

13

Мультиферроидные периодические структуры на основе магнетонных кристаллов для электронно-перестраиваемых сверхвысокочастотных устройств

© А.Б. Устинов, Б.А. Калинико

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина)
E-mail: ustinov-rus@mail.ru

Поступило в Редакцию 21 февраля 2014 г.

Впервые экспериментально изучено распространение электромагнитно-спиновых волн в мультиферроидной периодической структуре, построенной на одномерном магнетонном кристалле. На частотной зависимости коэффициента передачи электромагнитно-спиновых волн в такой структуре наблюдались характерные полосы резонансного загораживания, соответствовавшие запрещенным зонам спектра периодической структуры. Продемонстрирована электрическая и магнитная перестройка полос загораживания по частоте.

В последние годы возрос интерес к исследованию периодических волноведущих структур. В частности, множество работ посвящено изучению электромагнитных волн в периодических оптических волноводах — так называемых „фотонных кристаллах“ (см., например, [1]). Также возобновился интерес к изучению магнитостатических спиновых волн в периодических магнитных пленочных структурах — так называемых „магнетонных кристаллах“ [2–7].

Одним из современных направлений развития микроэлектроники является разработка и исследование мультиферроидных композитных материалов, построенных на основе двух или более слоев феррита и сегнетоэлектрика [8,9]. В таких многослойных структурах могут распространяться сверхвысокочастотные (СВЧ) гибридные электромагнитно-спиновые волны, свойствами которых можно управлять как магнитным, так и электрическим полями смещения [10–12]. Магнитная перестройка

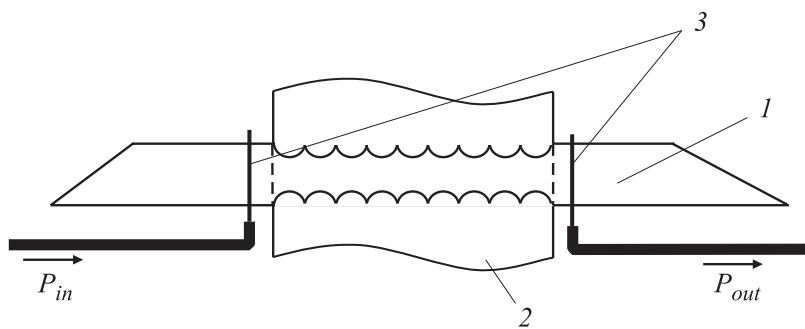


Рис. 1. Схематическое изображение периодической мультиферроидной структуры.

реализуется за счет вариации магнитной восприимчивости феррита при изменении поля намагничивания слоистой структуры. Электрическая перестройка обеспечивается за счет уменьшения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя при приложении к нему электрического напряжения.

Пространственно-однородные слоистые структуры феррит-сегнетоэлектрик впервые были предложены в 1986 году в работе В.Б. Анфиногенова и др. [13]. Интерес к изучению подобных структур с целью их применения в устройствах обработки СВЧ-сигналов не ослабевает и по сей день [14–18]. Вместе с тем волноведущие характеристики пространственно-периодических мультиферроидных структур до сих пор не исследовались.

В данной работе экспериментально исследовано распространение электромагнитно-спиновых волн (ЭСВ) в мультиферроидной периодической структуре, изготовленной на основе одномерного магнитного кристалла и керамической пластины титаната бария–стронция (БСТ). Изучена электрическая и магнитная перестройка полос резонансного заграждения, соответствовавших запрещенным зонам спектра периодической структуры.

Одномерный магнитный кристалл представлял собой тонкую монокристаллическую пленку железо-иттриевого граната (ЖИГ) (рис. 1) с периодической модуляцией ее ширины. Пленка ЖИГ была выращена

на подложке гадолиний-галлиевого граната методом жидкофазной эпитаксии. Для проведения экспериментов была выбрана пленка, имевшая свободные поверхностные спины. Пленка имела толщину $18.5 \mu\text{m}$. Ее намагниченность насыщения составляла 1700 G . Полуширина кривой ферромагнитного резонанса, измеренная на частоте 5.2 GHz , была равна 0.4 Oe . Из этой пленки методом химического травления был сформирован магнитный пленочный волновод спиновых волн. Вытравленный волновод имел форму, показанную на рис. 1. Как ясно из рисунка, волновод имел 3 части: 2 постоянной ширины и 1 периодически изменяющейся ширины. Края образца в областях возбуждения спиновых волн имели постоянную ширину, равную 1 mm . Концы пленки ЖИГ были вытравлены под острыми углами, чтобы уменьшить отражение спиновых волн от концов волновода.

