

## Теоретическое исследование сверхвысокочастотных свойств феррит-сегнетоэлектрического магнетонного кристалла

© А.В. Дроздовский, А.А. Никитин, А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
197376 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: drozdovskyav@gmail.com

(Поступило в Редакцию 19 ноября 2013 г.)

Впервые исследованы сверхвысокочастотные свойства феррит-сегнетоэлектрических магнетонных кристаллов. Показана электрическая и магнитная перестройки запрещенных зон в спектре собственных электромагнитно-спиновых волн таких структур.

Распространение сверхвысокочастотных (СВЧ) спиновых волн в магнитных пространственно-периодических волноведущих структурах изучается в течение многих лет (см., например, [1] и ссылки в ней). В последнее десятилетие такие структуры получили название магнетонных кристаллов [2–4] по аналогии с фотонными кристаллами в оптике. СВЧ магнетонные кристаллы обычно создаются с помощью периодической модуляции одного из параметров пленочного магнитного волновода. Это может быть периодическое изменение толщины или ширины волновода, металлизация его поверхности, ионная имплантация, а также модуляция поля подмагничивания пленки. Интерес к магнетонным кристаллам обусловлен тем, что, с одной стороны, они являются удобной модельной средой для изучения линейных и нелинейных волновых эффектов [5], а с другой — на их основе возможно создание функциональных СВЧ приборов нового поколения, например, генераторов [6], фильтров [7], шумоподавителей [8], ограничителей мощности [8] и устройств обращения волнового фронта [9].

Другим актуальным направлением СВЧ микроэлектроники является исследование многослойных мультиферроидных структур, например, гетероструктур феррит-сегнетоэлектрик [10]. Комбинация сегнетоэлектрических и ферромагнитных материалов в слоистую структуру позволяет реализовать двойную электронную перестройку ее волноведущих свойств. Такая двойная перестройка обусловлена связью электромагнитных и спиновых волн с образованием гибридных электромагнитно-спиновых волн (ГЭСВ) в феррит-сегнетоэлектрической структуре [11–13]. Управление дисперсионными свойствами гибридных волн может осуществляться как за счет изменения магнитной проницаемости феррита магнитным полем, так и за счет изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика при приложении электрического поля. Несмотря на множество публикаций в данном направлении до сих пор изучались только пространственно-однородные феррит-сегнетоэлектрические структуры. В настоящей работе впервые теоретически исследованы СВЧ свойства пространственно-периодической феррит-сегнетоэлектрической структуры.

Для исследования была выбрана волноведущая структура, модель которой показана на рис. 1, а. Структура состоит из однородной ферромагнитной пленки, покрытой диэлектрическими материалами двух типов. Первый материал (2) представляет собой нелинейный диэлектрик со сравнительно высокой относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$ , которую можно изменять путем приложения электрического поля. Вторым материалом (3) — это линейный диэлектрик со сравнительно низкой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ . В качестве материала магнитной пленки был взят монокристаллический железо-иттриевый гранат (ЖИГ), наиболее

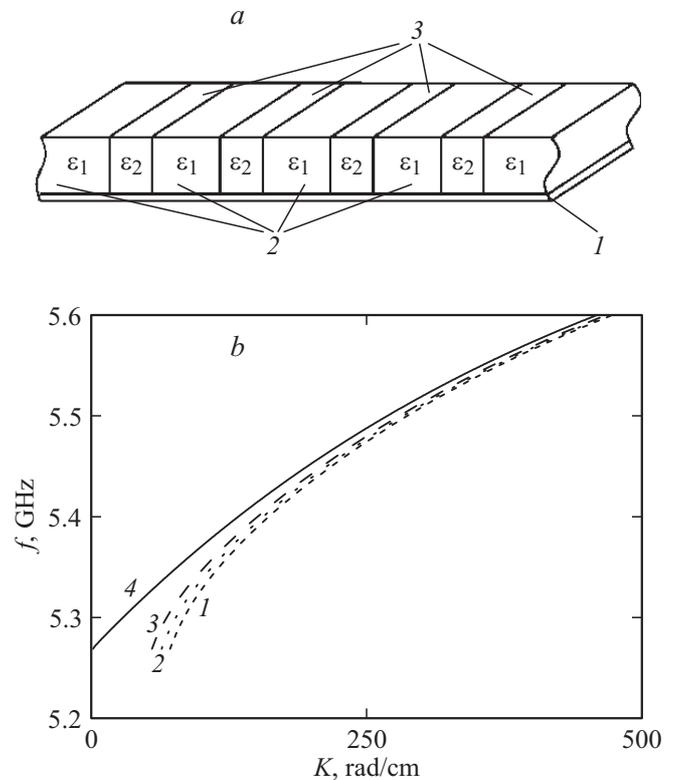


Рис. 1. а — схематичное изображение магнетонного кристалла, б — законы дисперсии ГЭСВ в структурах ЖИГ-БСТ при  $\epsilon_1 = 2500$  (1), 2000 (2), 1500 (3) и ЖИГ-алмаз при  $\epsilon_2 = 5.7$  (4).

