

**Никитин А.А., Витько В.В., Никитин А.А.,
Устинов А.Б., Семенов А.А.**
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

Эффективная электрическая перестройка электромагнитно-спиновых волн в тонкопленочных планарных мультиферроидных структурах

Представлено теоретическое исследование электрической перестройки дисперсионных характеристик электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ), распространяющихся перпендикулярно направлению статической намагниченности в тангенциально намагниченных тонкопленочных мультиферроидов. Исследуемая структура состояла из двух тонких ферритовых слоев, разделенных тонкой сегнетоэлектрической пленкой. Были изучены особенности формирования спектра ЭМСВ, образованного за счет двойной гибридизации электромагнитной и двух спиновых мод. Следствием этого является значительное улучшение электрической управляемости дисперсионных характеристик рабочих волн.

Ключевые слова: Мультиферроики, электромагнитно- спиновые волны.

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к изучению композиционных материалов для их возможных применений в СВЧ микроэлектронике. В этой области одним из перспективных направлений исследований являются искусственные мультиферроидные структуры, полученные путем комбинации ферритовых и сегнетоэлектрических материалов. Рабочие характеристики устройств на основе таких структур обладают двойной (электрической и магнитной) перестройкой, а также демонстрируют малые вносимые потери и малое энергопотребление.

Магнитоэлектрическое взаимодействие между ферромагнитной и сегнетоэлектрической фазами мультиферроика обусловлено электродинамическим эффектом, возникающим между спиновыми и электромагнитными волнами в слоистых феррит-сегнетоэлектрических структурах. Это взаимодействие приводит к формированию электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ) [1]. Как было отмечено ранее, спектр этих волн является управляемым как с помощью электрического, так и магнитного полей. Электрическая перестройка спектра ЭМСВ возможна благодаря зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от приложенного электрического поля. В свою очередь магнитная перестройка реализуется за счет зависимости магнитной проницаемости феррита от внешнего магнитного поля.

Слоистые феррит-сегнетоэлектрические структуры были предложены в работе [2] для разработки электрически управляемых СВЧ-устройств. Полная электродинамическая теория гибридных ЭМСВ, распространяющихся в слоистой структуре металл – сегнетоэлектрик – ферромагнетик – диэлектрик – металл, для произвольного направления магнитного поля смещения была разработана Демидовым и др. [1,3,4]. Было показано, что степень гибридизации определяется степенью перекрытия электромагнитных полей электромагнитной и спиновой волн, что в свою очередь обусловлено геометрией слоистой

структуры и параметрами материалов.

До настоящего момента высокая активность исследований была направлена на изучение волновых процессов в слоистых мультиферроидных структурах, состоящих из одного ферритового и одного сегнетоэлектрического слоев [1-8]. Дальнейший прогресс в области мультиферроидных устройств с двойной электронной перестройкой рабочих характеристик может быть достигнут с использованием гетероструктур феррит-сегнетоэлектрик-феррит [9, 10]. Одним из главных преимуществ таких структур заключается в управляемом магнитодипольном взаимодействии спиновых волн в ферритовых слоях. Путем изменения диэлектрической проницаемости промежуточного сегнетоэлектрического слоя спектр ЭМСВ в исследуемой структуре формируется за счет взаимодействия двух спиновых и одной электромагнитной мод. При этом реализуются две ситуации, схематически изображенные на рис. 1. Рассмотрим процесс гибридизации подробнее. Условно будем считать, что в точке в точке I реализуется первая гибридизация двух спиновых мод, дисперсионные характеристики которых показаны прерывистыми линиями. Вторая гибридизация спиновых и электромагнитной мод может иметь место в той же точке I или в других точках (т.е. в точках II и III) в зависимости от параметров структуры (см. рис. 1). В дальнейшем первую ситуацию, при которой все моды пересекаются в одной точке, будем называть “двойной гибридизацией”.

