

13

Планарный тонкопленочный феррит-сегнетоэлектрический СВЧ-фазовращатель

© А.А. Никитин, А.Б. Устинов, А.А. Семенов, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина)
E-mail: and.a.nikitin@gmail.com

Поступило в Редакцию 14 ноября 2013 г.

Впервые экспериментально исследованы сверхвысокочастотные (СВЧ) фазовращатели на щелевых линиях передачи, построенных на тонких сегнетоэлектрических пленках титаната бария-стронция и тонких монокристаллических пленках феррита железо-иттриевого граната. Фазовращатели обладают двойным электронным управлением. В основе двойного управления лежит эффект гибридизации электромагнитной волны, распространяющейся в щелевой линии, расположенной на сегнетоэлектрической пленке, со спиновой волной, распространяющейся в ферритовой пленке. При приложении напряжения 150 В к электродам щелевых линий с шириной зазора 50 и 150 μm изменение фазы составило соответственно 53 и 26 deg.

Прогресс в разработке радиоэлектронных сверхвысокочастотных (СВЧ) систем в значительной мере обусловлен достижениями в области создания новых микроэлектронных компонентов и приборов. Одним из путей создания новых приборов является использование композитных волноведущих структур, состоящих из слоев различных функциональных материалов, например, ферромагнетиков и сегнетоэлектриков. В СВЧ-диапазоне среди ферритовых материалов наибольшее распространение получили монокристаллические пленки железо-иттриевого

граната (ЖИГ) [1], а среди сегнетоэлектрических — пленки твердых растворов титаната бария-стронция (БСТ) [2]. Благодаря развитию технологий создания новых искусственных материалов в последние годы значительно возрос интерес к исследованию мультиферроиков, в частности, композитных структур, изготовленных из пленок сегнетоэлектриков и ферритов [3].

Физический и прикладной интерес к исследованию мультиферроиков обусловлен возможностью создания нового класса управляемых СВЧ-приборов и устройств на их основе. Такие устройства сочетают в себе достоинства высокочастотных миниатюрных спин-волновых устройств с возможностью двойного управления их СВЧ-характеристиками за счет изменения внешних электрических и магнитных полей смещения.

До сих пор подавляющее большинство работ было посвящено исследованию гибридных электромагнитно-спиновых волн (ГЭСВ), образующихся в результате электромагнитной связи спиновых волн в сравнительно тонкой (единицы микрометров) пленке феррита с электромагнитными волнами в сравнительно толстой (сотни микрометров) пластине сегнетоэлектрика [3–8]. Такое соотношение толщин слоев навязано условием эффективной гибридизации волн, которая в свою очередь отвечает за перестройку спектра ГЭСВ. Опираясь на этот эффект, было предложено большое число СВЧ-приборов [3,4].

Основным недостатком приборов на толстых пластинах сегнетоэлектрика является высокое управляющее электрическое напряжение (до 1000 В), которое необходимо приложить, чтобы создать в сегнетоэлектрике электростатическое поле, достаточное для изменения диэлектрической проницаемости. Для уменьшения управляющего напряжения недавно было предложено использовать тонкие (единицы микрометров) сегнетоэлектрические пленки в составе щелевых или копланарных линий передачи [9,10]. Так, в работе [9] была исследована мультиферроидная структура, состоящая из резонатора на пленке ЖИГ и сегнетоэлектрической щелевой линии, и продемонстрирована возможность двойного электронного управления резонансной частотой такой структуры.

Целью настоящей работы являлось исследование характеристик тонкопленочного феррит-сегнетоэлектрического фазовращателя, построенного на основе щелевой линии передачи СВЧ-сигнала. В описываемой мультиферроидной волноведущей структуре ГЭСВ образуется

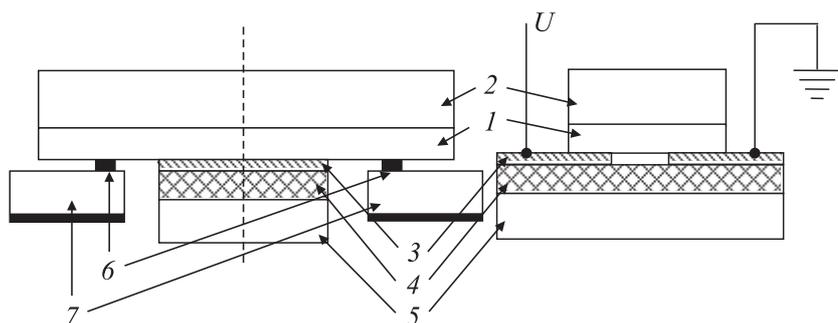


Рис. 1. Схема фазовращателя.