Часть волновода с периодически изменяющейся шириной (магнетонный кристалл) находилась в центральной части образца. Она имела вид полуокружностей, вытравленных по краям волновода в сторону его внутренней части. Радиус полуокружностей составлял 0.22 mm . Соответственно минимальная ширина узкой части периодической структуры составляла 0.56 mm , а период структуры равнялся 0.44 mm . Структура имела 8 периодов, а ее протяженность составляла 3.52 mm .

В качестве сегнетоэлектрического слоя была использована керамическая пластина титаната бария–стронция (2) толщиной $200 \mu\text{m}$. Длина пластины в направлении распространения ЭСВ равнялась протяженности магнетонного кристалла, т.е. 3.52 mm . В поперечном направлении она составляла 8 mm . На обе стороны пластины были напылены хромовые электроды толщиной около 50 nm . Такая толщина электродов была много меньше глубины скин-слоя для СВЧ-полей рабочей частоты. Электроды служили для подачи управляющего напряжения. Для возбуждения и приема электромагнитно-спиновых волн были использованы микрополосковые антенны 3, выполненные в виде отрезков микрополосковых линий передачи, короткозамкнутых на конце. Расстояние между антеннами составляло 5 mm . Волновод ЖИГ был расположен на микрополосковых антеннах. Сегнетоэлектрическая пластина БСТ механически прижималась к магнитному волноводу в области его периодически изменяющейся ширины.

Экспериментальный макет был помещен между полюсами электромагнита в однородном постоянном магнитном поле. Поле было направлено параллельно плоскости мультиферроидной периодической структуры вдоль антенн спиновых волн. Таким образом, в периодической структуре могли распространяться так называемые поверхностные гибридные электромагнитно-спиновые волны.

Рассмотрим кратко распространение волн в описанной структуре. Входная микрополосковая антенна возбуждает поверхностную спиновую волну в пленке ЖИГ. Распространяясь, волна входит в область периодической феррит-сегнетоэлектрической структуры. На границе этой области поверхностная спиновая волна преобразуется в квази-поверхностную гибридную электромагнитно-спиновую волну, которая затем распространяется в периодической слоистой структуре ЖИГ/БСТ. Гибридная волна, пройдя слоистую структуру и достигнув другой ее границы, преобразуется обратно в поверхностную спиновую волну, которая затем принимается выходной микрополосковой антенной.

На рис. 2 показаны результаты измерения частотных зависимостей коэффициентов передачи электромагнитно-спиновых волн в периодической мультиферроидной структуре, или, иными словами, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) структуры для значений магнитного поля $H = 1748$ Ое и $H = 1853$ Ое. Измерения при $H = 1748$ Ое показали, что полосы заграждения для СВЧ-сигнала, наблюдавшиеся в области запрещенной зоны в спектре электромагнитно-спиновых волн, обусловленные брэгговскими резонансами, лежали на частотах 6885, 6919 и 6997 МГц. Как и следует из физических представлений, измерения фазочастотной характеристики периодической структуры показали наличие сильной частотной дисперсии групповой скорости электромагнитно-спиновых волн на склонах полос заграждения.

Изменение магнитного поля смещения существенно изменяло условия брэгговского отражения волн в такой структуре. Так, при значениях магнитного поля $H = 1748$ Ое наблюдались 2 узкие запрещенные зоны в низкочастотной области возбуждения и 1 широкая зона в центре полосы возбуждения волн. Увеличение магнитного поля до значения $H = 1853$ Ое приводило к исчезновению узких запрещенных зон.