часто используемый в спин-волновых приборах. В качестве прототипа нелинейного диэлектрика использовался широко распространенный керамический сегнетоэлектрик — титанат бария-стронция (БСТ), который при комнатной температуре находится в параэлектрической фазе и демонстрирует изотропную диэлектрическую проницаемость. В качестве линейного диэлектрика был выбран синтетический алмаз как один из наиболее перспективных материалов микроэлектроники [14].

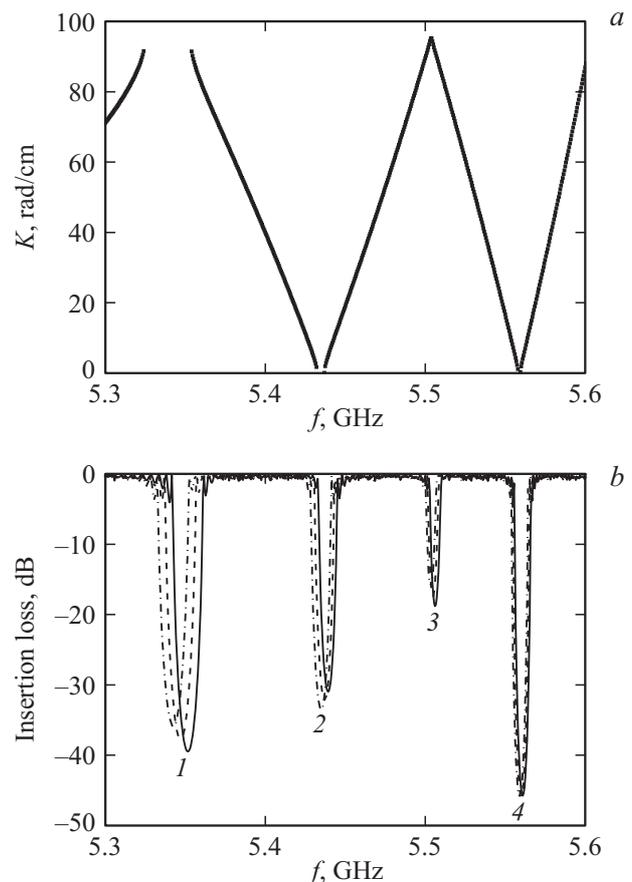
Особенностью вышеописанной периодической мультиферроидной структуры является наличие запрещенных зон в спектре распространяющихся в ней ГЭСВ. Возникновение запрещенных зон обусловлено брэгговскими резонансами, возникающими вследствие того, что на различных участках структуры волны имеют разные фазовые скорости, и, как следствие, различные участки структуры имеют различные волновые сопротивления. Частотами запрещенных зон можно управлять либо путем приложения и изменения электрического поля, либо за счет приложения и изменения поля подмагничивания.

Для расчета спектральных характеристик ГЭСВ в рассматриваемой периодической структуре было использовано дисперсионное уравнение  $\omega(k)$  для электромагнитно-спиновых волн, описанное в [11]. Дисперсионные зависимости волн низшего типа на участках структуры с  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  показаны на рис. 1, *b*. Как видно из рисунка, уменьшение  $\epsilon_1$  ведет к изменению дисперсии волны. Этот эффект лежит в основе электрической перестройки частот запрещенных зон. Показанные на рисунке спектры для участков структуры с  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  заметно различаются в области относительно малых волновых чисел. В области относительно больших волновых чисел они практически одинаковы. Это объясняется тем, что фазовая скорость электромагнитной волны намного больше фазовой скорости спиновой волны. Поэтому гибридизация этих волн в диапазоне СВЧ происходит в области относительно малых волновых чисел. В области же больших волновых чисел гибридизация спиновой и электромагнитной волны практически отсутствует. Таким образом, на малых волновых числах в области эффективной гибридизации волн возможно двойное электронное управление частотами запрещенных зон. Отметим, что расчет проводился на частотах, лежащих ниже частот отсечки электромагнитных волн высших типов.

