

**В.В. Витько, Ан.А. Никитин, Ал.А. Никитин, А.А. Семенов,
А.Б. Устинов**

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Исследование тонкопленочного феррит- сегнетоэлектрического фазовращателя на основе щелевой линии

Предложена конструкция СВЧ фазовращателя на основе тонкопленочной феррит-сегнетоэлектрической структуры, содержащей щелевую линию. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование рабочих характеристик фазовращателя. Показана возможность электрического управления фазочастотной характеристикой.

Ключевые слова: электромагнитно-спиновые волны, феррит, сегнетоэлектрик

По мере возрастания значения сверхвысокочастотных (СВЧ) систем связи, радиолокации и навигации в современном обществе усиливаются требования к их надежности, мобильности, энергопотреблению. Телекоммуникационные сотовые и спутниковые радиотелефонные системы, передвижные навигационные и радарные станции, глобальные и локальные компьютерные сети испытывают потребность в не дорогих электрически управляемых компонентах. Эта потребность может быть обеспечена заменой сложных схем, использующих активные компоненты, на перестраиваемые СВЧ линии, изготовленные из пленочных материалов, таких как сегнетоэлектрики и ферриты. В настоящее время особенно актуальны исследования искусственных мультиферроидных структур, которые совмещают в себе как магнитные, так и электрические свойства. Таким образом, их рабочие характеристики можно перестраивать магнитным и электрическим полем [1].

Одним из способов реализации двойного электронного управления СВЧ характеристиками является использование эффекта гибридизации спиновой волны (СВ) и поверхностной электромагнитной волны (ЭМВ) в слоистой структуре, содержащей ферритовые и сегнетоэлектрические слои. Впервые исследование гибридной ЭМСВ в таких структурах были приведены в работе [2]. Известно, что для расчета рабочих характеристик СВЧ устройств, необходимо знание закона дисперсии электромагнитных или спиновых волн. Так, в работе [3] построена электродинамическая модель распространения ЭМСВ методом тензорных функций Грина и получено дисперсионное уравнение ЭМСВ, распространяющихся в слоистых феррит-сегнетоэлектрических (ФС) структурах, содержащих один ферритовый слой и несколько диэлектрических слоев. Показано, что ЭМСВ образуются в результате гибридизации электромагнитных волн, локализованных в сегнетоэлектрической пластине, и спиновых волн, распространяющихся в ферритовой пленке. Для эффективной гибридизации волн необходимо использовать сравнительно

толстые (200-500 мкм) пластины сегнетоэлектрика. На таком эффекте был построен целый класс СВЧ приборов с двойным электрическим и магнитным управлением [4-6]. Для электрического управления характеристиками приборов необходимо прикладывать высокое управляющее электрическое напряжение до 1000 В. Одним из путей понижения управляющего напряжения является использование тонких сегнетоэлектрических пленок в составе щелевой линии передачи. Так, в работах [7,8] продемонстрирован мультиферроидный резонатор, который управлялся благодаря гибридизации спин-волновых колебаний в пленочном ферритовом резонаторе и ЭМВ в щелевой линии на сегнетоэлектрической пленке. Существование названного эффекта открывает возможность создания новых микроминиатюрных управляемых тонкопленочных устройств для применения на СВЧ.

Целью настоящей работы является исследование характеристик тонкопленочного ФС фазовращателя, построенного на основе щелевой линии. Схематическое изображение экспериментальной многослойной структуры, содержащей тонкий слой феррита, представлено на рис. 1 (а).

