

Исследование сверхвысокочастотных свойств перестраиваемых тонкопленочных мультиферроидных гетероструктур с копланарной линией передачи

Ал.А. Никитин, А.Б. Устинов, Ан.А. Никитин, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Разработана теория, описывающая волновые процессы в копланарной линии передачи на тонкопленочных структурах феррит-сегнетоэлектрик. Дисперсионное соотношение было получено с помощью аналитического решения системы уравнений Максвелла с использованием метод приближенных граничных условий. С помощью численного моделирования проведен анализ влияния физических параметров и геометрических размеров ферромагнитных, а также сегнетоэлектрических слоев на особенности спектра электромагнитно-спиновых волн в исследуемых гетероструктурах.

Ключевые слова: феррит, сегнетоэлектрик, гибридная электромагнитно-спиновая волна, копланарная линия передачи

1. Введение

Прогресс в изучении радиофизических свойств искусственных мультиферроиков открывает широкие возможности для дальнейшего усовершенствования существующих микроэлектронных приборов и устройств обработки и генерации СВЧ сигналов. В частности, одной из таких возможностей является использование тонкопленочных структур феррит-сегнетоэлектрик в качестве основы создания новых типов управляемых элементов для радиоэлектроники. Один из возможных механизмов взаимодействия ферромагнитной и сегнетоэлектрической фаз реализуется посредством электродинамической связи спиновых волн (СВ) и электромагнитных волн (ЭМВ). Эти связанные возбуждения известны как гибридные электромагнитно-спиновые волны (ЭМСВ) [1].

С прикладной точки зрения, такие исследования представляют существенный интерес вследствие развития технологий создания тонкопленочных гетероструктур, что стимулирует поиск новых искусственных функциональных материалов. С физической точки зрения, тонкопленочные мультиферроики обладают отличными волноведущими свойствами по сравнению с исследованными ранее слоистыми структурами: двойная перестройка рабочих характеристик, малые вносимые потери, низкое энергопотребление и др. [2]. Следовательно, разработка новых устройств, принцип работы которых основан на этих явлениях, позволит значительно расширить существующую компонентную базу СВЧ микроэлектроники. В частности, для увеличения эффективности энергопотребления устройств на основе слоистых мультиферроидных структур в работе [3] было предложено использовать феррит-сегнетоэлектрические структуры в сочетании с узкими щелевыми линиями передачи (ЛП), в которых ЭМСВ формируется в результате гибридизации поверхностных СВ в ферритовой пленки и ЭМВ в щелевой линии. При этом полученные результаты нашли свое подтверждение как при теоретическом моделировании, так и в результате экспериментальных исследований [4, 5]. Однако до настоящего времени не было разработано теории, описывающей дисперсионные характеристики ЭМСВ в копланарной линии передачи, построенной на тонкопленочных структурах феррит-

сегнетоэлектрик.

2. Электродинамический анализ процессов распространения электромагнитно-спиновых волн в копланарной линии передачи

На рисунке 1 показано поперечное сечение копланарной ЛП шириной d , состоящей из нескольких слоев, пронумерованных снизу-вверх. Номер каждого слоя обозначен индексом j . Толщина и диэлектрическая проницаемость немагнитных слоев обозначены как t_j и ε_j соответственно. Ферритовый слой имеет толщину δ и диэлектрическую проницаемость ε_f . В рассматриваемой конфигурации ЭМСВ распространяются вдоль оси x , т. е. вдоль слоистой структуры, которая намагничена до насыщения однородным магнитным полем \vec{H}_0 вдоль оси z .

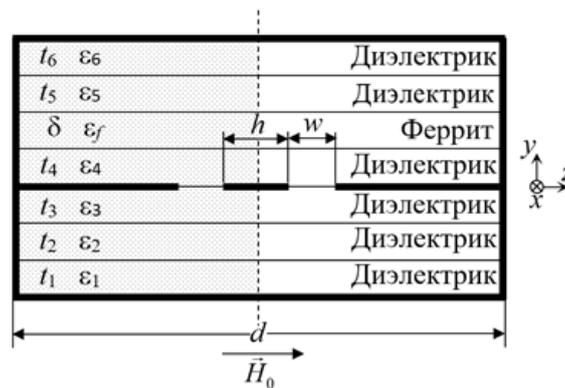


Рисунок 1. Поперечное сечение копланарной ЛП на структуре феррит-диэлектрик.

Решение поставленной электродинамической задачи было сведено к выводу дисперсионного уравнения для симметричного прямоугольного волновода, поперечное сечение которого представляет собой копланарную ЛП. При этом в соответствии с работой [6] электродинамическая задача сводится к нахождению закона дисперсии волн в щелевой ЛП с заменой двух боковых электрических стенок на идеальные магнитные стенки. Такой подход физически оправдан, так как в копланарной линии с узкими щелями w электрическое поле локализовано в щелях и является симметричным.

В целях упрощения теоретического вывода приближенное дисперсионное соотношение было найдено путем решения полной системы уравнений Максвелла с использованием метода приближенных граничных условий (ПГУ). Известно, что любое электромагнитное поле в прямоугольном волноводе с ЛП может быть представлено в виде суперпозиции продольно-электрических (LSE) и продольно-магнитных (LSM) мод [7].

