



УДК 537.86

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

## Исследование волновых процессов в феррит-сегнетоэлектрическом магнетонном кристалле на щелевой линии передачи<sup>1</sup>

*Исследованы сверхвысокочастотные свойства феррит-сегнетоэлектрического магнетонного кристалла на щелевой линии передачи. Рассчитаны дисперсионные и передаточные характеристики электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в такой структуре. Исследовано влияние различных параметров волноведущей структуры на СВЧ-свойства феррит-сегнетоэлектрического магнетонного кристалла, в частности показаны электрическая перестройка передаточных характеристик в диапазоне 2.8 МГц под действием электрического напряжения 200 В и магнитная перестройка в диапазоне 89 МГц при изменении внешнего магнитного поля в диапазоне от 1325 до 1350 Э.*

### Феррит, сегнетоэлектрик, магнетонный кристалл

Искусственные кристаллы представляют собой особый класс материалов, в которых периодическая модуляция волноведущих свойств позволяет реализовать запрещенные зоны в спектре рабочих волн. В зависимости от волнового процесса такие структуры разделяют на фотонные кристаллы для электромагнитных волн (ЭМВ) [1], магнетонные кристаллы (МК) для спиновых волн (СВ) [2], [3] и т. д. Наличие запрещенных зон в таких структурах обусловлено брегговским резонансом, возникающим вследствие отражения волн от границ участков с различными волновыми сопротивлениями. Для создания управляемых кристаллов необходимо использовать материалы, свойства которых меняются под действием внешних полей. В случае фотонных кристаллов таким материалом является сегнетоэлектрик, диэлектрическая проницаемость которого уменьшается под действием электрического поля. В случае МК дисперсия рабочих СВ определяется напряженностью внешнего магнитного поля, что позволяет перестраивать положение запрещенных зон. Наиболее часто в качестве "активного" материала в МК используются монокристаллические пленки железоиттриевого граната (ЖИГ), что обусловлено низкими потерями на распространение СВ – менее 30 дБ/мкс [4].

Комбинации ферритовых и сегнетоэлектрических материалов позволяют реализовать мультиферроидные структуры с двойным электронным управлением, сочетающие преимущества обоих типов материалов. Собственными волнами в таких структурах являются электромагнитно-спиновые волны (ЭМСВ), образованные в результате гибридизации ЭМВ, распространяющихся в сегнетоэлектрическом слое, и СВ в ферритовой пленке [5]. В [6] продемонстрировано, что периодическая модуляция волноведущих свойств мультиферроидной структуры позволяет создавать МК с возможностью двойного электронного управления их передаточными характеристиками. При этом толщина сегнетоэлектрического слоя определяет диапазон частот, в котором выполняются условия для гибридизации. Для частот до 10 ГГц толщина сегнетоэлектрического слоя должна быть не менее 200 мкм. В этом случае для достижения эффективной перестройки диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика напряженность электрического поля должна достигать значений порядка 100 кВ/см, что требует высоких значений управляющего напряжения.

Одним из способов уменьшения управляющего напряжения является использование тонкопленочных структур.

<sup>1</sup> Работа выполнена при государственной финансовой поддержке в рамках грантов РФФИ (№ 15-32-20357 мол\_а\_вед, № 16-32-00715 мол\_а).

ночных мультиферроидных структур, содержащих щелевую линию передачи сигнала [7]. В такой конструкции возможно реализовать эффективную электрическую и магнитную перестройку дисперсионных характеристик ЭМСВ. Один из способов получения МК на основе щелевой линии передачи – периодическое изменение ширины щели. Описанная структура сочетает в себе свойства МК с возможностью двойной электронной перестройки. До настоящего времени подобные структуры исследованы не были. Таким образом, целью работы являлось исследование волновых процессов в новом тонкопленочном феррит-сегнетоэлектрическом МК на основе щелевой линии передачи.

Исследуемая структура представлена на рис. 1, а. МК содержит несколько слоев ( $j$  – номер слоя): сегнетоэлектрическую пленку на диэлектрической подложке ( $j = -1; -2$ ), ферритовую пленку на диэлектрической подложке ( $j = 1; 2$ ) и щелевую линию передачи ( $j = 0$ ). Линия передачи с модуляцией по ширине (рис. 1, б) имеет вид узкой щели между двумя бесконечно тонкими вертикальными металлическими электродами, помещенными между ферритовыми и сегнетоэлектрическими пленками. Расстояние между электродами периодически изменяется от  $w_1$  на  $w_2$  и обратно. Участки с расстояниями  $w_1$  и  $w_2$  имеют длины  $L_1$  и  $L_2$  соответственно; пространственный период смены расстояния составляет  $\Lambda = L_1 + L_2$ . Эти электроды выполняют волноведущую функцию и позволяют реализовать электрическое управление поляризацией сегнетоэлектрической пленки.