Влияние электрического поля на АЧХ периодической мультиферроидной структуры для значения магнитного поля $H = 1853$ Ое показано на рис. 2, с. Как видно из графиков, приложение электрического

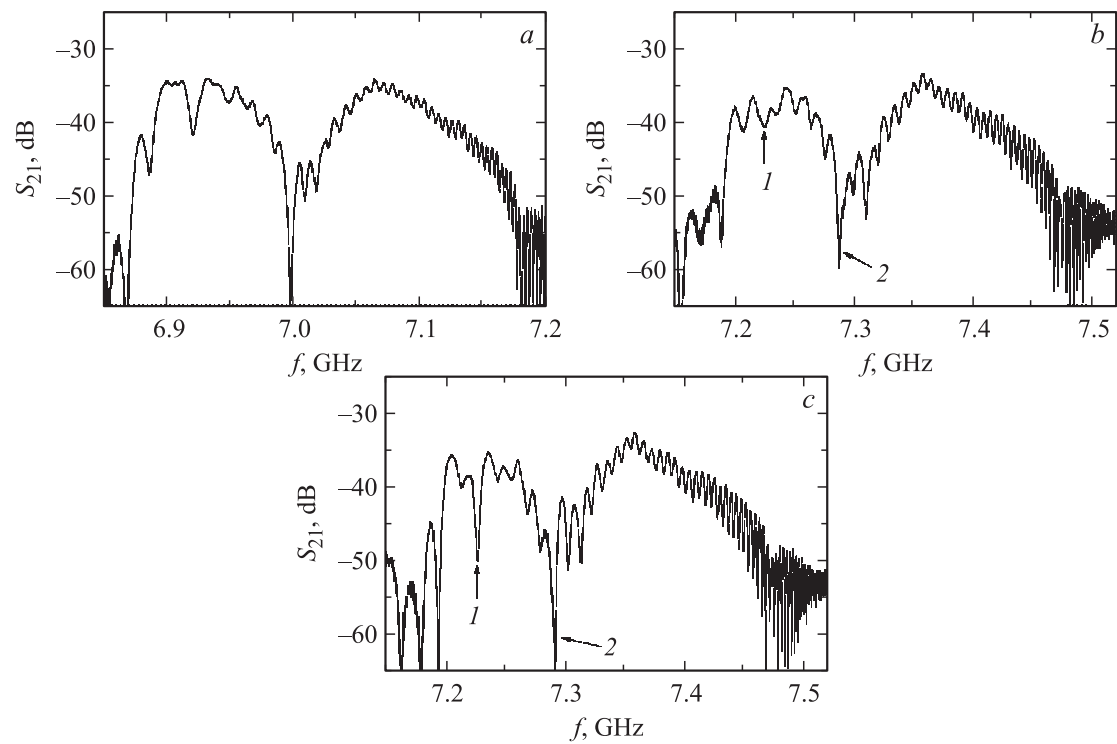


Рис. 2. АЧХ структуры, измеренные при различных значениях внешнего магнитного поля H и электрического поля E : a — 1748 Oe и 0 kV/cm, b — 1853 Oe и 0 kV/cm, c — 1853 Oe и 15 kV/cm.

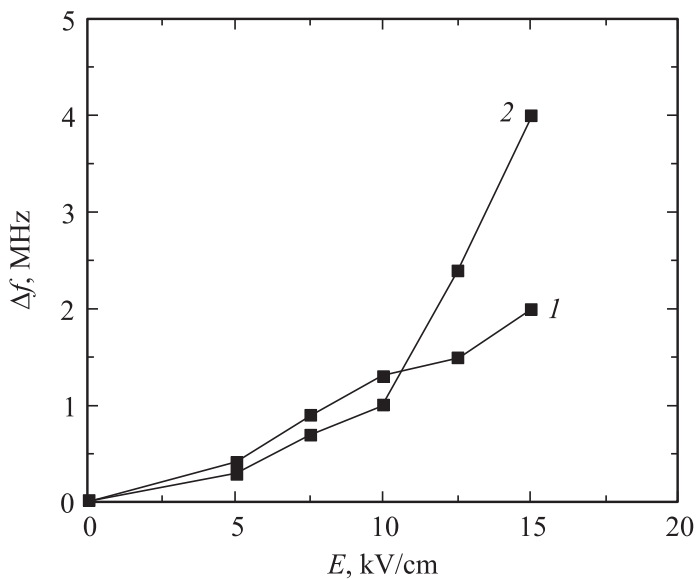


Рис. 3. Сдвиг частот запрещенных зон мультиферроидной периодической структуры при $H = 1853 \text{ Ое}$. Зависимости 1 и 2 соответствуют запрещенным зонам, отмеченным на рис. 2, *b* цифрами 1 и 2.