Согласно [15], дисперсионная зависимость ГЭСВ в периодической структуре, неограниченной в направлении распространения волны, может быть рассчитана по формуле

$$\cos(K\Lambda) = \cos(k_1 d_1) \cos(k_2 d_2) - \frac{k_1^2 + k_2^2}{2k_1 k_2} \sin(k_1 d_1) \sin(k_2 d_2), \quad (1)$$

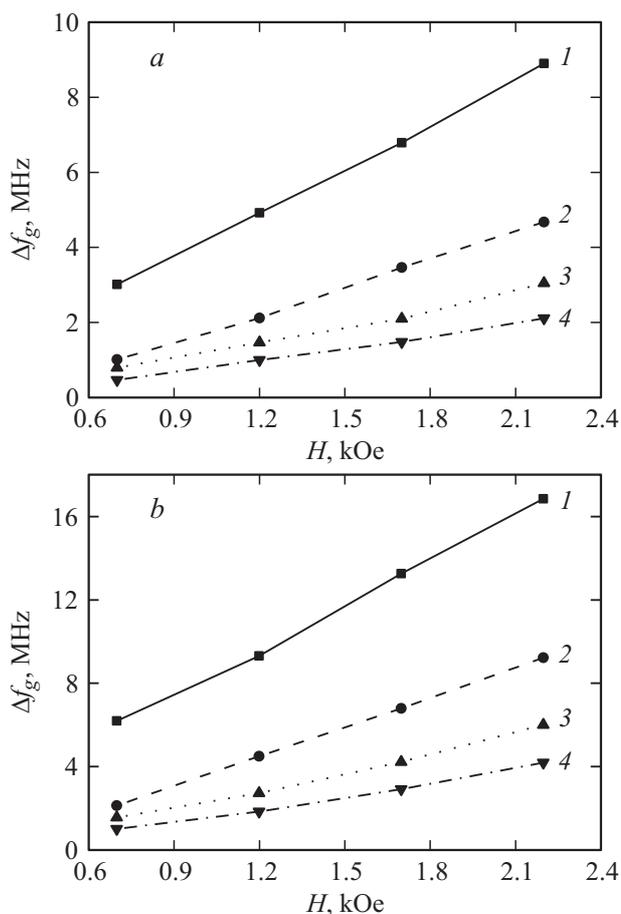
где  $K$  — блоховский волновой вектор,  $k_1$  и  $k_2$  — волновые числа ГЭСВ, распространяющихся на участках структуры с  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  соответственно,  $d_1$  и  $d_2$  — протя-



**Рис. 2.** *a* — дисперсионная характеристика феррит-сегнетоэлектрического магннного кристалла и *b* — коэффициент передачи при  $\epsilon_1 = 2500$  (сплошная линия), 2000 (штриховая линия), 1500 (штрихпунктирная линия).

женности этих участков в направлении распространения волны. На рис. 2, *a* приведены результаты расчета дисперсионной характеристики исследуемой структуры для значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$  — 2500 и величины магнитного поля 1200 Ое. Как видно из рисунка, спектр собственных волн феррит-сегнетоэлектрического магннного кристалла содержит разрешенные и запрещенные зоны.

Передачная характеристика (амплитудно-частотная характеристика) магннного кристалла рассчитывалась методом волновых матриц передачи [16]. Подчеркнем, что метод расчета учитывал конечность структуры в направлении распространения волны. Расчеты проводились для типичных геометрических размеров феррит-сегнетоэлектрических слоистых структур [11–13]. Толщина пленки ЖИГ была взята равной 10  $\mu\text{m}$ , а намагниченность насыщения — 1750 Г. Толщина диэлектрической пластины была выбрана равной 200  $\mu\text{m}$ . Период структуры составлял  $\Lambda = 330 \mu\text{m}$ , протяженность области ЖИГ-БСТ  $d_1 = 200 \mu\text{m}$ , а протяженность области ЖИГ-алмаз —  $d_2 = 130 \mu\text{m}$ . При расчете полагалось, что магннный кристалл имеет длину,



**Рис. 3.** Сдвиг частоты запрещенных зон магнного кристалла при изменении  $\epsilon_1$  с 2500 до 2000 (a) и 1500 (b). Цифры на графике соответствуют номерам запрещенных зон, показанных на рис. 2, b.

равную  $20\text{Å}$ , и что он намагничен однородным полем  $H$ , направленным в плоскости структуры перпендикулярно направлению распространения ГЭСВ.

Передаточные характеристики периодической структуры, промоделированные для различных значений  $\epsilon_1$ , показаны на рис. 2, b. Конечность длины волноведущей структуры приводит к тому, что внутри запрещенных зон наблюдаются относительно большие, но конечные вносимые потери. Уменьшение  $\epsilon_1$  ведет к сдвигу запрещенных зон вверх по частоте. С увеличением номера зоны этот сдвиг уменьшается. Такое поведение запрещенных зон определяется эффективностью гибридизации электромагнитной и спиновой волн.

