

*Никитин Ал.А., Никитин Ан.А., Устинов А. Б.,
Калиникос Б. А.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»*

Исследование двойной электронной управляемости передаточных характеристик электромагнного кристалла на копланарной линии передачи

Представлены результаты теоретических исследований «электромагнных кристаллов» – периодических многослойных гетероструктур, содержащих копланарную линию передачи с периодическим изменением ее ширины. Передаточные характеристики исследуемых гетероструктур были рассчитаны методом волновых матриц передачи. Полученные результаты показывают, что передаточные характеристики исследуемых структур на частотах, определяемых условием Вульфа — Брэгга, характеризуются эффективным подавлением СВЧ-сигнала более 30 дБ. Отличительными чертами предложенных периодических гетероструктур являются планарная топология и эффективная двойная (электрическая и магнитная) перестройка запрещенных зон.

Ключевые слова: Электромагнный кристалл, мультиферроики, электромагнитно- спиновые волны, копланарная линия передачи.

Интенсивное развивающиеся телекоммуникационные системы испытывают потребность в перестраиваемых, надежных и недорогих компонентах, основанных на композиционных материалах. В качестве таких материалов широко применяются искусственные мультиферроидные структуры, сочетающие как ферромагнитную, так и сегнетоэлектрическую фазы. Такие материалы обладают двойной (электрической и магнитной) управляемостью своих физических свойств [1, 2]. Один из возможных механизмов взаимодействия ферромагнитной и сегнетоэлектрической фаз реализуется посредством электродинамической связи спиновых волн (СВ) и электромагнитных волн (ЭМВ). Эти связанные возбуждения известны как гибридные электромагнитно-спиновые волны (ЭМСВ) [3].

Повышенный научный интерес к разработке и исследованию СВЧ-устройств на основе мультиферроиков обусловлен совокупностью их преимуществ: двойная перестройка рабочих характеристик, малые вносимые потери, низкое энергопотребление и др. В последнее время, изучение нового класса устройств, сочетающих особенности мультиферроиков и пространственно-периодическую структуру, стало перспективным направлением развития СВЧ микроэлектроники. Для того, чтобы акцентировать разницу между периодическими мультиферроидными структурами и известными магннными [4,5] или фотонными [6] кристаллами, будем называть их искусственными электромагнными кристаллами (ЭМК).

Мультиферроидные периодические структуры обладают электрической и магнитной перестройкой запрещенных зон в спектре ЭМСВ. Первый прототип электромагнного кристалла состоял из тонкопленочного магннного кристалла и сегнетоэлектрической керамики [7], что послужило импульсом для ряда теоретических и экспериментальных

работ [8] - [10] по данной тематике. Стоит отметить, что исследуемые структуры были изготовлены с использованием относительно толстых (более 100 мкм) сегнетоэлектрических слоев для обеспечения эффективной гибридизации СВ и ЭМВ на СВЧ частотах. В результате для достижения эффективной электрической настройки спектров ЭМСВ в периодических мультиферроидных структурах было необходимо использовать относительно высокое управляющее напряжение до 1000 В. Для снижения этого напряжения, были предложены тонкопленочные мультиферроидные гетероструктуры в сочетании с узкими щелевыми или копланарными линиями передачи (ЛП) [11] - [13]. Однако до сих пор исследовались периодические мультиферроидные структуры, содержащие щелевую ЛП. Таким образом, целью настоящей работы является теоретические исследования передаточных характеристик нового тонкопленочного электромагнитного кристалла, содержащего копланарный волновод.

Исследуемая структура ЭМК показана на рисунке 1. Она состоит из нескольких слоев, обозначенных индексом j , а именно сапфировой подложки ($j = 1$), сегнетоэлектрической пленки титаната бария стронция (БСТ) ($j = 2$), эпитаксиальной пленки железоиттриевого граната (ЖИГ) ($j = 3$) и подложки гадолиний-галлиевого граната ($j = 4$). Периодические сегменты копланарной ЛП формируют тонкопленочный ЭМК. Центральный металлический электрод имеет ширину h . Копланарная линия расположена в плоскости xz между сегнетоэлектрическим и ферритовым слоями. Сегменты узких w_1 и широких w_2 щелей образуют период Λ . Управляющее напряжение U , приложенное к электродам копланарной ЛП, обеспечивает снижение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки ε_2 и, следовательно, реализует электрическую перестройку рабочих характеристик. ЭМСВ распространяются вдоль оси x , т. е. вдоль исследуемой структуры, которая намагничена до насыщения однородным магнитным полем H вдоль оси z .