поля приводило к появлению запрещенной зоны в полосе пропускания структуры (на графиках она обозначена цифрой 1). Это можно объяснить изменением условия брэгговского отражения волн за счет изменения дисперсии электромагнитно-спиновых волн при приложении к сегнетоэлектрику электрического поля.

Другим явлением, наблюдаемым при приложении электрического поля, было изменение частотного положения полос запрещенной зоны. На рис. 3 для случая $H = 1853 \text{ Ое}$ показаны зависимости частот запрещенных зон, отмеченных на рис. 2, *b* и *c* цифрами 1 и 2, от приложенного электрического поля. Из графиков видно, что при приложении электрического поля до 15 kV/cm запрещенная зона 1 смещалась примерно на 2 MHz (кривая 1), а запрещенная зона 2 смещалась примерно на 4 MHz (кривая 2).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали возможности управления дисперсионными и частотно-селективными свойствами планарных мультиферроидных пространственно-периодических структур. Такие структуры могли бы применяться, например, для разработки электронно-перестраиваемых СВЧ-устройств.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, Совета по грантам президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации и немецкого научного общества (DFG).

Список литературы

- [1] *Кившарь Ю.С., Агравал Г.П.* Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. М.: Физматлит, 2005. С. 648.
- [2] *Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Животовский Л.В.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. В. 10. С. 670–674.
- [3] *Устинов А.Б., Григорьева Н.Ю., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. В. 1. С. 34–39.
- [4] *Chutak A.V., Pirro P., Serga A.A.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. N 26. P. 262 508 (1–3).
- [5] *Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. N 26. P. 264001 (1–14).
- [6] *Гришин С.В., Бегинин Е.Н., Дулин Ю.В., Никитов С.А., Шараевский Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 13. С. 86–94.
- [7] *Mruczkiewicz M., Krawczyk M., Sakharov V.K., Khivintsev Yu.V., Filimonov Yu.A., Nikitov S.A.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. N 9. P. 093 908 (1–13).
- [8] *Ozgun U., Alivov Y., Morkoc H.* // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2009. V. 20. N 10. P. 911–952.
- [9] *Sun N.X., Srinivasan G.* // Spin. 2012. V. 2. N 3. P. 1 240 004/1–46.
- [10] *Демидов В.Е., Калиникос Б.А.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 2. С. 89–93.
- [11] *Ustinov A.B., Tiberkevich V.S., Srinivasan G., Slavin A.N., Semenov A.A., Karmanenko S.F., Kalinikos B.A., Mantese J.V., Ramer R.* // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. N 9. P. 093 905 (1–7).
- [12] *Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. N 3. 031913 (1–3).
- [13] *Анфиногенов В.Б., Вербицкая Т.Н., Зильберман П.Е., Казаков Г.Т., Тихонов В.В.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 8. С. 454–457.

- [14] *Popov M., Zavislyak I.V., Srinivasan G.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. N 2. P. 024 112 (1–7).
- [15] *Никитин А.А., Устинов А.Б., Семенов А.А., Калиникос Б.А.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 7. С. 98–101.
- [16] *Yang X., Gao Y., Wu J., Beguhn S., Nan T., Zhou Z., Liu M., Sun N.X.* // IEEE Trans. Mag. 2013. V. 49. N 11. P. 5485–5488.
- [17] *Polzikova N., Alekseev S., Kotelyanskii I., Raevskiy A., Fetisov Y.* // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. N 17. P. 17C704 (1–3).
- [18] *Черкасский М.А., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. В. 11. С. 707–711.