



УДК 537.86

В. В. Витько, А. А. Никитин, А. Б. Устинов, И. А. Устинова, А. А. Семенов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Исследование влияния проводимости металлических электродов на СВЧ-свойства магнетонных кристаллов<sup>1</sup>

*Разработана теоретическая модель, описывающая распространение спиновых волн в магнетонных кристаллах, представляющих периодически металлизированные ферритовые пленки. В разработанной модели учтена конечная проводимость металлизации. Проанализировано влияние различных параметров магнетонного кристалла на его передаточные СВЧ-характеристики. Разработанная теория с высокой точностью описывает результаты эксперимента.*

### Спиновые волны, магнетонный кристалл

В настоящее время идея создания искусственных композитных материалов с периодическим изменением их волноведущих свойств представляет не только теоретический, но и практический интерес. Такие структуры принято разделять в зависимости от природы распространяющихся в них волн на фотонные (электромагнитные волны), магнетонные (спиновые волны – СВ) и фононные (акустические волны) кристаллы [1], [2]. Важной особенностью спектра волн, распространяющихся в таких кристаллах, является наличие запрещенных зон [3].

Особенно перспективными для исследования различных линейных и нелинейных СВ-явлений являются магнетонные кристаллы (МК) [4]. Такие кристаллы формируются за счет периодического изменения волноведущих свойств магнетонной пленки. Это может быть достигнуто различными способами, в частности периодической металлизацией ферритовых пленок [1], [5]. На основе МК возможно создание принципиально новых функциональных спин-волновых приборов и устройств [6]. Однако публикаций теоретической модели, описывающей влияние толщины и проводимости металла на передаточные СВЧ-характеристики таких МК, ранее в открытой печати не было.

Известно, что главным фактором, определяющим рабочие характеристики СВ-устройств, является закон дисперсии СВ [7], [8]. Устройства, основанные на распространении СВ, характери-

зуются низкими вносимыми потерями и возможностью магнетонного управления в широком частотном диапазоне.

Настоящая статья посвящена исследованию передаточных СВЧ-характеристик МК, сформированного периодической металлизацией поверхности ферритовой пленки. Для этого разработана теоретическая модель, учитывающая влияние толщины и проводимости металлических электродов.

**Дисперсионные характеристики спиновых волн в структуре "металл–феррит–диэлектрик"**. Поскольку исследуемый МК состоит из чередующихся участков металлизированной и свободной ферритовой пленки, для построения теории в первую очередь необходимо рассчитать дисперсионные характеристики СВ в структурах "металл–феррит–диэлектрик". Структура, содержащая металлизированную ферритовую пленку толщиной  $a_f$  с магнетонной проницаемостью  $\mu_f$  и намагнетонностью насыщения  $4\pi M_s$  на диэлектрической подложке толщиной  $a_d$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_d$ , показана на рис. 1. Металлический слой имеет толщину  $a_m$  и комплексную диэлектрическую проницаемость  $\hat{\epsilon}_m = 1 - i\sigma/(\epsilon_0\omega)$ , где  $\omega$  – угловая частота;  $\sigma$  – проводимость металла;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

<sup>1</sup> Работа выполнена при государственной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (№ 14-12-01296).

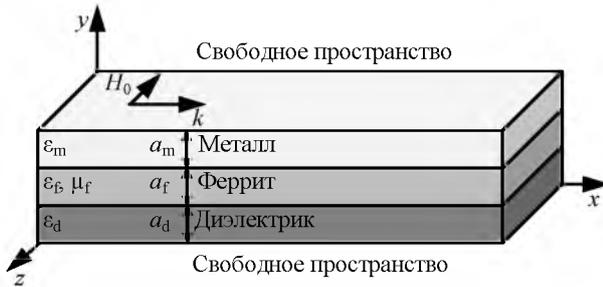


Рис. 1

Исследуемая структура бесконечна в плоскости  $xz$  и намагничена до насыщения вдоль оси  $z$ . Направление распространения СВ выбрано перпендикулярным направлению внешнего магнитного поля вдоль оси  $x$ . Такая конфигурация направления распространения и ориентации поля подмагничивания соответствует распространению поверхностных СВ.

