = & \left\{ \begin{aligned} & \left[ \cos(k_1 d) P_2 + (\ell k_1)^{-1} \sin(k_1 d) P_2' \right] \cos(k_3 d) + \\ & + \left[ \cos(k_1 d) Q_2 - (\ell k_1)^{-1} \sin(k_1 d) Q_2' \right] \ell k_3 \sin(k_3 d) \end{aligned} \right\} P_4 + \\ & + \left\{ \begin{aligned} & \left[ \cos(k_1 d) Q_2 - (\ell k_1)^{-1} \sin(k_1 d) Q_2' \right] \cos(k_3 d) - \\ & - \left[ \cos(k_1 d) P_2 + (\ell k_1)^{-1} \sin(k_1 d) P_2' \right] (\ell k_3)^{-1} \sin(k_3 d) \end{aligned} \right\} P_4' - \\ & - \left\{ \begin{aligned} & \left[ \ell k_1 \sin(k_1 d) P_2 - \cos(k_1 d) P_2' \right] \cos(k_3 d) + \\ & + \left[ \ell k_1 \sin(k_1 d) Q_2 + \cos(k_1 d) Q_2' \right] \ell k_3 \sin(k_3 d) \end{aligned} \right\} Q_4 + \\ & + \left\{ \begin{aligned} & \left[ \ell k_1 \sin(k_1 d) Q_2 + \cos(k_1 d) Q_2' \right] \cos(k_3 d) - \\ & - \left[ \ell k_1 \sin(k_1 d) P_2 - \cos(k_1 d) P_2' \right] (\ell k_3)^{-1} \sin(k_3 d) \end{aligned} \right\} Q_4' \end{aligned} \quad (6)$$

где  $k_{1,3} = \sqrt{(\Omega - h - 2\pi - \beta_{\mp})/\alpha}$  – волновые числа для первого и третьего слоев МК.

Для косинусоидального профіля можна получить

$$\begin{aligned}
 P_j &= [c'(0, q_{2,4}) \cdot s(t_{2,4}, q_{2,4}) - s'(0, q_{2,4}) \cdot c(t_{2,4}, q_{2,4})], \\
 Q_j &= [c(0, q_{2,4}) \cdot s(t_{2,4}, q_{2,4}) - s(0, q_{2,4}) \cdot c(t_{2,4}, q_{2,4})], \\
 P_j' &= [c'(0, q_{2,4}) \cdot s'(t_{2,4}, q_{2,4}) - s'(0, q_{2,4}) \cdot c'(t_{2,4}, q_{2,4})], \\
 Q_j' &= [c(0, q_{2,4}) \cdot s'(t_{2,4}, q_{2,4}) - s(0, q_{2,4}) \cdot c'(t_{2,4}, q_{2,4})],
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где  $c(t_{2,4}, q_{2,4})$  и  $s(t_{2,4}, q_{2,4})$  – функции Матье,  $q_{2,4} = \pm \delta^2 \Delta\beta / (\alpha\pi^2)$ ,  $t_{2,4} = \pi(z - z_{2,4}) / 2\delta$

**Результаты.** Характерный вид частотной зависимости квадрата коэффициента отражения СВ от полубесконечного МК с линейным и косинусоидальным (3) и линейным [12] профилями распределения анизотропии в переходных слоях представлен на рис. 2.

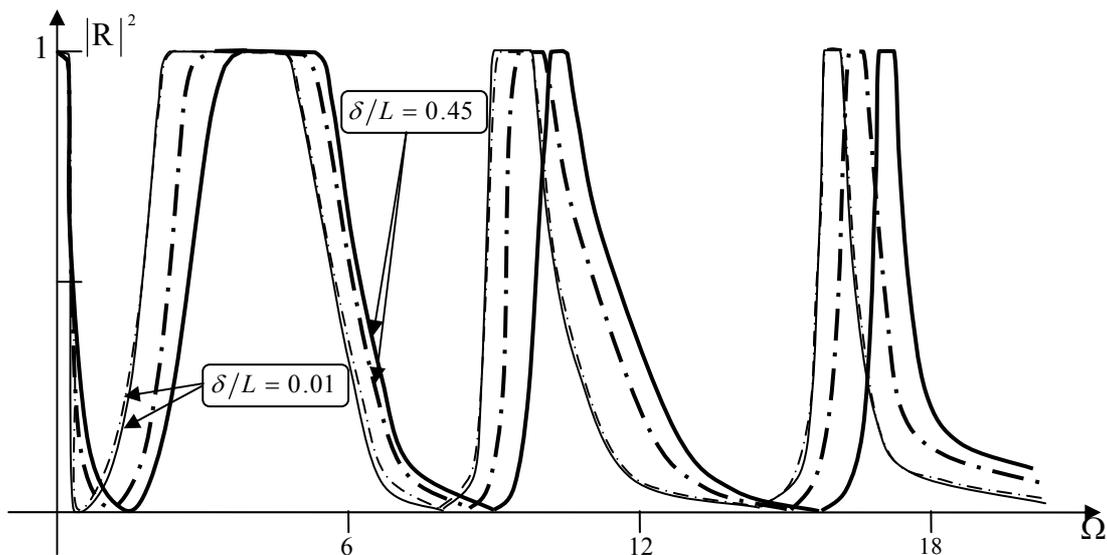


Рис. 2. Частотная зависимость квадрата коэффициента отражения для МК с линейным [12] и косинусоидальным профилем (3) межслойной границы для  $\Delta\beta = 2$ ,  $\beta_- = 3.0$ ,  $h = 0$ . Сплошные линии соответствуют линейному распределению анизотропии, штрих-пунктир – косинусоидальному.