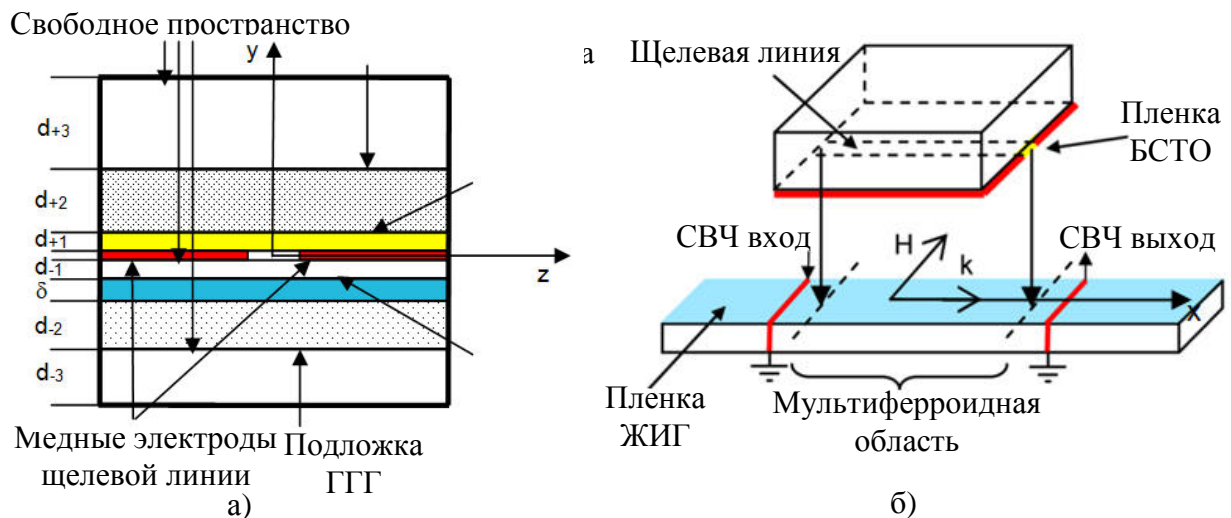


Рисунок 1.

Изготовление данной структуры проходило в два этапа. Первый этап заключался в создании волноведущей щелевой линии со слоем сегнетоэлектрической пленки титаната бария стронция (БСТО) состава $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$. В качестве подложки использовался сапфир толщиной 500 мкм и геометрическими размерами 14 x 7 мм. Пленка БСТО была получена методом реактивного магнетронного ВЧ напыления, толщина пленки составила 2 мкм. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической пленки была рассчитана из вольт-фарадной характеристики планарного конденсатора, созданного на ее основе. Связь между напряженностью электрического поля и диэлектрической проницаемостью соответствует следующей зависимости:

$$\epsilon(E) = 1500 - 0.194 E^2 \text{ (кВ/см)}.$$

Как и для изотропного диэлектрического керамического материала, диэлектрическая проницаемость является квадратичной функцией от напряженности электрического поля.

Электроды щелевой линии на поверхности пленки БСТО были получены методом вакуумного термического испарения. Щелевая линия располагается в центре подложки и размер щели соответствует 50 мкм. На втором этапе методом жидкофазной эпитаксии из монокристалла железоиттриевого граната (ЖИГ) была сформирована пленка феррита толщиной 13.6 мкм на подложке гадолиний галлиевого граната (ГГГ) толщиной 500 мкм. Длина и ширина образца составили 5 см и 2 мм соответственно. После этого полученные на первом и втором этапах щелевую линию и ферритовую пленку совмещают как показано на рис. 1 (б). Таким образом, в месте их соединения образуется искусственная мультиферроидная многослойная волноведущая структура. Данная структура помещалась в направленное по касательной к поверхности пленки магнитное поле $H=1362$ Э, так что вектор напряженности магнитного поля был перпендикулярен щели.

Моделирование характеристик полученной структуры проводилось по построенной нами ранее теоретической модели для расчета спектров электромагнитно-спиновых волн в щелевой линии на основе ФС структур, описанной в работе [9]. Результаты математического моделирования дисперсионной характеристики ЭМСВ в полученной структуре приведены на рис. 2 (а). Сплошными линиями показана дисперсионная характеристика ЭМСВ при $H=1362$ Э и $E = 0$ кВ/см. Пунктирными линиями показаны дисперсионные характеристики основной моды ЭМВ в щелевой линии и основной моды поверхностной СВ в ферритовой пленке. Хорошо видно, что в точке пересечения СВ и ЭМВ возникает электродинамическое взаимодействие между этими волнами, что приводит к гибридизации ЭМСВ.

Для подтверждения результатов моделирования было проведено экспериментальное исследование. Исследуемая мультиферроидная структура размещалась между микрополосковыми антеннами, которые возбуждали и принимали СВ в пленке ЖИГ (как показано на рис. 1 (б)). Расстояние между антеннами составляло 16 мм. Поверхностная СВ распространяется по пленке ЖИГ от микрополосковой СВЧ антенны и трансформируется в ЭМСВ, когда попадает в область, где щелевая линия контактирует с пленкой ЖИГ. Далее распространяющаяся ЭМСВ локализована в основном внутри щели. После прохождения мультиферроидного участка ЭМСВ трансформируется обратно в СВ. Для сдвига фазы волны электрическое напряжение подавалось на электроды щелевой линии, что приводило к изменению диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика под воздействием электрического поля.

Рабочие характеристики были измерены при помощи векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA 40. Результаты фазового сдвига $\Delta\varphi$ показаны символами на рис. 2 (б) и соответствуют напряжению в 50 В, 100 В и 150 В. Данные напряжения соответствуют напряженности электрического поля в щели равному 10, 20 и 30 кВ/см. Фазовый набег зависит от частоты и увеличивается с увеличением управляющего напряжения. Для сравнения на рис. 2 (б) сплошными линиями представлены результаты моделирования. Как видно из рисунка результаты численного моделирования хорошо соотносятся с результатами эксперимента.