Волновые уравнения для каждого слоя получены из уравнений Максвелла с учетом тензора магнитной проницаемости. Благодаря непрерывности вдоль оси  $z$  распространяющиеся в структуре волны можно разделить на ТЕ-волны со структурой поля  $\mathbf{E}(0,0,E_z)$ ,  $\mathbf{H}(H_x,H_y,0)$  и ТМ-волны со структурой поля  $\mathbf{E}(E_x,E_y,0)$ ,  $\mathbf{H}(0,0,H_z)$ . В [9] показано, что ТЕ-моды поверхностных электромагнитных волн и поверхностные СВ имеют схожие распределения полей, вследствие чего рассматривались только ТЕ-моды. Подстановка решений полученных волновых уравнений в стандартные электродинамические граничные условия приводит к системе из восьми однородных алгебраических уравнений с восемью неизвестными коэффициентами. Равенство нулю определителя системы позволяет найти дисперсионное уравнение, описывающее спектр СВ в структуре "металл-феррит-диэлектрик" с учетом проводимости металла.

Было проведено численное моделирование дисперсионных характеристик СВ для типичных параметров структуры, состоящей из подложки гадолиний-галлиевого граната (ГГГ), пленки железоиттриевого граната (ЖИГ) и металлизации с проводимостью металла 50...700 кСм/м. Расчет проведен при следующих параметрах:

$$a_f = 9.8 \text{ мкм}, \quad \epsilon_f = 14.4\mu M_s = 143\,398 \text{ А/м},$$

$$a_d = 500 \text{ мкм}, \quad \epsilon_d = 14, \quad a_m = 2 \text{ мкм},$$

$$H_0 = 82\,919 \text{ А/м}.$$

Результаты численного решения дисперсионного уравнения с учетом проводимости металли-

ческого слоя имеют комплексную форму, причем мнимая часть комплексного числа описывает потери, а реальная часть – дисперсию. На рис. 2 показаны результаты численного расчета дисперсионных характеристик  $f(k)$  ( $k$  – волновое число) (рис. 2, а) и зависимостей групповой скорости от частоты (рис. 2, б) для поверхностных СВ в исследуемой структуре при различных значениях проводимости металла и в свободной ферритовой пленке (1 – идеальный металл, 2 –  $\sigma = 700$  кСм/м, 3 –  $\sigma = 500$  кСм/м, 4 –  $\sigma = 300$  кСм/м, 5 –  $\sigma = 250$  кСм/м, 6 –  $\sigma = 150$  кСм/м, 7 –  $\sigma = 50$  кСм/м, 8 – свободный феррит).

Как видно из рис. 2, а, при увеличении проводимости металлического слоя дисперсионная характеристика поверхностной СВ стремится к дисперсионной характеристике СВ в феррите с идеальным металлическим экраном. Хорошо видно, что при конечной проводимости металлического слоя на дисперсионной характеристике появляется перегиб, соответствующий изменению групповой скорости (рис. 2, б). Интересной особенностью исследуемой структуры является немонотонная зависимость дисперсионной характеристики при некоторых значениях проводимости, что соответствует отрицательным значениям групповой скорости (кривая 4 на рис. 2, б). Смена знака отражает тот факт, что волна имеет прямое направление распространения при малых  $k$  и об-

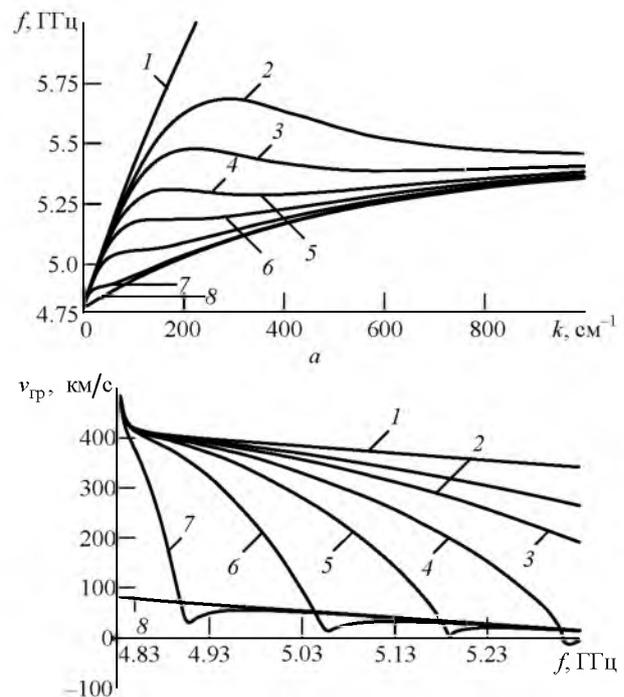


Рис. 2

ратное – при больших. Следует отметить, что при увеличении волнового числа длина волны уменьшается, что приводит к уменьшению влияния металлического слоя. Подобное поведение проявляется при приближении идеального металлического экрана к поверхности ферритовой пленки [10].