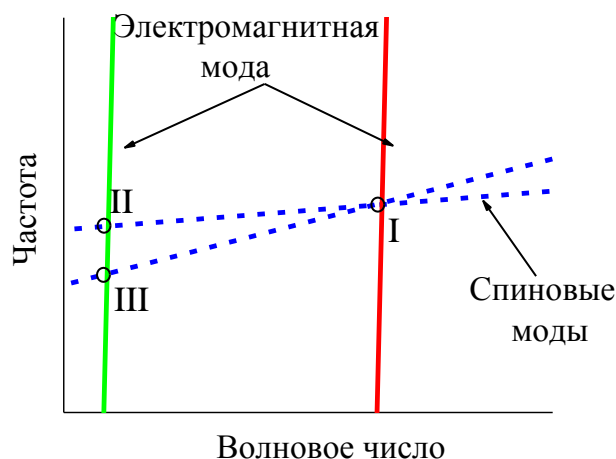


Рис. 1. Качественный рисунок, показывающий возможное взаимное расположение двух спиновых мод (прерывистые линии) и электромагнитной моды (сплошные линии).

Таким образом, целью настоящей работы является теоретическое исследование спектров ЭМСВ, сформированных за счет двойной гибридизации. В этом случае можно реализовать эффективную перестройку дисперсионных характеристик ЭМСВ в тонкопленочных мультиферроидных структурах.

На рис. 2 изображена исследуемая тонкопленочная мультиферроидная структура. Ферритовые пленки имеют толщину a_2 и a_4 , а также намагниченность насыщения M_2 и M_4 . Толщины сегнетоэлектрической пленки и диэлектрических слоев соответственно равны a_3 , a_1 , и a_5 . Диэлектрические свойства магнитных и диэлектрических слоев описываются скалярной диэлектрической проницаемостью ϵ_i , где i – это номер слоя. Стоит отметить, что исследуемая структура бесконечна в плоскости xz и намагничена до насыщения вдоль оси z , а дисперсионное соотношение, описывающее спектр ЭМСВ в исследуемых структурах, было получено с помощью метода волновых матриц передачи [11].

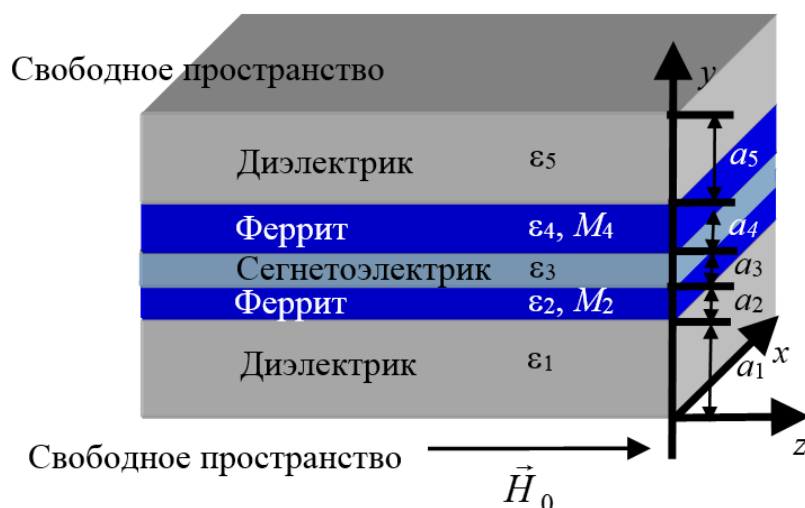


Рис. 2. Тонкопленочная мультиферроидная структура.

На рис. 3 сплошными линиями изображена дисперсионная характеристика ЭМСВ в исследуемой структуре. Ферритовые слои имели разные толщины и намагниченности насыщения, что обеспечивает пересечение спиновых и электромагнитных мод в одной точке. Таким образом, для реализации двойной гибридации ЭМСВ намагниченность насыщения нижнего феррита была выбрана меньшей, чем у верхнего ферритового слоя. В этом случае пересечение спиновых мод реализуется для волнового числа $k = 1.75$ рад/см. Численные расчеты проводились для следующих параметров: $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_4 = \epsilon_5 = 14$, $\epsilon_3 = 1500$, $a_1 = a_5 = 500$ мкм, $a_2 = 20$ мкм, $a_3 = 1$ мкм, $a_4 = 6$ мкм, $M_2 = 1750$ Гс (139260 А/м), $M_4 = 1713$ Гс (136316 А/м).