Обозначим толщины слоев через  $d_j$ , а их диэлектрические проницаемости как  $\epsilon_j$ . Допустим, что ЭМСВ распространяется вдоль щелевой линии в направлении оси  $x$ , а структура намагниче-

на до насыщения вдоль оси  $z$ , что соответствует случаю поверхностных СВ.

Теоретическое исследование волновых процессов в феррит-сегнетоэлектрическом МК проведено в несколько этапов. На первом этапе по отдельности были получены дисперсионные характеристики ЭМСВ, распространяющихся на участках с различной шириной щелевой линии передачи  $w$ , методом двухсторонних граничных условий [8]. На следующем этапе методом связанных волн получены дисперсионные характеристики ЭМСВ, распространяющихся в периодической структуре. В этом методе периодическое изменение одного из параметров пленочного волновода (ширины щелевой линии  $w$ ) рассматривается как возмущение, которое приводит к связи между невозмущенными волнами [9]. На последнем этапе для расчета передаточных характеристик исследуемого МК на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой использовался метод волновых матриц передачи ( $T$ -матриц) [10], который наиболее близко отражает экспериментальную ситуацию. Преимуществами указанного метода являются возможность учета длины периодической структуры, а также потерь на распространение волн. В рамках этого метода распространение волн на участках щелевой линии с узким и широким зазорами, а также отражение волн при переходе между ними описываются соответствующими  $T$ -матрицами [10].

Все вычисления проведены для типичных параметров экспериментальных структур. Для сегнетоэлектрической пленки задавались параметры поликристаллической пленки титаната бария стронция (БСТ):  $d_{-1} = 2$  мкм и  $\epsilon_{-1} = 1500$  в нулевом электрическом поле. В качестве подложки для пленки БСТ был выбран сапфир с параметрами  $d_{-2} = 500$  мкм и  $\epsilon_{-2} = 10$ . В качестве феррита выбрана эпитаксиальная пленка ЖИГ,

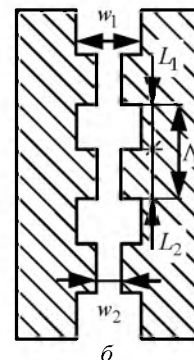
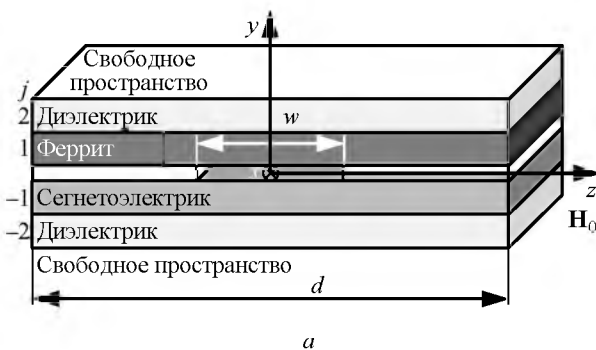


Рис. 1

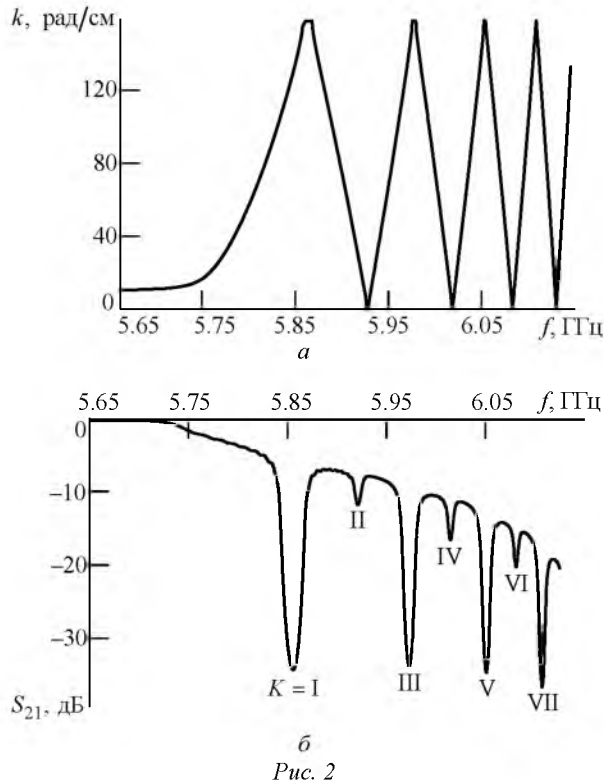


Рис. 2

выращенная на подложке гадолиний-галлиевого граната. Эти слои имели следующие параметры:  $d_1 = 13.6$  мкм и  $\epsilon_1 = 14$ ,  $d_2 = 500$  мкм и  $\epsilon_2 = 12$ .

