

**Ал.А. Никитин<sup>1</sup>, В.В. Витько<sup>1</sup>, Ан.А. Никитин<sup>1</sup>,  
А.Б. Устинов<sup>1</sup>, А.А. Семенов<sup>1</sup>, П.Ю. Белявский<sup>1</sup>, Н.В. Кожусь<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский имени В. Б. Бобкова филиал Российской таможенной  
академии

## **Исследование спектра гибридных электро-магнитных волн в многослойных тонкопленочных феррит-диэлектрических структурах**

*Найдены спектры электро-магнитных спиновых волн (ЭМСВ) и  
исследованы особенности их распространения в многослойных феррит  
сегнетоэлектрических (ФС) структурах. Показано влияние толщины  
сегнетоэлектрика между пленками феррита на спектр ЭМСВ.  
Проанализировано влияние тонкой сегнетоэлектрической пленки на  
спектр волн и возможность реализации электрического управления  
спектром ЭМСВ в исследуемых структурах.*

**Ключевые слова:** электромагнитно-спиновые волны, феррит, сегнетоэлектрик

Множество устройств СВЧ, работающих в широком диапазоне частот, изготавливаются на основе тонкопленочных ферромагнитных материалов. Широкое применение таких устройств в технике СВЧ обусловлено в основном особенностями распространения спиновых волн (СВ) в намагниченных монокристаллических пленках феррита. Преимуществами таких волн являются низкие потери на распространение, разнообразие дисперсионных характеристик, а также сравнительно низкие фазовая и групповая скорости, позволяющие реализовывать большое разнообразие миниатюрных СВЧ устройств. Как показано в работах [1, 2] одним из возможных способов электрического управления устройствами на основе сегнетоэлектрических материалов является перестройка спектра ЭМВ за счет изменения напряженности внешнего электрического поля. Для сегнетоэлектрических материалов характерны высокие значения диэлектрической проницаемости, величина которой изменяется под воздействием электрической поля.

В работах [3,4,5] показано, что в многослойной структуре, содержащей сегнетоэлектрические и ферритовые слои, возможна гибридизация электромагнитных и спиновых волн с образованием ЭМСВ в ФС структуре. Стоит отметить, что управление диэлектрической проницаемостью сегнетоэлектрика происходит за счет изменения прикладываемого электрического поля [6,7,8], в результате чего дисперсионные характеристики ЭМСВ перестраиваются при изменении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Известно, что необходимым условием взаимодействия СВ в ферритовом слое и ЭМВ в открытом диэлектрическом волноводе на основе сегнетоэлектрика является равенство их групповых скоростей. Данное условие накладывает ограничение на минимальную толщину сегнетоэлектрика на частотах до 10 ГГц, которая составляет порядка 200 – 500 мкм. При таких толщинах значения прикладываемых управляющих напряжений необходимых для изменения диэлектрической проницаемости в 1,5 раза достигают 1000-1500 В. В настоящее время

наиболее актуальной задачей является поиск способов снижения значения управляющего напряжения, что позволит значительно расширить возможности использования ФС структур в устройствах СВЧ. Таким образом, целью данной работы является исследование волновых процессов в тонкопленочных структурах, содержащих пленки феррита, разделенных тонким сегнетоэлектрическим слоем. Такая задача представляет интерес, как с фундаментальной, так и с практической точки зрения.

Ранее в работах [9,10] была построена теоретическая модель, описывающая дисперсию ЭМСВ в ФС структуре, состоящей из чередующихся ферритовых и диэлектрических слоев. Эта теоретическая модель была использована для нахождения спектров ЭМСВ в исследуемых структурах.