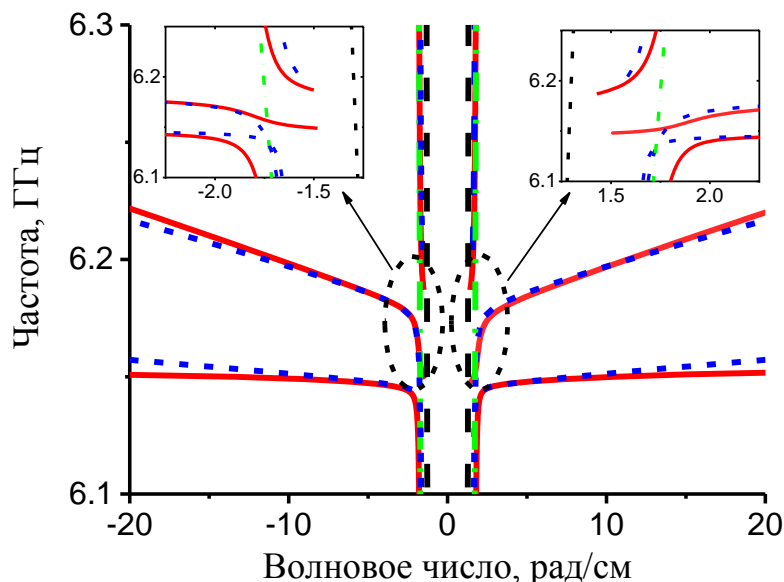


Рис. 3. Спектр ЭМСВ (сплошные линии). Штрихпунктирные линии показывают электромагнитную моду TE_1 . Короткие пунктирные линии - спектр ЭМСВ для ферритовых пленок (т.е. для $\epsilon_3=1$). Пунктирные линии представляют зависимость $\omega=ck$, где c – скорость света в вакууме.

Спектр ЭМСВ состоит из трех дисперсионных ветвей, которые в дальнейшем будут называться нижней, средней и верхней ветвями. Такой спектр формируется в результате

электродинамического взаимодействия электромагнитной моды TE_1 и двух спиновых мод. В данном случае магнитодипольное взаимодействие между ферритовыми слоями играет существенную роль в формировании спектра ЭМСВ из-за малой толщины промежуточного сегнетоэлектрического слоя a_3 . Как видно из рис. 3, имеет место достаточно сильное расталкивание между всеми ветвями ЭМСВ, распространяющихся в прямом и обратном направлениях (положительные и отрицательные волновые числа). Такое поведение спектра ЭМСВ обусловлено магнитодипольным взаимодействием вблизи $k = 1.7$ рад/см. Также отметим, что вдали от точки гибридизации (при больших k) дисперсионные ветви ЭМСВ стремятся к дисперсии свободной спин-волновой моды.

Изменение волнового числа ЭМСВ Δk было посчитано для случая уменьшения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя ϵ_3 в два раза. Результаты показаны на рис. 4 сплошными, пунктирными и штрихпунктирными линиями для нижней, средней и верхней дисперсионных ветвей ЭМСВ, соответственно. Численное моделирование проводилось при тех же параметрах, что и для рис. 3.

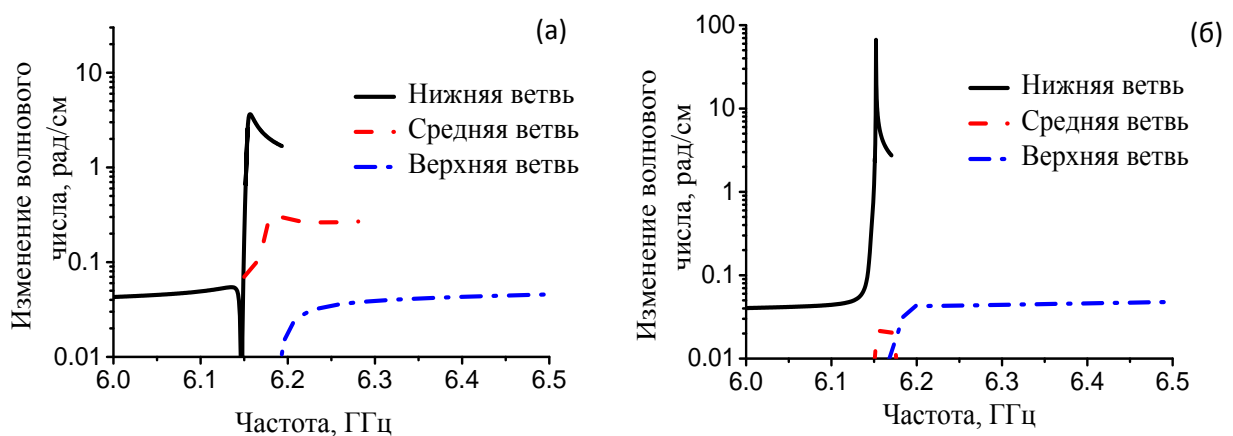


Рис. 4. Зависимость волнового числа для нижней, средней и верхней дисперсионных ветвей ЭМСВ от частоты, посчитанная для положительных (а) и отрицательных (б) волновых чисел.