В каждой диэлектрической области, кроме феррита, электродинамические потенциалы удовлетворяют скалярным уравнениям Гельмгольца, решение которых позволяют определить компоненты LSE- и LSM-полей в каждом диэлектрическом слое структуры. Для определения компонент этих полей в феррите использовался метод ПГУ. В этом методе СВЧ электрическое и магнитное поля внутри ферромагнитного слоя заменяются их усредненными значениями на границах соседних слоев, а их производные – приращениями соответствующих полей на толщине слоя феррита. Высокая точность метода ПГУ при нахождении дисперсионных зависимостей спиновых волн в тонких слоях феррита и в слоистых феррит-диэлектрических структурах была продемонстрирована в работе [6].

Далее все найденные компоненты подставляются в электродинамические граничные условия и граничные условия на щелевой линии. Следуя методу Галеркина

с дальнейшим интегрированием внутри щелевой линии и с учетом непрерывности тангенциальных компонент электрического поля внутри щелевой щели, была найдена система однородных алгебраических уравнений. Дисперсионное соотношение находится из условия равенства нулю определителя матрицы, составленной из полученной системы уравнений.

Предложенная аналитическая теория была использована для разработки программы численного расчета дисперсионных характеристик ЭМСВ в копланарных ЛП на тонкопленочной структуре феррит-сегнетоэлектрик. Разработанная программа позволяет исследовать спектры волн в различных структурах, которые представляют интерес для создания новых электронно-управляемых СВЧ приборов и устройств. Рассмотрим особенности формирования спектров ЭМСВ в копланарной ЛП, состоящей из двух диэлектрических слоев ($j=1$ и $j=4$), сегнетоэлектрической пленки ($j=2$) и ферритовой пленки ($j=3$). При моделировании были использованы следующие типичные параметры структуры: $\epsilon_2 = 10$, $t_2 = 500$ мкм; $\epsilon_3 = 1500$, $t_3 = 2$ мкм; $\epsilon_f = 14$, $\delta = 10$ мкм, $M_0 = 1750$ Гс; $\epsilon_5 = 14$, $t_5 = 500$ мкм; $H = 1350$ Э; $w = 50$ мкм, $h = 50$ мкм. Отметим, что в далее дисперсионные характеристики, рассчитанные при данных параметрах, показаны сплошными черными линиями.

Проведем исследование влияния геометрических и физических параметров ферритовых и сегнетоэлектрических слоев на особенности формирования спектра ЭМСВ. На рисунке 2 приведены спектры волн для различных значений ширины щели w , толщины сегнетоэлектрика t_3 и феррита δ , а также ширины центрального полоска h .

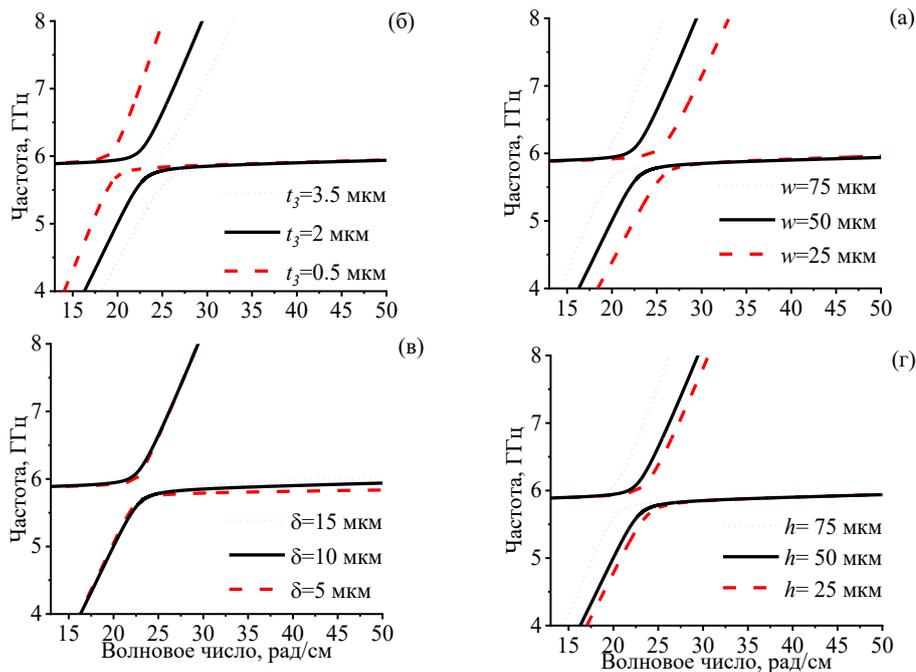


Рисунок 2. Влияние ширины щели w (а), толщины сегнетоэлектрической пленки t_3 (б), толщины ферритовой пленки δ (в) и ширины центрального металлического полоска h (г) на дисперсионные характеристики ЭМСВ

Как видно из данного рисунка, уменьшение ширины щели линии w и ширины центрального электрода h также, как и увеличение толщины сегнетоэлектрической пленки t_3 , смещает дисперсионную характеристику ЭМСВ в область больших волновых чисел (см. рисунки 2 (а), (б) и (в)). При этом при усиливается электродинамическое взаимодействие СВ, распространяющихся в ферритовой пленке, и ЭМВ в ЛП. Изменение толщины ферритовой пленки δ обеспечивает изменение наклона дисперсионных ветвей ЭМСВ вблизи частоты ферромагнитного резонанса, что приводит к существенному изменению групповой скорости волны (см. рисунок 2(г)).