**Магнетонный кристалл.** Полученное с учетом толщины и проводимости металлического слоя дисперсионное уравнение использовано для теоретического исследования передаточных характеристик МК (рис. 3). Исследуемый МК был сформирован нанесением периодической металлизации на поверхность ферритовой пленки. Металлические электроды шириной  $d_1$  располагаются на расстоянии  $d_2$  друг от друга с периодом  $\Lambda = d_1 + d_2$ .

В качестве способа описания волноведущих свойств металлизированного МК был выбран аппарат волновых матриц передачи [11], позволяющий численно рассчитать передаточные характеристики периодических структур конечной длины с учетом потерь на распространение.

Разработанная теоретическая модель легла в основу численного моделирования передаточных характеристик исследуемого МК. Важно отметить, что частотное положение запрещенных зон в спектре СВ зависит от параметров металлических полосок и периода металлизации, а также параметров ферритовой пленки, значения и направления внешнего магнитного поля.

Для проверки соответствия разработанной модели действительности проведено экспериментальное исследование МК. Кристалл сформирован на основе пленки ЖИГ толщиной  $a_f = 9.8$  мкм на подложке ГГГ толщиной  $a_d = 500$  мкм. Полуширина линии ферромагнитного резонанса полученной пленки ЖИГ составила  $\Delta H = 0.4$  Э на частоте 5 ГГц. Были созданы экспериментальные образцы с 8 медными полосками с периодом  $\Lambda = 600$  мкм и 16 медными полосками с периодом  $\Lambda = 300$  мкм. Удельное сопротивление металлических полосок составило  $0.1$  мкОм·см.

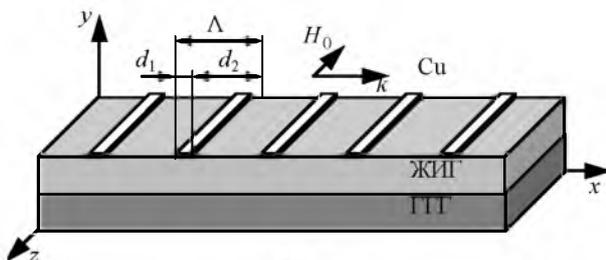


Рис. 3

Каждая полоска имела ширину  $d_1 = 25$  мкм и толщину  $a_m = 2$  мкм. Возбуждение и детектирование СВ осуществлялось двумя микрополосковыми антеннами шириной 50 мкм и длиной 3 мкм, установленными на расстоянии 7.75 мм друг от друга. Параметры экспериментальных структур были выбраны таким образом, чтобы на передаточных характеристиках располагалось несколько запрещенных зон, обусловленных брэгговским отражением СВ. Напряженность внешнего магнитного поля  $H_0$  и намагниченность насыщения  $4\pi M_s$  соответствовали приведенным ранее значениям.

Сравнение результатов численного моделирования и экспериментального исследования представлено на рис. 4 ( $a$  – 8 полосок с периодом  $\Lambda = 600$  мкм,  $b$  – 16 полосок с периодом  $\Lambda = 300$  мкм). Результаты эксперимента показаны сплошными линиями, штриховыми – результаты моделирования МК с проводимостью металла  $\sigma = 98$  кСм/м, а штрихпунктирными линиями – с идеальными металлическими полосками.

Вид приведенных зависимостей можно объяснить следующим образом. Распространяющаяся в МК на частотах, близких к частотам запрещенных зон, СВ испытывает брэгговское отражение и по мере распространения в периодической структуре затухает, передавая энергию отраженным волнам. В случае бесконечного МК падающая волна должна полностью отразиться на ча-