Как видно из рис. 4 (б), эффективная электрическая перестройка волновых чисел ЭМСВ до 66.8 рад/см достигается для нижней дисперсионной ветви при отрицательных волновых числах, что может быть объяснено следующим образом. Поперечные распределения магнитостатического потенциала для поверхностных спиновых волн с положительными k имеют максимумы на нижних поверхностях магнитных пленок. Однако для обратного направления распространения волн эти распределения имеют максимумы на верхних поверхностях [12]. Таким образом, максимумы расположены ближе друг к другу для отрицательных k , что приводит к увеличению перекрытия переменных электрических и магнитных полей спиновых волн, распространяющихся в соседних магнитных пленках, и, следовательно, к усилению связи всех волн. В результате групповая скорость нижней ветви ЭМСВ значительно уменьшается, и эта ветвь демонстрирует сильную электрическую перестройку волновых чисел в относительно узком диапазоне частот.

Другими словами, в случае двойной гибридизации волн обусловлена изменением магнитодипольного взаимодействия между ферритовыми пленками путем изменения диэлектрической проницаемости ϵ_3 тонкой сегнетоэлектрической пленки. Уменьшение ϵ_3 можно рассматривать как уменьшение эффективного расстояния между магнитными пленками, приводящее к увеличению связи спиновых волн, распространяющихся в магнитных пленках.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-9296.2016.2).

Библиографический список

1. V.E. Demidov, B.A. Kalinikos, and P. Edenhofer, "Dipole-exchange theory of hybrid electromagnetic-spin waves in layered film structures," *J. Appl. Phys.*, vol. 91, pp. 10007-10016, Jun. 2002.
2. V.B. Anfinogenov, T.N. Verbitskaya, P.E. Zil'berman, G.T. Kazakov, and V.V. Tikhonov, "Resonant interaction of magnetostatic and slow electromagnetic waves in a composite medium," *Sov. Tech. Phys. Lett.*, vol. 12, pp. 389-391, 1986.
3. V.E. Demidov and B.A. Kalinikos, "Green's tensor of the Maxwell equations for a planar metal-dielectric-ferromagnet-dielectric-metal sandwich structure," *Tech. Phys. Lett.*, vol. 26, pp. 729-733, 2000.
4. N.X. Sun and G. Srinivasan, "Voltage control of magnetism in multiferroic heterostructures and devices," *SPIN*, vol. 2, p. 1240004, Nov. 2012.
5. M.M. Vopson, "Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications," *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 40, pp. 223-250, Mar. 2015.
6. C. Lu, W. Hu, Y. Tian, and T. Wu, "Multiferroic oxide thin films and heterostructures," *Applied physics reviews*, vol. 2, p. 021304, May 2015.
7. Hu, J. M., Chen, L. Q., & Nan, C. W. "Multiferroic heterostructures integrating ferroelectric and magnetic materials," *Advanced Materials*, vol. 28, pp. 15-39, Nov. 2016.
8. A.V. Sadovnikov, et al. "Nonreciprocal propagation of hybrid electromagnetic waves in a layered ferrite-ferroelectric structure with a finite width," *JETP letters*, vol. 102, pp 142-147, Jun. 2015.
9. M.A. Morozova, O.V. Matveev, Y.P. Sharaevskii, and S.A. Nikitov, "Tuning the bandgaps in a magnonic crystal-ferroelectric-magnonic crystal layered structure," *Physics of the Solid State*, vol. 58, pp. 273- 279, Feb. 2016.
10. V.V. Vitko, et al. "Electric-field tuning of spin-electromagnetic wave dispersion in ferrite-ferroelectric multilayers," 45th European Microwave Conference, pp. 1073-1076, 2015.
11. V.V. Vitko, et al. "Electric-field tuning of spin-electromagnetic wave dispersion in ferrite-ferroelectric multilayers," 45th European Microwave Conference, pp. 1073-1076, 2015.
12. D.D. Stancil, A. Prabhakar, "*Spin Waves: Theory and Applications*", Springer, 330 p, 2009.