Рассмотрим структуру, содержащую два ферритовых слоя (это может быть пленки железоиттриевого граната), разделенных сегнетоэлектриком (например, керамика титаната бария стронция  $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ ). Схематическое изображение исследуемой структуры представлено на рис. 1. При моделировании использовались следующие фиксированные значения толщин диэлектрических слоев галлий гадолиниевого граната ( $a_1=a_5= 500$  мкм), выполняющие роль подложек для ферритовых пленок ( $a_2 = 6$  мкм,  $M_2= 1790$  Гс;  $a_4 = 20$  мкм,  $M_4=1750$  Гс). Величина внешнего магнитного поля  $H = 1500$  Э, которое было направлено вдоль оси  $x$ .

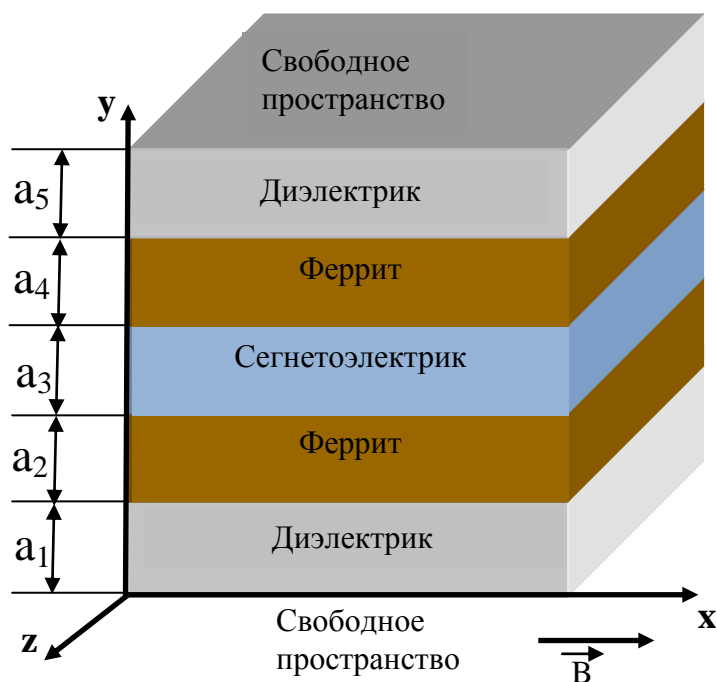


Рис. 1. ФС многослойная структура.

Для того чтобы объяснить образование и особенности спектров ЭМСВ, распространяющихся в таких ФС структурах, было проведено численное моделирование и построен график дисперсионных характеристик, изображенный на рис. 2. Отметим, что в данном случае исследовалась структура, в которой диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика составляла 1000.