в результате электромагнитной связи поверхностных спиновых волн, распространяющихся в пленке ЖИГ, с электромагнитными волнами, распространяющимися в щелевой линии, расположенной на сегнетоэлектрической пленке БСТ.

Экспериментальный макет тонкопленочного феррит-сегнетоэлектрического фазовращателя представлен на рис. 1. Пленка ЖИГ (1) толщиной $13.6\ \mu\text{m}$ была эпитаксиально выращена на подложке галлий-гадолиниевого граната 2 толщиной $500\ \mu\text{m}$. Ширина пленки составляла $2\ \text{mm}$, длина — $50\ \text{mm}$, а намагниченность насыщения — $1750\ \text{G}$. Пленка ЖИГ имела ширину кривой ферромагнитного резонанса $\Delta H = 0.5\ \text{Oe}$ на частоте $5.5\ \text{GHz}$. Сегнетоэлектрическая пленка БСТ (4) состава $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ была выращена методом высокочастотного ионно-плазменного распыления на подложке сапфира (5) диаметром $76\ \text{mm}$. Толщина пленки БСТ составляла $2\ \mu\text{m}$, а толщина подложки сапфира — $500\ \mu\text{m}$. Для создания электродов щелевой линии передачи на поверхность пленки БСТ с помощью термического испарения наносилась пленка меди толщиной $2\ \mu\text{m}$. После чего с помощью методов фотолитографии и химического травления на пластине БСТ/сапфир формировался набор щелевых линий передачи (3) с разной шириной зазора w между волноведущими электродами. Пластина со сформированными щелевыми линиями разрезалась.

Для образования мультиферроидной структуры щелевые линии приводились в контакт с пленкой феррита таким образом, чтобы

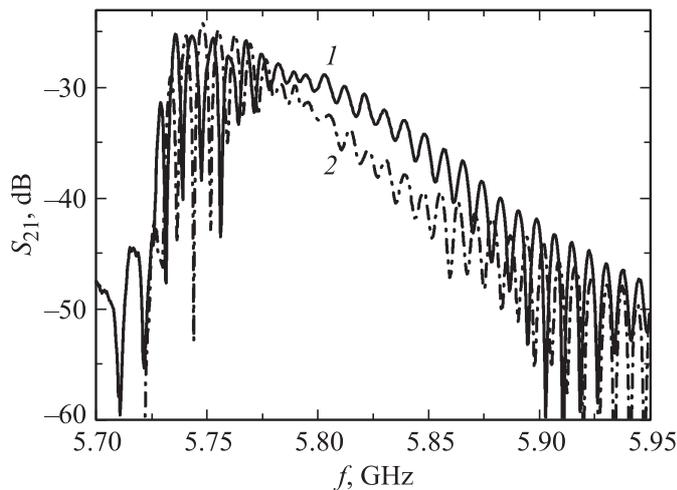


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики фазовращателей с разной шириной щели: 1 — $50\ \mu\text{m}$; 2 — $150\ \mu\text{m}$.

направление распространения электромагнитных волн в щелевой линии совпадало с направлением распространения поверхностной спиновой волны в пленке ЖИГ. Заметим, что медные электроды щелевой линии одновременно использовались для подачи управляющего электрического напряжения, как показано на рис. 1. Длина щелевых линий составляла $14\ \text{mm}$, а ширина щелей w была 50 и $150\ \mu\text{m}$.

Возбуждение и прием ГЭСВ в щелевом фазовращателе осуществлялось микрополосковыми антеннами (6) длиной $2\ \text{mm}$ и шириной $50\ \mu\text{m}$. Антенны были сформированы на подложке из поликора (7) толщиной $0.5\ \text{mm}$, металлизированной с обратной стороны. Расстояние между антеннами было $20\ \text{mm}$. Подвод СВЧ-мощности к антеннам осуществлялся при помощи микрополосковых линий с волновым сопротивлением $50\ \Omega$. Пленка ЖИГ помещалась на микрополосковые антенны. Длина зоны контакта пленки ЖИГ и щелевой линии на пленке БСТ составляла $14\ \text{mm}$. Макет фазовращателя помещался в постоянное магнитное поле, направленное по касательной к плоскости пленки параллельно антеннам. Такая взаимная ориентация поля и пленки

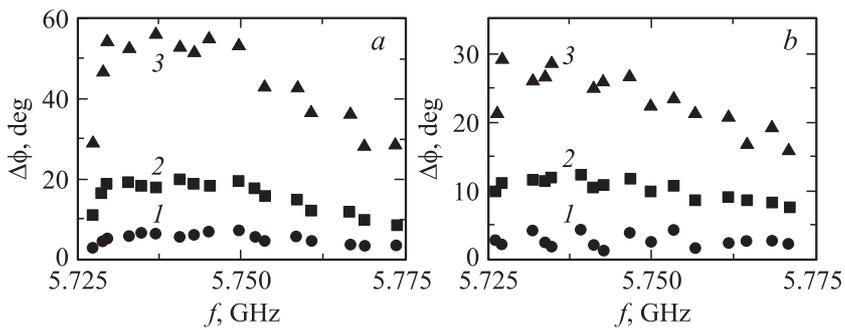


Рис. 3. Изменение фазового набега от частоты при приложении электрического напряжения для фазовращателей с шириной щели 50 (а) и 150 μm (b). Напряжение: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 150 V.