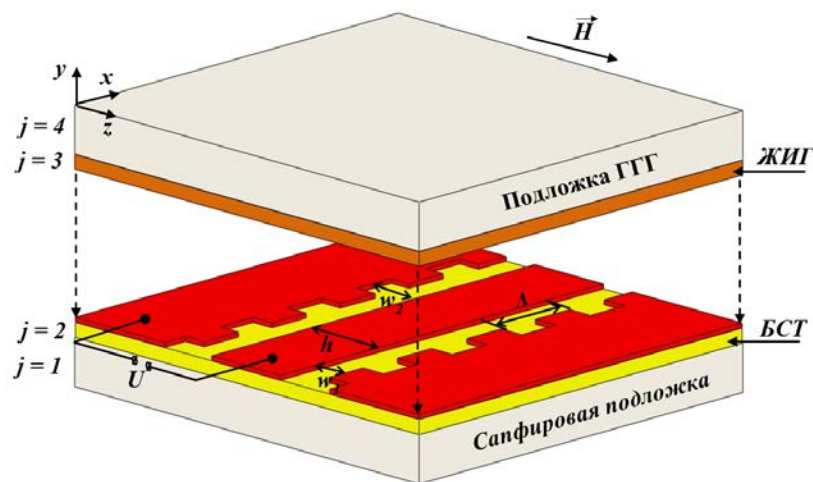


Рис. 1. Электромагнитный кристалл с копланарной ЛП.

Моделирование рабочих характеристик исследуемых структур проводилось в два этапа. На первом этапе дисперсионные соотношения ЭМСВ, распространяющихся в регулярной копланарной ЛП, были найдены путем аналитического решения полной системы уравнений Максвелла с использованием метода приближенных граничных условий [13]. На втором этапе передаточные характеристики периодической мультиферроидной структуры были найдены в соответствии с методом волновых матриц передачи [14]. Для моделирования были выбраны параметры, соответствующие экспериментальным структурам на основе пленок ЖИГ и БСТ: толщины $L_1 = L_4 = 500$ мкм,

$L_2 = 2$ мкм, $L_3 = 10$ мкм; диэлектрические проницаемости, $\epsilon_1 = 10$, $\epsilon_2 = 1500$, $\epsilon_3 = \epsilon_4 = 14$, намагниченность насыщения $M_0 = 1750$ Гс, $H = 1350$ Э, $h = 50$ мкм, $w_1 = 25$ мкм, $w_2 = 75$ мкм.

На рис. 2а показаны дисперсионные характеристики ЭМСВ, распространяющихся в неперриодической мультиферроидной структуре с копланарной ЛП при ширине зазора $w = 25$ мкм (красная пунктирная линия) и $w = 75$ мкм (черная сплошная линия). Уменьшение w смещает дисперсионную характеристику в область более высоких волновых чисел. Следовательно, ЭМСВ на фиксированной частоте накапливают различные фазовые набег в узких и широких сегментах периодической структуры, что и приводит к образованию запрещенных зон на передаточной характеристике ЭМК (см. рис. 2б). В расчетах было принято, что период электромагнитного кристалла составлял $\Lambda = 1$ мм; длина сегментов с узкими и широкими зазорами равны $\Lambda/2$; число периодов – $T = 10$. Для реализации эффективной электрической перестройки передаточной характеристики, параметры исследуемого электромагнитного кристалла были выбраны таким образом, чтобы первая запрещенная зона располагалась в области эффективной гибридизации ЭМВ и СВ на частоте 5,86 ГГц (см. рис. 2).