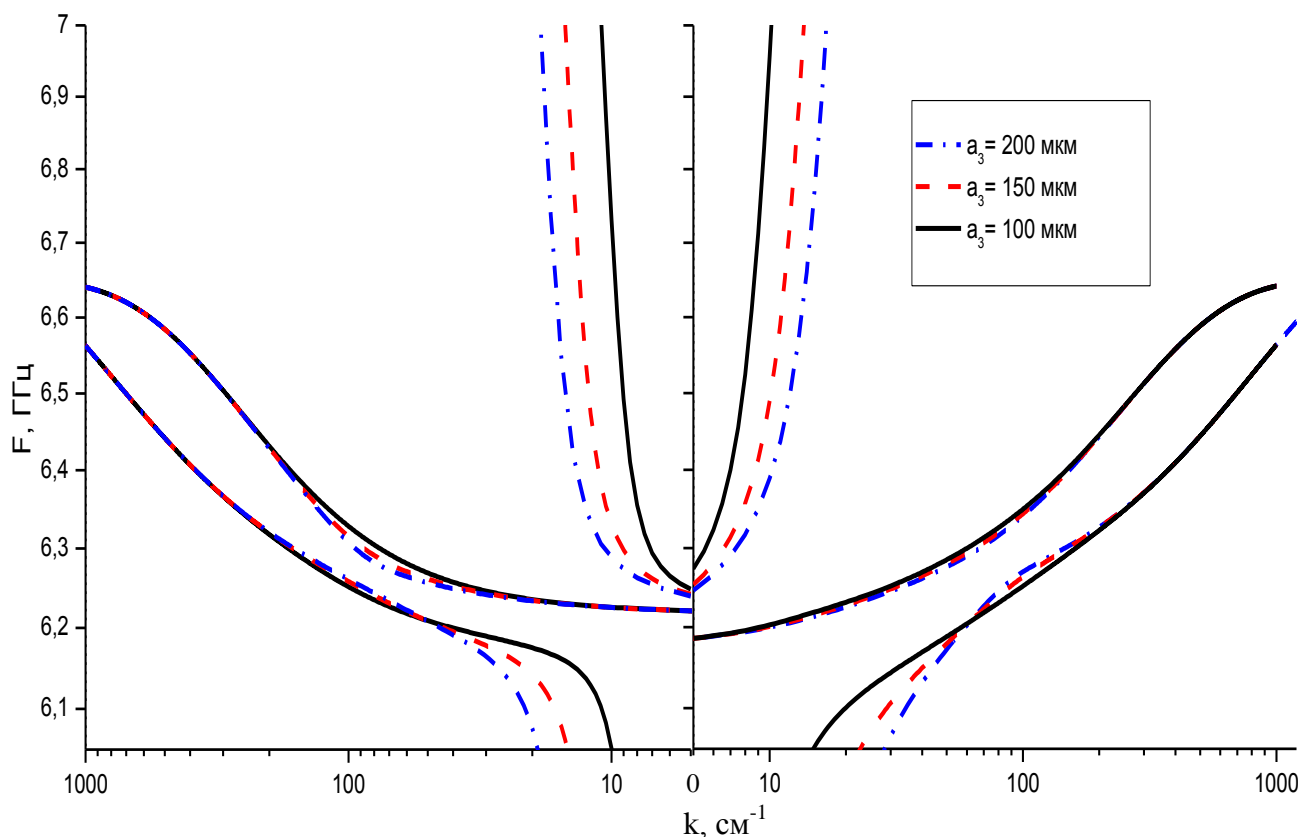


Рис. 2. Спектры волн в ФС структуре.

На рисунке 2 показаны дисперсионные зависимости гибридных ЭМСВ, распространяющихся в многослойной ФС структуре. На правой части графика показана дисперсия волны, распространяющейся в прямом направлении ( $k > 0$ ), а на левой части графика – в обратном ( $k < 0$ ). В случае распространения волны в направлении  $z$  и внешнего магнитного поля, направленного по оси  $x$ , СВ локализована у верхней поверхности феррита. Изменение направления распространения приводит к тому, что СВ распространяется вдоль нижней границы феррита. Таким образом, если рассматривать гибридизацию ЭМСВ в слоистой структуре, содержащей две пленки феррита, необходимо учесть последовательность взаимодействий между ЭМВ и СВ в ферритовых пленках. Так на рисунке 2 показаны две зоны гибридизации. В первой зоне ( $k = 20 \text{ см}^{-1}$ ) гибридизация происходит между СВ в тонком слое феррита и ЭМВ слое сегнетоэлектрика. В зависимости от того распространяется СВ вдоль границы сегнетоэлектрик – феррит или вдоль границы феррит – свободное пространство величина взаимодействия между СВ и ЭМВ будет разной. Вторая зона ( $k = 77 \text{ см}^{-1}$ ) обусловлена гибридизацией между СВ, распространяющейся в нижнем слое феррита, и ЭМСВ. В результате, спектры ЭМСВ в структуре, показанной на рисунке 2, содержат три дисперсионные ветви. Стоит отметить, что в случае противоположного направления распространения ЭМСВ гибридизация происходит сначала между СВ в толстом слое феррита и ЭМВ в слое сегнетоэлектрика. Таким образом, средняя ветвь результирующей дисперсии ЭМСВ практически совпадает либо с дисперсионной характеристикой СВ в тонком ферритовом слое, либо с дисперсионной характеристикой СВ в толстом ферритовом слое.