На рис. 2 изображены результаты расчета дисперсионных (а) и передаточных (б) характеристик исследуемой периодической структуры. Расчет выполнен для следующих параметров: период структуры  $\Lambda = 0.2$  мм, количество периодов  $N = 10$ , ширины щели  $w_1 = 150$  мкм и  $w_2 = 100$  мкм. Из полученных характеристик следует, что модуляция ширины щелевой линии приводит к появлению запрещенных зон в спектре ЭМСВ и, как следствие, к появлению провалов на передаточной характеристике волноведущей структуры. Запрещенные зоны возникают на тех частотах, где фазовый набег волны на периоде структуры кратен  $\pi$ . Провалы на передаточной характеристике, соответствующие запрещенным зонам, полученные за счет ограниченного количества периодов структуры, имеют конечную глубину, не превосходящую  $-34$  дБ. В дальнейшем такие области с относительно большим затуханием волн будем называть полосами заграждения<sup>2</sup>. С увеличением частоты увеличивается влияние СВ, в результате чего вклад параметра магнитной диссипации возрастает (рис. 2).

<sup>2</sup> На рис. 2, б полосы заграждения  $K$  пронумерованы римскими цифрами.

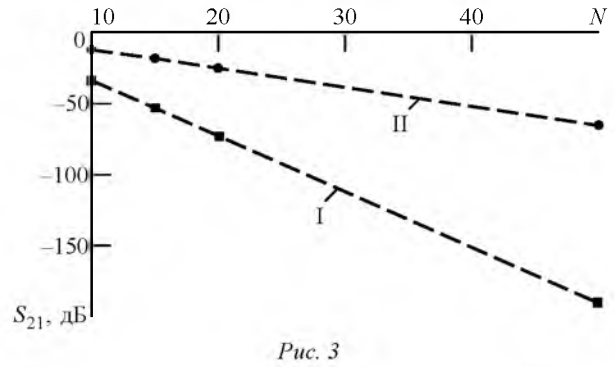


Рис. 3

Подобные расчеты проведены для различных вариантов параметров феррит-сегнетоэлектрического МК. В частности, на рис. 3 представлены результаты расчета, выполненные для  $N = 10, 15, 20$  и 50 периодов модулированной щелевой линии МК и двух полос заграждения. Полученные зависимости показывают, что при увеличении количества периодов потери на распространение волн на частоте первой полосы заграждения увеличиваются: например, при увеличении числа периодов с 10 до 20 потери в этой полосе увеличиваются на 39 дБ. Для остальных полос заграждения также происходит увеличение затухания ЭМСВ. В предельном случае, когда количество периодов стремится к бесконечности, вместо полос заграждения на передаточной характеристике появятся запрещенные зоны. Таким образом, изменяя геометрию феррит-сегнетоэлектрического МК на щелевой линии передачи, можно получать различные передаточные характеристики.

На следующем этапе исследовано электрическое управление положением частот полос заграждения исследуемого МК. На рис. 4 представлена зависимость диапазона перестройки полос заграждения  $\Delta f$  при приложении управляющего напряжения  $U = 200$  В. Приложение этого напряжения к электродам щелевой линии моделировалось уменьшением диэлектрической проницаемости слоя сегнетоэлектрика  $\epsilon_2$ . В расчетах учитывалось, что на участках щелевой линии, име-