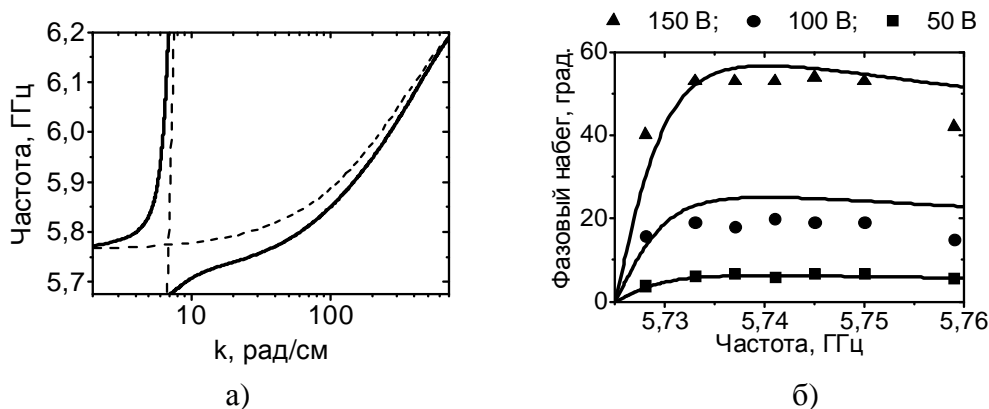


Рисунок 2.

Таким образом, в работе была предложена и исследована конструкция планарного СВЧ фазовращателя на основе ФС структуры, содержащей щелевую линию. В качестве сегнетоэлектрика использовалась пленка БСТО, а в качестве феррита – пленка ЖИГ. Продемонстрированы результаты численного моделирования и экспериментального исследования рабочих характеристик фазовращателя. Показано, что приложение электрического напряжения к электродам щелевой линии позволяет осуществлять электрическую перестройку фазы СВЧ сигнала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, Минобрнауки РФ и гранта Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Библиографический список

1. N. X. Sun, G. Srinivasan, "Voltage control of magnetism in multiferroic heterostructures and devices", Spin, vol. 2, № 3, pp.1240004–46, 2012.
2. В. Б. Анфиногенов, Т. Н. Вербицкая, П. Е. Зильберман, "Распространение магнитостатических волн в феррит-сегнетоэлектрической структуре", Письма в журнал технической физики, Т.12, Вып. 8, С.454-457, 1986.
3. В. Е. Демидов, Б. А. Калиникос, "Спектр дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных слоистых структурах металл-сегнетоэлектрик-ферромагнетик-сегнетоэлектрик-металл", Письма в ЖТФ. Т.26, Вып. 7, С.8-17, 2000.
4. А. Б. Устинов, G. Srinivasan, "Быстродействие планарного феррит-сегнетоэлектрического сверхвысокочастотного резонатора", ЖТФ том 80, вып. 6, стр. 147-150 (2010).
5. А. Б. Устинов, П. И. Колков, А. А. Никитин, Б. А. Калиникос, Ю. К. Фетисов, G. Srinivasan, "Феррит-сегнетоэлектрические фазовращатели с совместным электрическим и магнитным управлением", ЖТФ, том 81, вып. 6, стр. 75-79, 2011.
6. M. Popov, I. Zavislyak, A. Ustinov, and G. Srinivasan, "Sub-Terahertz Magnetic and Dielectric Excitations in Hexagonal Ferrites," IEEE Trans. Mag. 47, 289, 2011.
7. A. A. Semenov, P. Yu. Beljavski, A. A. Nikitin, S. F. Karmanenko, B. A. Kalinikos, G. Srinivasan, "Dual tunable thin-film ferrite-ferroelectric slotline resonator", Electronics Letters. V. 44, Is. 24. - P. 1406-1407, 2008.
8. П. Ю. Белявский, А. А. Никитин, С. Ф. Карманенко, А. А. Семенов, "Слоистый феррит-сегнетоэлектрический резонатор с электрическим и магнитным управлением", ФТТ. Т. 51. В. 7. Р. 1446 – 1447, 2009.
9. П. Ю. Белявский, Ан. А. Никитин, Ал. А. Никитин, В. В. Витько, А. А. Семенов, "Исследование волновых процессов в тонкопленочных слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик-щелевая линия", труды всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ», С.-Петербург, стр.28-31, 2012.