Ранее было отмечено, что одним из способов снижения значений прикладываемых управляющих напряжений является уменьшение толщины сегнетоэлектрического слоя. Рассмотрим особенности волновых процессов в структуре, в которой ферритовые слои разделены пленкой сегнетоэлектрика толщиной  $a_3 = 10$  и  $20$  мкм (рис. 3).

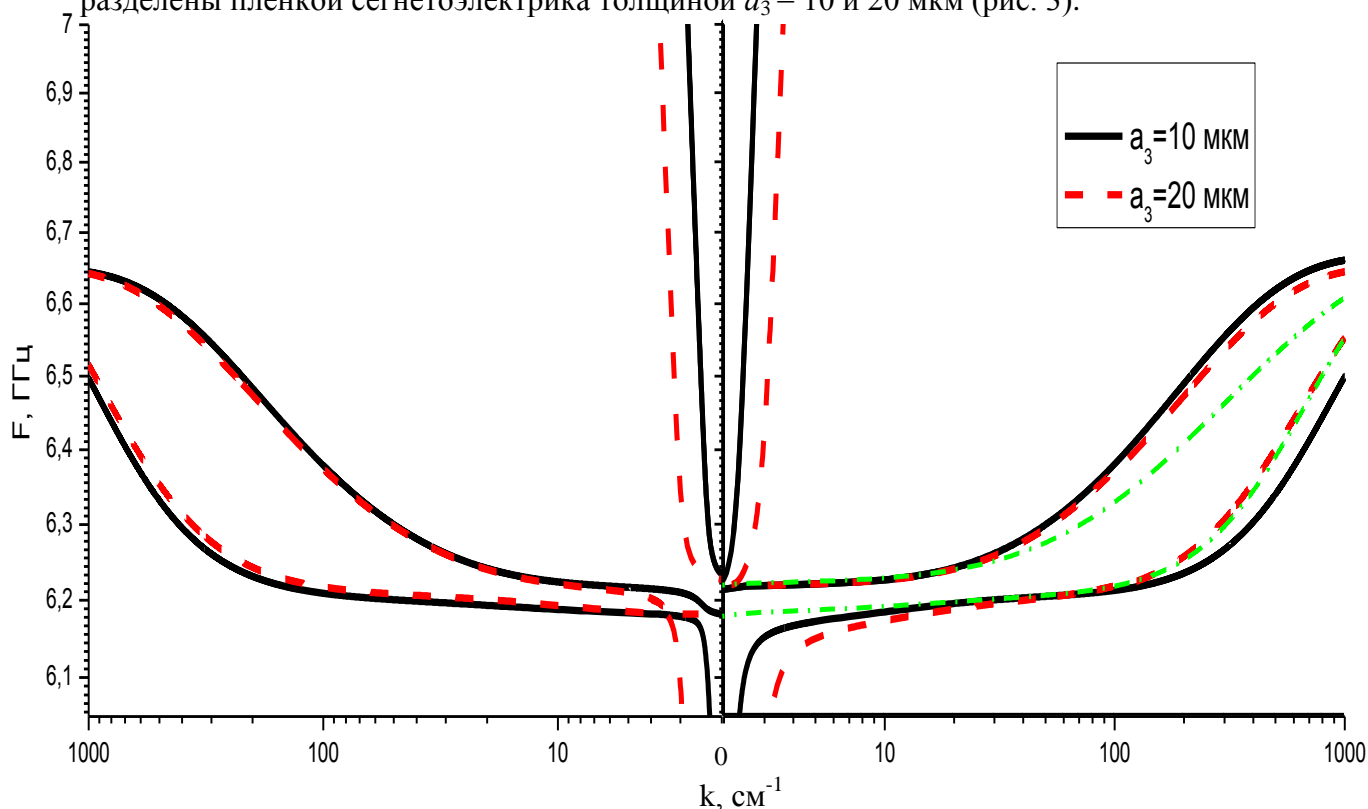


Рис. 3. Спектры волн в тонкопленочной ФС структуре.