обеспечивала возбуждение поверхностных спиновых волн в области свободной пленки ЖИГ.

На управляющие электроды щелевой линии подавалось напряжение величиной до 150 V. При проведении исследований измерялись амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики фазовращателей при фиксированном значении магнитного поля и различных значениях прикладываемого электрического напряжения.

На рис. 2 показаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) изготовленных фазовращателей с разными ширинами щели, измеренные при магнитном поле 1350 Oe. Из графиков видно, что центральная частота полосы пропускания исследуемых структур составляет около 5.81 GHz, а вносимые потери варьируются в диапазоне 25–45 dB. При этом полоса пропускания по уровню -45 dB составляет около 170 MHz. Отметим, что такое значение гораздо меньше, чем в случае свободной пленки [11]. По-видимому, это объясняется возрастанием потерь в металлических электродах щелевой линии с возрастанием волнового числа ГЭСВ. При приложении к электродам щели напряжения до 150 V АЧХ сдвигались в сторону меньших частот, что объясняется уменьшением диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки. Частотный сдвиг АЧХ составлял 850 kHz для фазовращателя на щелевой линии с $w = 50 \mu\text{m}$ и 500 kHz в случае $w = 150 \mu\text{m}$.

На рис. 3 приведены зависимости дифференциального фазового сдвига $\Delta\phi$ фазовращателей. Результаты показывают, что приложение напряжения до 150 В ведет к изменению фазы СВЧ-сигнала до 53 deg при $w = 50 \mu\text{m}$ и до 26 deg при $w = 150 \mu\text{m}$. Максимальный набег фазы практически не меняется в полосе частот около 20 МГц. Затем с ростом частоты $\Delta\phi$ уменьшается. Для исключения возможного ухода передаточных характеристик, связанного с изменением температуры, измерения проводились как при увеличении, так и при уменьшении напряжения. При этом гистерезиса в значениях фазы не наблюдалось.

Таким образом, в данной работе предложены и исследованы планарные СВЧ-фазовращатели, построенные на основе щелевых линий передачи, содержащих пленки ЖИГ и БСТ микронной толщины. Показано, что приложение электрического напряжения к электродам щелевой линии позволяет осуществлять электрическую перестройку фазы СВЧ-сигнала. В исследованных макетах максимально достигнутая перестройка фазы составляла 53 deg. В качестве возможных вариантов ее увеличения можно предложить уменьшение ширины щели и увеличение толщин пленок ЖИГ и БСТ.

Работа поддержана грантами президента Российской Федерации, РФФИ, Министерства образования и науки РФ, а также Немецкого научного общества (DFG).

Список литературы

- [1] Adam J.D. // IEEE. 1988. V. 76. N 12. P. 156–170.
- [2] Вендик О.Г. // ФТТ. 2009. Т. 51. В. 7. P. 1441–1445.
- [3] Sun N.X., Srinivasan G. // Spin. 2012. V. 2. N 3. P. 1240 004 (1–46).
- [4] Ozgur U., Alivov Ya., Morkoc H. // J. Mater. Sci: Mater Electron. 2009. V. 20. P. 911–952.
- [5] Анфиногенов В.Б., Вербицкая Т.Н., Зильберман П.Е. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 8. С. 454–457.
- [6] Демидов В.Е., Калиникос Б.А. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 2. С. 89–93.
- [7] Ustinov A.B., Tiberkevich V.S., Srinivasan G. et al. // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 093 905 (1–7).
- [8] Григорьева Н.Ю., Султанов Р.А., Калиникос Б.А. // ФТТ. 2011. Т. 53. В. 5. P. 971–979.

- [9] *Белявский П.Ю., Никитин А.А., Карманенко С.Ф., Семенов А.А.* // ФТТ. 2009. Т. 51. В. 7. Р. 1446–1447.
- [10] *Leach J.H., Liu H., Avrutin V., Rowe E., Özgür Ü., Morkoc H., Song Y.-Y., Wu M.* // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. P. 064 106 (1–5).
- [11] *Калиникос Б.А., Устинов А.Б., Баруздин С.А.* Спин-волновые устройства и эхо-процессоры / Под ред. В.Н. Ушакова. Монография. М.: Радиотехника, 2013.