Перейдем теперь к анализу диапазонов электрической и магнитной перестройки электромагнитно-спиновых волн в исследуемой ЛП. На рисунке 3 показаны результаты численного моделирования дисперсионных характеристик ЭМСВ при различных значениях внешнего магнитного поля и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика.

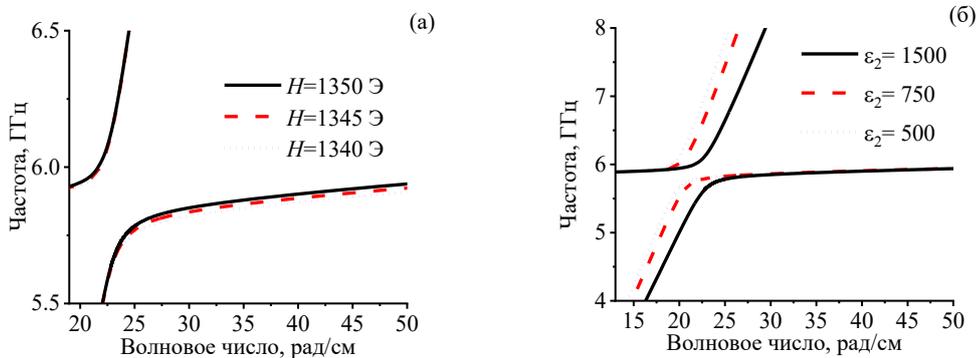


Рисунок 3. Магнитная (а) и электрическая (б) перестройки дисперсионных характеристик ЭМСВ

Из рисунка 3 (а) видно, что увеличение напряженности внешнего магнитного поля H приводит к смещению спектра ЭМСВ в область более высоких частот. Изменение диэлектрической проницаемости ϵ_2 сегнетоэлектрической пленки, вызванное приложением управляющего напряжения к электродам копланарной ЛП, приводит к увеличению фазовой скорости ЭМСВ (см. рисунок 3 (б)). В результате увеличивается диапазон волновых чисел, в котором фазовые скорости ЭМВ в копланарной ЛП и СВ в ферритовой пленке близки. Это обеспечивает усиление электродинамического взаимодействия этих волн, а, следовательно, перестройку спектра рабочих волн. В результате исследований было обнаружено, что диапазон электрической перестройки спектра ЭМСВ может быть увеличен путем усиления электродинамического взаимодействия СВ и ЭМВ, реализуемого уменьшением ширины щели и центрального металлического электрода, а также увеличением толщины сегнетоэлектрической пленки.

3. Заключение

Наиболее существенные результаты, полученные в данной работе, состоят в следующем:

1. Выведено дисперсионное уравнение, описывающее распространение ЭМСВ в копланарной линии передачи на тонкопленочных структурах феррит-сегнетоэлектрик;
2. Проведен анализ влияния различных параметров ферритовых и сегнетоэлектрических слоев на особенности формирования дисперсионных характеристик ЭМСВ, распространяющихся в мультиферроидной структуре с копланарной ЛП;
3. Численно исследованы магнитное и электрическое управление дисперсионными характеристиками ЭМСВ. Показано, что диапазон электрической перестройки может быть увеличен за счет усиления электродинамического взаимодействия спиновых и электромагнитных волн.

Список литературы

1. Demidov, V. E. Dipole-exchange theory of hybrid electromagnetic-spin waves in layered film structures / V. E. Demidov, B. A. Kalinikos, and P. Edenhofer // Journal of Applied Physics — 2002. — Vol. 91. — P. 10007-10016.
2. Vopson, M. M. Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications / M. M. Vopson // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences — 2015. — Vol. 40. — P. 1-28.

3. Semenov, A.A. Dual tunable thin-film ferrite-ferroelectric slotline resonator / A. A. Semenov, [et al.] // *Electronics Letters* — 2008. — Vol. 44. — P. 1406 – 1407.
4. Nikitin, A. A. All-thin-film multilayered multiferroic structures with a slot-line for spin-electromagnetic wave devices / A. A. Nikitin, [et al.] // *Applied Physics Letters* — 2014. — Vol. 104. — P. 093513.
5. Nikitin, A. A. Dispersion characteristics of spin-electromagnetic waves in planar multiferroic structures / A. A. Nikitin, [et al.] // *Journal of Applied Physics* — 2015. — Vol. 118. — P. 183901.
6. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах / Иванов А.А. — СПб.: Элмор, 2007. —162 с.
7. Частично заполненные прямоугольные волноводы / Егоров Ю.В. — М.: Советское радио, 1967. — 216 с.