Из данного графика видно, что в исследуемой структуре спектр ЭМСВ смещается на значительно меньшие частоты, чем в случае, рассмотренном ранее. На рис. 3 зелеными штрих-пунктирными линиями изображены СВ в структуре, содержащей два ферритовых слоя, разделенных  $20$  мкм свободного пространства. Таким образом, видно, что по сравнению со структурой, рассмотренной ранее, ферриты взаимодействуют друг с другом более эффективно, видоизменяя спектр ЭМСВ. Стоит отметить, что диапазон взаимодействия ЭМСВ увеличивается с уменьшением расстояния между пленками феррита, и в зависимости от положения точки квази-пересечения можно получить значительное изменение величины взаимодействия между ЭМСВ. Таким образом, появляется возможность реализовать перестройку спектра ЭМСВ в исследуемой ФС структуре с помощью изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика.

Влияние диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя на дисперсионную характеристику ЭМСВ, распространяющихся в исследуемой структуре, показано на рисунке 3.9. Отметим, что проводилось моделирование структуры, в которой толщина сегнетоэлектрика  $a_3 = 10$  мкм.

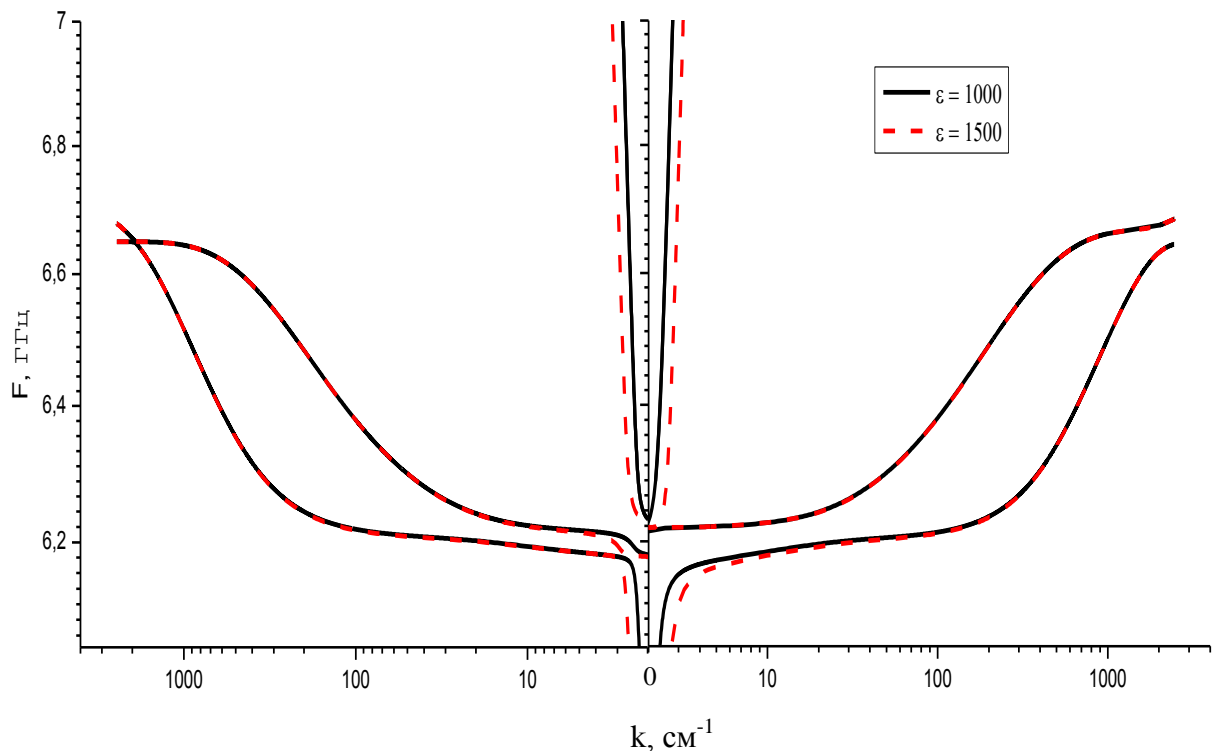


Рис. 4. Электрическая перестройка дисперсионной характеристик ЭМСВ в ФС многослойной структуре