Можно заметить, что для косинусоидального профіля так как и для линейного [12] существуют области полного отражения от полубесконечного магнетонного кристалла соответствуют частотам, совпадающим с границами запрещенных зон спектра [12]. Величина области полного отражения уменьшается с увеличением размытости. Существуют также точки нулевого отражения, что соответствует полному прохождению спиновых волн через МК.

**Выводы.** При малых значениях относительной размытости графики частотной зависимости квадрата коэффициента отражения для линейного и синусоидального профілей существенно не отличаются на всем исследуемом частотном диапазоне. Структуру межслойной границы в данном случае можно не учитывать.

Однако, при больших значениях относительной размытости, положение областей полного отражения будет зависеть от профіля межслойной границы. Для линейной и косинусоидальной модуляции области полного отражения, которые соответствуют первой запрещенной зоне спектра, частично совпадают, и на основании полученных спектральных характеристик нельзя сделать вывод о внутренней структуре исследуемого МК. Для более высоких зон для линейной и косинусоидальной модуляции области полного отражения будут отличаться. Это дает возможность по измеренному значению коэффициента отражения сделать вывод о внутренней структуре МК.

## РЕЗЮМЕ

В даній роботі досліджується частотна залежність коефіцієнтів відбиття спинових хвиль від магнетонного кристалу зі значенням одноосової анизотропії, що періодично змінюється, та кінцевою товщиною межшарових меж. Розглядається косинусоїдальний розподіл анизотропії в межшаровій межі. Проаналізовано вплив розміру межшарової межі на значення коефіцієнта відбиття.

*Ключові слова:* магнетонний кристал, спинові хвилі, періодична структура, магнетоніка.

**SUMMARY**

The frequency dependence of the coefficient of spin wave reflection from a semi-infinite magnonic crystal with a periodically modulated value of the uniaxial anisotropy and a finite thickness of interfaces has been investigated. A cosine-like distribution of the anisotropy value in the interfaces is considered. Influence of the interface size upon a reflection coefficient is analyzed.

*Keywords:* magnonic crystal, spin waves, periodic structure, magnonics.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ**

1. Nikitov S. A. Spin Waves in Periodic Magnetic Structures-Magnonic Crystals / S. A. Nikitov, P. Tailhades, C. S. Tsai // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2001. – Vol. 236, No 320. – P. 687-689.
2. Гуляев Ю. В. Магнонные кристаллы – спиновые волны в периодических структурах / Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов // Доклады РАН. – 2001. – Т. 380, № 4. – С. 469-471.
3. Stapele R. P. The spin-wave of layered magnetic thin films / R. P. Stapele, F. J. A. M. Greidanus, J. W. Smits // Journal Applied Physics. – 1985. – Vol. 57, No 4. – P. 1282-1290.
4. Кругляк В. В. Спектр спиновых волн в идеальном мультислойном магнетике при модуляции всех параметров уравнения Ландау-Лифшица / В. В. Кругляк, А. Н. Кучко, В. И. Финохин // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46, № 5. – С. 842-845.
5. Кучко А. Н. Спектр спиновых волн в магнонном кристалле со структурным дефектом / А. Н. Кучко, М. Л. Соколовский, В. В. Кругляк // Физика металлов и металловедение. – 2006. – Т. 101, № 6. – С. 565-569.
6. Ignatchenko V. A. The spectrum and damping of waves partially randomized multilayers / V. A. Ignatchenko, Yu. I. Mankov, A. A. Maradudin // Journal of physics. Condensed Matter. – 1999. – Vol. 11. – P. 2773-2790.
7. Кучко А. Н. Влияние структуры межслойных границ на спектр спиновых волн в магнонном кристалле / А. Н. Кучко, В. С. Ткаченко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2005. – Т. 27, № 9. – С. 1157-1167.
8. Ignatchenko V. A. Wave spectrum of multilayers with finite thicknesses of interfaces / V. A. Ignatchenko, Yu. I. Mankov, A. A. Maradudin // Physical review B. – 2000. – Vol. 62, No 3 – P. 2181-2184.
9. Горобец Ю. И. Отражение спиновых волн в мультислойных материалах с модулированными магнитными параметрами / Ю. И. Горобец, А. Н. Кучко, С. А. Решетняк // Физика твердого тела. – 1996. – Т. 38, № 2. – С. 575-580.
10. Решетняк С. А. Влияние обменных свойств интерфейса на отражение поверхностных спиновых волн от одноосного мультислойного ферромагнетика / С. А. Решетняк // Физика низких температур. – 2007. – Т. 33, № 1. – С. 88-92.
11. Tkachenko V. S. Spin wave reflection from semi-infinite magnonic crystals with diffuse interfaces / V. S. Tkachenko, V. V. Kruglyak, A. N. Kuchko // Metamaterials. – 2009. – Vol. 3, No 1. – P. 28-32.
12. Tkachenko V. S. Spectrum and reflection of spin waves in magnonic crystals with different interface profiles / V. S. Tkachenko, V. V. Kruglyak, A. N. Kuchko // Physical Review B. – 2010. – Vol. 81, No 2. – P. 425-433.
13. Игнатович В. К. Этюд об одномерном периодическом потенциале / В. К. Игнатович // Успехи физических наук. – 1986. – Т. 150, № 1. – С. 145-158.

*Поступила в редакцию 20.05.2010 г.*