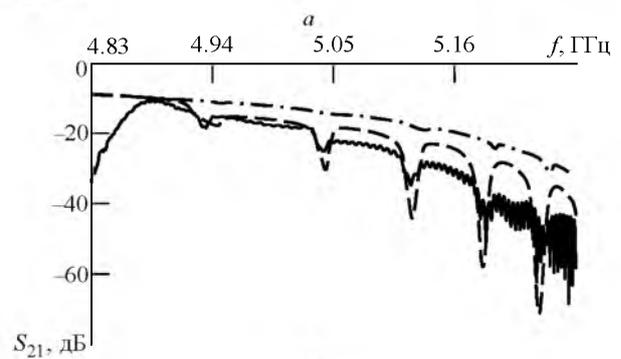
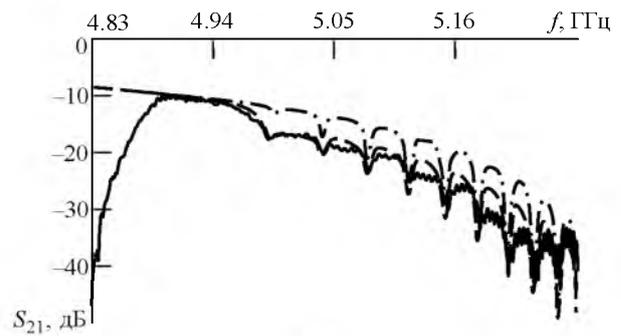


Рис. 4

стотах брэгговского резонанса. На передаточной характеристике бесконечного МК это проявляется в виде запрещенных зон, распространение СВ на которых невозможно [5]. Однако, как видно из рис. 4, в случае МК конечной длины вместо разрывов на передаточной характеристике на частотах запрещенных зон имеются зоны с относительно большими, но конечными вносимыми потерями. Отметим, что увеличение числа периодов металлизации приводит к увеличению вносимых потерь. Уменьшение протяженности периода ведет к увеличению частотного диапазона между запрещенными зонами (с 46 до 106 МГц). Учет проводимости позволяет описать экспериментальные зависимости с большей точностью, что обусловлено особенностями дисперсионных ха-

рактеристик СВ в металлизированных ферритовых слоях (см. рис. 2).

В заключение отметим, что разработанная теоретическая модель может быть использована для исследования широкого круга задач, связанных с распространением СВ в периодически металлизированных МК. В работе, результаты которой отражены в настоящей статье, получено дисперсионное уравнение СВ с учетом проводимости металла. Проведено численное моделирование передаточных характеристик с учетом потерь на распространение в ферритовом и металлическом слоях. Выполнено сравнение результатов численного моделирования и экспериментального исследования, которое подтвердило адекватность разработанной теоретической модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Theory and Phenomena of Metamaterials / ed. by F. Capolino. Florence: CRC Press, 2009. 926 p.
2. Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals / ed. by P. A. Deymier. Berlin: Springer, 2014. 378 p.
3. Photonic-Magnonic Crystals: Multifunctional Periodic Structures for Magnonic and Photonic Applications / J. W. Klos, M. Krawczyk, Yu. S. Dadoenkova et al. // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115. P. 174311.
4. Krawczyk M., Grundler D. Review and Prospects of Magnonic Crystals and Devices with Reprogrammable Band Structure // J. of Physics: Condensed Matter. 2014. Vol. 26, № 12. P. 123202.
5. Demokritov S. O., Slavin A. N. Magnonics: From Fundamentals to Applications. Berlin: Springer, 2012. 200 p.
6. Никитов С. А., Филимонов Ю. А., Высоцкий С. Л. Физические основы фильтрации СВЧ-сигналов с использованием магнонных кристаллов // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2008. Вып. 5. С. 78–86.
7. Damon R. W., Van De Vaart H. Propagation of Magnetostatic Spin Waves at Microwave Frequencies in a Normally-Magnetized Disk // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36, № 11. P. 3453–3459.
8. Kalinikos B. A. Excitation of Propagating Spin Waves in Ferromagnetic Films // IEE Proc. 1980. Vol. 127, Pt. H, № 1. P. 4–10.
9. Electric Field Tunable Ferrite-Ferroelectric Hybrid Wave Microwave Resonators: Experiment and Theory / A. B. Ustinov, V. S. Tiberkevich, G. Srinivasan et al. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. P. 093905(1–7).
10. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
11. Zhi-Yuan Li, Lan-Lan Lin. Photonic Band Structures Solved by a Plane-Wave-Based Transfer-Matrix Method // Phys. Rev. E. 2003. Vol. 67. P. 046607.

V. V. Vitko, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov, I. A. Ustinova, A. A. Semenov  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

### Investigation of spin waves in metallized magnonic crystal

*Theoretical model for the ferrite spin-wave magnonic crystals has been developed. A considered magnonic crystal has a construction of periodically metallized thin ferrite film. An influence of various magnonic crystal parameters on its transmission-loss characteristic was analyzed. It is shown that a developed model described with high accuracy the microwave transmission-loss characteristics.*

Spin waves, magnonic crystal

Статья поступила в редакцию 29 марта 2016 г.