Из приведенного выше рисунка следует, что изменение диэлектрической проницаемости в сегнетоэлектрическом слое делает возможной реализацию электрической перестройки спектров ЭМСВ в исследуемой ФС структуре.

Таким образом, в данной работе представлены результаты численного моделирования спектров ЭМСВ, распространяющихся в структуре, содержащей две ферритовых пленки, разделенных сегнетоэлектрическим слоем. Также проанализировано влияние толщины сегнетоэлектрической пленки на спектр волн в исследуемых структурах и показана возможность электрического управления спектром ЭМСВ. На основании проведенного исследования можно сделать важный вывод о том, что величина перестройки по волновым числам зависит от толщины, как сегнетоэлектрика, так и пленок феррита.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и базовой части госзадания Минобрнауки РФ.

#### Библиографический список

1. А.А. Иванов, С.Ф. Карманенко, И.Г. Мироненко, И.А. Назаров, А.А. Семенов Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах / СПб.: Элмор, 2007. 162 с. 11)
2. Вендик О. Г. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / О. Г. Вендик // Сов. радио. – М., 1979. – 272 С.
3. Nan C. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions / C. Nan, M.I. Bichurin, S. Dong, et al. // J. Appl. Phys. –2008.–V.103.–P. 031101–031101-35 18)
4. Демидов В. Е. Электрическая перестройка дисперсионных характеристик спиновых волн в слоистых структурах металл—сегнетоэлектрик–феррит–сегнетоэлектрик–металл / В. Е. Демидов, Б. А. Калиникос // Письма в журнал технической физики. – 1999. – Т.25. – Вып. 21. –С. 86–94.
5. V. E. Demidov. Electrically tunable microwave phase shifter based on layered ferrite-ferroelectric structure. / V. E. Demidov, P. Edenhofer, B. A. Kalinikos // Electronics Letters. – 2001. – vol. 37. – Is. 19/ – pp. 1154-1156

6. В.Е. Демидов, Б.А. Калиникос, Особенности спектра дипольно-обменных электромагнитно-спиновых волн в несимметричных структурах металл–диэлектрик–ферромагнетик–диэлектрик–металл. ЖТФ. 2001, Т.71, Вып. 2, С.89-93. 4.
7. В.Е. Демидов, Б.А. Калиникос, Спектр дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных слоистых структурах металл-сегнетоэлектрик-ферромагнетик-сегнетоэлектрик-металл. Письма в ЖТФ. 2000, Т.26, Вып. 7, С.8-17.
8. Cheong S.W. Multiferroics: a magnetic twist for ferroelectricity / S.W. Cheong, M. Mostovoy // Nat. Mater. – 2007. V.6. – P.13-20.
9. В.В. Витько, Ал.А. Никитин, Ан.А. Никитин, А.А. Семенов, П.Ю. Белявский ” Дисперсия электромагнитно-спиновых волн в феррит-сегнетоэлектрических многослойных структурах”, Материал доклада участвовал во Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ» 4-7 июня 2012 г.
10. Ал.А. Никитин, В.В. Витько, Ан.А. Никитин, А.Б. Устинов, А.А. Семенов, П.Ю. Белявский, “Исследование волновых процессов в феррит-сегнетоэлектрических структурах, содержащих несколько пленок феррита”, материал доклада участвовал во Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 3-7 июня 2013 г. в категории стендовых докладов