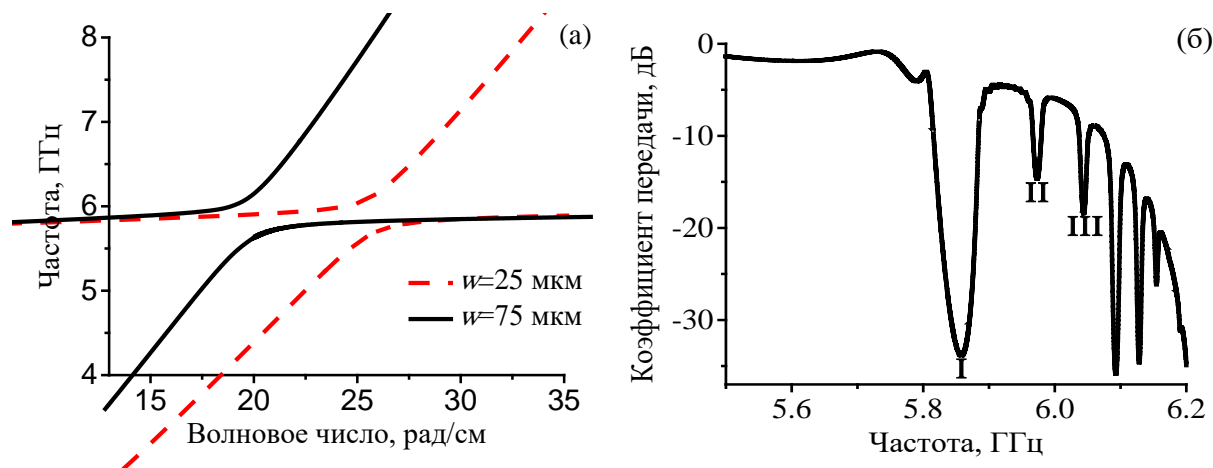


Рис. 2. а) Дисперсионные характеристики ЭМСВ, распространяющихся в неперриодическом волноводе с шириной зазора $w = 25$ мкм (красная пунктирная линия) и $w = 75$ мкм (черная сплошная линия). б) Передаточная характеристика электромагнитного кристалла с копланарной ЛП.

Как видно из рис. 2б, ширина первой запрещенной зоны I, измеренной на уровне 3 дБ от максимального уровня потерь, равного 33 дБ, составляет 24,6 МГц. Ширина запрещенных зон более высокого порядка и расстояние между ними уменьшаются вследствие уменьшения групповой скорости ЭМСВ с увеличением частоты.

Рассмотрим теперь электрическую и магнитную перестройку передаточных характеристик исследуемого ЭМК. Управляющее напряжение U , приложенное к электродам копланарной ЛП, приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки ϵ_2 . Заметим, что из-за различной ширины w_1 и w_2 электрическое поле отличается на разных сегментах копланарной ЛП и равняется $E_{1,2} = U / w_{1,2}$. Выражение, аппроксимирующее зависимость диэлектрической проницаемости БСТ от управляющего напряжения U , имеет вид:

$$\epsilon_2(E_{1,2}) = \epsilon_2(0) - a \cdot E_{1,2}^2, \quad (1)$$

где $\epsilon_2(0) = 1500$ и $a = 0.194 \text{ см}^2/\text{кВ}^2$ [15].

Увеличение управляющего напряжения обеспечивает смещение запрещенных зон в область более высоких частот. На рис.3а показано смещение по частоте первых четырех запрещённых зон при изменении управляющего напряжения от 50 В до 200 В.

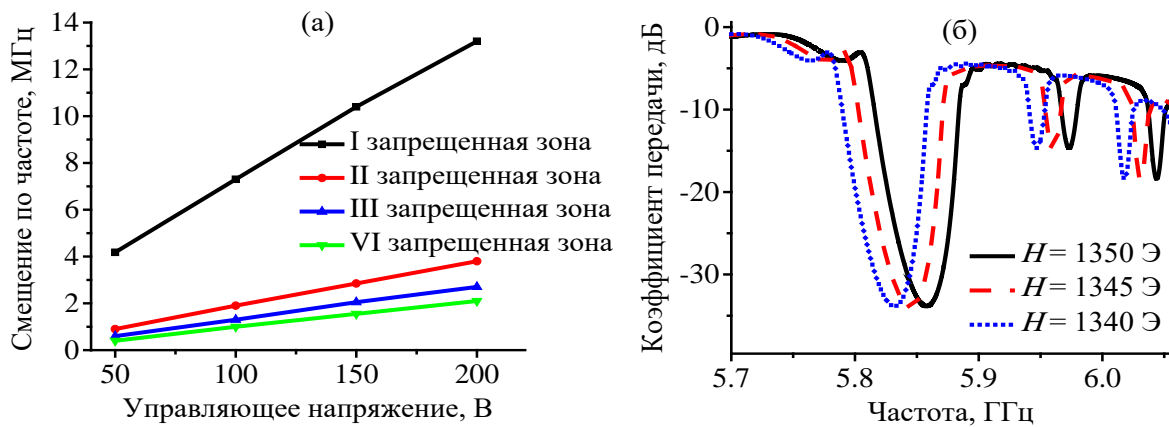


Рис. 3. Электрическая (а) и магнитная (б) перестройка передаточных характеристик.