Аналогичные характеристики были промоделированы для различных значений поля подмагничивания. Результаты показали, что перестройка спектра и передаточных характеристик мультиферроидного магнного кристалла магнитным полем возможна в широком диапазоне частот, а электрическим полем — в более узком диапазоне. При этом частоты полос заграждения также изменяются.

Остановимся более подробно на результатах электрического сдвига полос заграждения. На рис. 3 показан сдвиг центральных частот запрещенных зон как функция магнитного поля  $H$ . Из рисунка видно, что сдвиг запрещенных зон за счет уменьшения  $\epsilon_1$  растет практически линейно с увеличением магнитного поля. Такое поведение характеристик объясняется следующим образом. Электромагнитные волны в открытом диэлектрическом волноводе не имеют частоты отсечки и их дисперсия на низких частотах приближается к световому конусу, т. е. к дисперсионной характеристике волны ТЕМ в свободном пространстве. По мере увеличения частоты дисперсионная характеристика моды  $TE_1$  все дальше отходит от светового конуса, приближаясь к дисперсии волны в металлизированном диэлектрическом волноводе, которая для исследованной структуры имела бы частоту отсечки, равную  $7.29\text{ GHz}$ . Ясно, что изменение диэлектрической проницаемости  $\epsilon_1$  изменяет как эту частоту, так и саму дисперсионную характеристику моды  $TE_1$ . При этом дисперсионная характеристика волны ТЕМ не изменяется. Поэтому по мере того, как частотный диапазон спиновых волн приближается к частоте отсечки электромагнитных волн в металлизированном волноводе, электрическое управление спектром ГЭСВ в исследуемой структуре возрастает.

В заключение отметим, что в настоящей работе предложен и теоретически исследован феррит-сегнетоэлектрический магнный кристалл. Показано, что частотами запрещенных зон можно управлять как электрическим, так и магнитным полями смещения. Такая структура может найти различные применения в СВЧ микроэлектронике. В качестве возможных примеров можно назвать полосно-заграждающие фильтры и устройства обращения волнового фронта.

Работа поддержана грантами РФФИ, Министерства образования и науки РФ, а также Немедского научного общества (DFG).

## Список литературы

- [1] *Serga A.A., Chumak A. V., Hillebrands B.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. N 26. P. 264 002.
- [2] *Nikitov S.A., Tailhades Ph., Tsai C.S.* // J. Magnet. Magn. Mater. 2001. Vol. 236. P. 320–330.
- [3] *Дроздовский А.В., Черкасский М.А., Устинов А.Б., Ковшиков Н.Г., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. С. 17–22.
- [4] *Гришин С. В., Бегинин Е.Н., Дулин Ю.В., Никитов С.А.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 13. С. 87–95.
- [5] *Ustinov A.B., Kalinikos B.A., Demidov V.E., Demokritov S.O.* // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. N 18. P. 180 406.
- [6] *Grishin S.V., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A., Bегинин Е.Н.* // IEEE Transactions on Magnetics. 2011. Vol. 47. N 10. P. 3716–3719.
- [7] *Никитов С.А., Филимонов Ю.А., Высоцкий С.Л.* // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2008. Вып. 5. С. 78–86.

- [8] *Ustinov A.B., Drozdovskii A.V., Kalinikos B.A.* // APL. 2010. Vol. 96. P. 142 513.
- [9] *Chumak A.V., Tiberkevich V.S., Karenowska A.D., Serga A.A.* et al. // Nature communications. 2010. Vol. 1. P. 141.
- [10] *Sun N.X., Srinivasan G.* // Spin. 2012. Vol. 2. N 3. P. 1240004/1-46.
- [11] *Демидов В.Е., Калиникос Б.А.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 89–93.
- [12] *Григорьева Н.Ю., Султанов Р.А., Калиникос Б.А.* // ФГТ. 2011. Т. 53. Вып. 5. С. 971–979.
- [13] *Ustinov A. B., Srinivasan G., Kalinikos B.A.* // APL. 2007. Vol. 90. N 3. P. 031913–031913-3.
- [14] *Выровец И.И., Грицына В.И., Дудник С.Ф.* и др. // Физическая инженерия поверхности. 2010. Т. 8. N 1. С. 4–19.
- [15] *Yariv A., Yeh P.* Optical waves in crystals. NY: Wiley, 1984. 616 p.
- [16] *Chumak A.V., Serga A.A., Hillebrands B., Kostylev M.P.* // APL. 2008. Т. 93. N 2. С. 022508–022508-3.