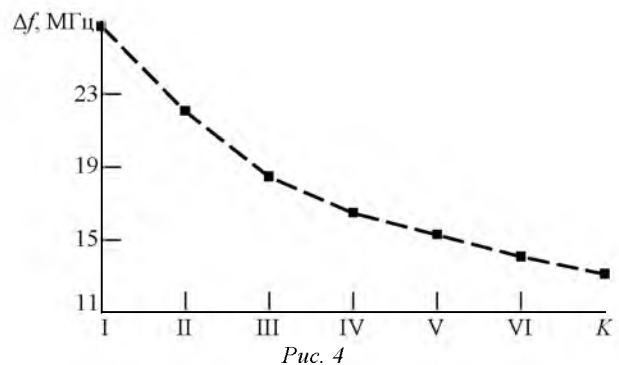


Рис. 4

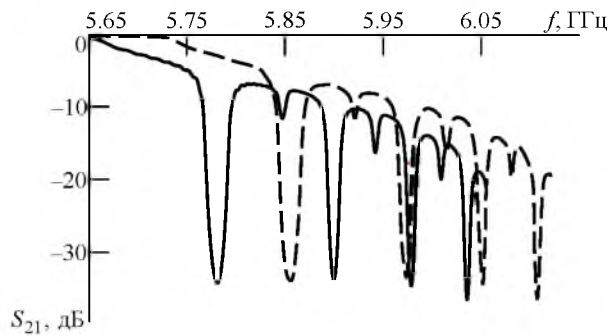


Рис. 5

ющих разную ширину зазора, напряженность электрического поля оказывается различной. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической пленки как функция от напряженности электрического поля  $E$  рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon_{-1}(E_{1,2}) = \varepsilon_{-1}(0) - kE_{1,2}^2,$$

где  $k$  – коэффициент управляемости.

Для моделирования были использованы типичные параметры пленки БСТ:  $\varepsilon_{-1}(0) = 1500$ ,  $k = 1.5 \text{ см}^2/\text{кВ}^2$ . Напряженность электрического поля [кВ/см] определялась как  $E_{1,2} = U/w_{1,2}$ . Напряжение  $U$  изменялось от 0 до 200 В.

Результаты моделирования показывают, что максимальная управляемость наблюдается для первой полосы заграждения и составляет 28 МГц, причем с увеличением номера полосы, т. е. с увеличением частоты, диапазон электрической перестройки уменьшается. Такое поведение полос заграждения объясняется тем, что с увеличением номера влияние диэлектрической проницаемости на спектр ЭМСВ уменьшается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой / Ал. А. Никитин, Ан. А. Никитин, А. Б. Устинов, Е. Lähderanta, Б. А. Калиникос // ЖТФ. 2016. Т. 86, вып. 6. С. 115–120.
2. Demokritov S. O., Slavin A. N. Magnonics: From Fundamentals to Applications. Heidelberg: Springer, 2013. 262 p.
3. Ding J., Adeyeye A. O. Binary Ferromagnetic Nanostructures: Fabrication, Static and Dynamic Properties // Adv. Funct. Mater. 2013. Vol. 23. P. 1684–1691.
4. Sethares J. C. Magnetostatic Wave Devices and Applications // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. P. 2646–2651.
5. Demidov V. E., Kalinikos B. A., Edenhofer E. Dipole-Exchange Theory of Hybrid Electromagnetic-Spin Waves in Layered Film Structures // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91, iss. 12. P. 10007–10016.
6. Устинова И. А., Никитин А. А., Устинов А. Б. Динамический магنونный кристалл на основе феррит-сегнетоэлектрической слоистой структуры // ЖТФ. 2016. Т. 86, вып. 3. С. 155–158.
7. All-Thin-Film Multilayered Multiferroic Structures with a Slot-Line for Spin-Electromagnetic Wave Devices / An. A. Nikitin, A. B. Ustinov, A. A. Semenov, B. A. Kalinikos, E. Lähderanta // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104, iss. 9. P. 093513(1–4).
8. Dispersion Characteristics of Spin-Electromagnetic Waves in Planar Multiferroic Structures / An. A. Nikitin, A. B. Ustinov, V. V. Vitko, A. A. Semenov, P. Yu. Belyavskiy, I. G. Mironenko, A. A. Stashkevich, B. A. Kalinikos, E. Lähderanta // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 118, iss. 18. P. 183901(1–12).
9. Яриу А., Юх П. Оптические волны в кристаллах // М.: Мир, 1987. 616 с.
10. Li Z.-Y., Lin L.-L. Photonic band structures solved by a plane-wave-based transfer-matrix method // Phys. Rev. E. 2003. Vol. 67. P. 046607(1–11).

Al. A. Nikitin, A. B. Ustinov, An. A. Nikitin, A. A. Semenov  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

### **Investigation of Wave Processes in Ferrite-Ferroelectric Magnonic Crystal with a Slot Transmission Line**

*The microwave properties of the ferrite-ferroelectric magnonic crystals with a slot transmission line were investigated. Dispersion and transmission characteristics of the spin-electromagnetic waves propagating in such structures were obtained. The influence of various parameters of the microwave waveguide structure on the transmission coefficient of the ferrite-ferroelectric magnonic crystal was investigated. In particular, the electric tuning of the transmission coefficient was demonstrated in the range of 2.8 MHz for electric voltage of 200 V. The range of the magnetic tuning was 89 MHz for the external magnetic field variation from 1325 Oe to 1350 Oe.*

Ferrite, ferroelectric, magnonic crystal

Статья поступила в редакцию 29 марта 2016 г.

---