Из рис. 3а видно, что увеличение управляющего напряжения смещает первую запрещенную зону на 13,2 МГц при $U = 200$ В. Такое поведение передаточной характеристики можно объяснить следующим образом. Известно, что при уменьшении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика спектр ЭМСВ смещается в область более низких волновых чисел. В то же время, запрещенные зоны на передаточной характеристике формируются в соответствии с условием Вульфа — Брэгга $k_{\pi} = n\pi / \Lambda$, где n – номер запрещенной зоны, а, следовательно, значения волновых чисел, соответствующие максимумам отражения, остаются неизменными. Поэтому в случае уменьшения ϵ_2 это условие будет удовлетворяться на более высоких частотах. Отметим, что диапазон электрической перестройки снижается для запрещенных зон более высокого порядка, что объясняется уменьшением эффективности гибридизации СВ и ЭМВ при увеличении частоты (см. рис. 2а).

Теперь перейдем к анализу магнитной перестройки. Передаточные характеристики моделировались для разных значений внешнего магнитного поля H (см. рис. 3б): 1340 Э (сплошная линия), 1345 Э (пунктирная линия) и 1350 Э (пунктирная линия). Как видно из данного рисунка, увеличение внешнего магнитного поля приводит к изменению положения запрещенных зон по частоте вследствие смещения спектра ЭМСВ в сторону более высоких частот.

Таким образом, были исследованы новые ЭМК, выполненные на копланарной ЛПП. В частности, было показано, что периодические структуры характеризуются высоким подавлением СВЧ сигнала более чем на 30 дБ. Также было продемонстрировано эффективное электрическое управление передаточными характеристиками исследуемого ЭМК. Напряжения смещения в 200 В, приложенное к сегнетоэлектрической пленке толщиной 2 мкм, приводит к смещению первой запрещенной зоны на 13,2 МГц. Все эти преимущества делают этот вид ЭМК перспективным для разработки новых СВЧ устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 14-12-01296-Р).

1. M. M. Vopson, "Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications," *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 40(4), pp. 223-250, Mar. 2015.
2. M. Zhu et al., "Advances in magnetics epitaxial multiferroic heterostructures and applications," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53(10), pp. 1-16, Oct. 2017.
3. 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(12), pp. 10007-10016, Jun. 2002.
4. M. Krawczyk, D. Grundler, "Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure," *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 26, p. 123202, March 2014.
5. A. V. Chumak, A. A. Serga and B. Hillebrands, "Magnonic crystals for data processing," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 50, p. 244001, May 2017.
6. K. Sakoda, *Optical properties of photonic crystals* (Springer, Heidelberg, 2014).
7. A. B. Ustinov and B. A. Kalinikos, "Multiferroic periodic structures based on magnonic crystals for electronically tunable microwave devices," *Tech. Phys. Lett.*, vol. 40(7), pp. 568-570, Jul. 2014.
8. A. V. Drozdovskii et al., "Theoretical analysis of microwave properties of ferrite-ferroelectric magnonic crystals." *Tech. Phys.*, vol. 59(7), pp. 1032-1035, Jul. 2014.
9. F. Brandl et al., "Spin waves in CoFeB on ferroelectric domains combining spin mechanics and magnonics," *Solid State Commun.*, vol. 198, pp. 13-17, Nov. 2014.
10. M. A. Morozova et al., "Tuning the bandgaps in a magnonic crystal–ferroelectric–magnonic crystal layered structure," *Phys. Solid State*, vol. 58, pp. 273-279, Feb. 2016.
11. W. J. Kim et al., "Electrically and magnetically tunable microwave device using (Ba, Sr) TiO₃/Y₃Fe₅O₁₂ multilayer," *Appl. Phys. A*, vol. 71(1), pp. 7-10, Jun. 2000.
12. J. H. Leach et al., "Electrically and magnetically tunable phase shifters based on a barium strontium titanate-yttrium iron garnet layered structure," *J. Appl. Phys.*, vol. 108(6), p. 064106, Sep. 2010.
13. A. A. Nikitin et al., "Dispersion characteristics of spin-electromagnetic waves in planar multiferroic structures," *J. Appl. Phys.*, vol. 118(18), p. 183901, Nov. 2015.
14. A. V. Chumak, et al. "Design and optimization of one-dimensional ferrite-film based magnonic crystals." *J. Appl. Phys.*, vol. 105(8), p. 083906, Apr. 2009.
15. A. B. Ustinov, G. Srinivasan, and B. A. Kalinikos, "Ferrite-ferroelectric hybrid wave phase shifters," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90(3), p. 031913, Jan. 2007.