

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

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

Исследование волновых процессов в феррит- сегнетоэлектрических структурах, содержащих несколько пленок феррита

Найдены спектры спиновых волн (СВ) и исследованы особенности их распространения в слоистых структурах. Показано влияние расстояния между пленками феррита на спектр СВ. Проанализировано влияние тонкой сегнетоэлектрической пленки на спектр волн в исследуемых структурах. Показана возможность электрического управления спектром электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ). Проведен анализ влияния различных параметров на величину перестройки волнового числа.

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

Одним из главных преимуществ устройств на основе мультиферроиков является возможность двойного электронного управления характеристиками этих устройств. Перестройка дисперсионных характеристик в таком случае осуществляется за счет изменения внешних электрического и магнитного полей. Стоит отметить, что такие устройства могут быть созданы на основе ФС структур. Как было показано в работах [1-3], в таких структурах распространяются гибридные ЭМСВ, сочетающие в себе свойства спиновых и электромагнитных волн. Известно, что необходимым условием гибридизации таких волн является равенство их фазовых скоростей. Данное условие накладывает ограничение на минимальную толщину сегнетоэлектрических пленок, порядка 200 – 500 мкм [2]. При таких толщинах значения прикладываемых управляющих напряжений 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.

Из работ [4-6] известно, что спектр СВ в структурах на основе нескольких ферритовых слоев, разделенных тонкими диэлектрическими слоями или свободным пространством, зависит от расстояния между ферритовыми слоями. Изменение диэлектрической проницаемости промежуточного слоя приводит к перестройке спектра волн. Таким образом, наличие тонкого сегнетоэлектрического слоя позволяет реализовать электрическое управление. Однако теоретических исследований тонкопленочных ФС структур, состоящих из нескольких ферритовых и сегнетоэлектрических пленок, до настоящего времени не проводилось. Таким образом, целью данной работы является

исследование электрической перестройки дисперсионных характеристик ЭМСВ в структурах, содержащих тонкие ферритовые и сегнетоэлектрические пленки.

Ранее в работе [7], была построена теоретическая модель, описывающая дисперсию ЭМСВ в ФС структуре, состоящей из чередующихся ферритовых и диэлектрических слоев. Построенная теоретическая модель была использована для нахождения спектров ЭМСВ в структуре, содержащей две пленки феррита, разделенных сегнетоэлектрическим слоем.

Для более наглядного описания исследуемого эффекта был рассчитан спектр ЭМСВ в структуре, состоящей из двух ферритовых слоев одинаковой толщины, разделенных свободным пространством (рис. 1), где a_1 и a_2 – толщина ферритов, a_3 – расстояние между ними. На рис. 2 представлен результат проведенного численного моделирования. Сплошной черной линией показана дисперсионная характеристика ЭМСВ, если ферриты удалены друг от друга на бесконечно большое расстояние, а зеленая пунктирная линия соответствует случаю когда между ними 1 мкм. Стоит отметить, что при уменьшении расстояния диапазон взаимодействия спиновых волн увеличивается. При длинах волн много меньше расстояния между ферритами ЭМСВ распространяются по отдельности и не взаимодействуют. Стоит отметить, что при уменьшении расстояния вплоть до $a_3 = 0$ верхняя дисперсионная ветвь ЭМСВ стремится к дисперсионной характеристике СВ в пленке удвоенной толщины.

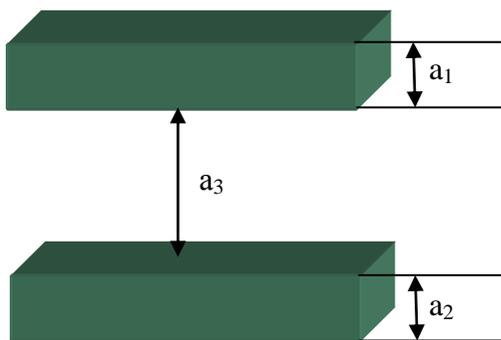


Рисунок 1.

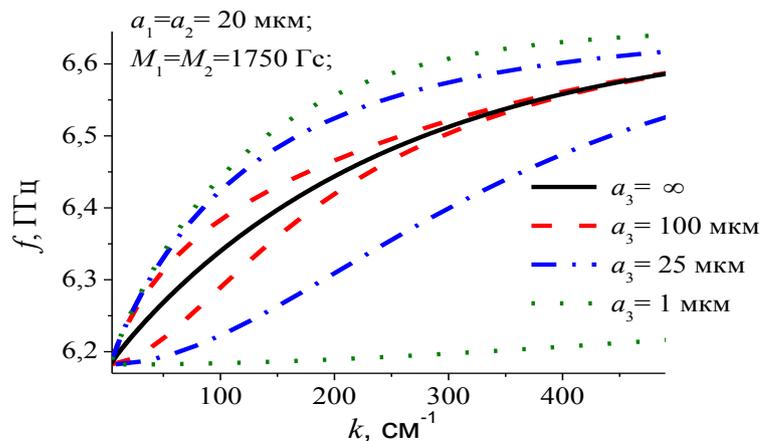


Рисунок 2.

Рассмотрим более сложную структуру, в которой ферритовые слои имеют различные параметры. Наиболее интересным случаем является случай пересечения дисперсионных характеристик, что достигается в случае пленок феррита с различными параметрами, например $a_1 = 20$ мкм, $M_1 = 1750$ Гс и $a_2 = 6$ мкм, $M_2 = 1790$ Гс. Дисперсионные характеристики при таких параметрах имеют вид, представленный на Рис.3. Черным цветом показана дисперсионная характеристика СВ, когда ферриты удалены друг от друга на бесконечно большое расстояние и не взаимодействуют друг с другом. Дисперсионные ветви в рассмотренном случае имеют точку квази-пересечения. Красная линия соответствует случаю, в котором между ферритами 100 мкм свободного

пространства, синяя линия – 25 мкм свободного пространства, и зеленая линия – 1 мкм свободного пространства. Как видно из Рис.3 дисперсионные характеристики расталкиваются в области точки квази-пересечения, что обусловлено сильным взаимодействием ЭМСВ в разных слоях. Как и в предыдущем случае диапазон взаимодействия ЭМСВ увеличивается с уменьшением расстояния. В зависимости от положения точки квази-пересечения можно получить значительное изменение величины взаимодействия между ЭМСВ. Следовательно, управление величиной взаимодействия ЭМСВ, распространяющихся в пленках феррита, может быть достигнуто благодаря наличию тонкой сегнетоэлектрической пленки между ферритовыми слоями, как показано на Рис.4. Таким образом, реализовать перестройку спектра ЭМСВ в исследуемой ФС структуре возможно с помощью изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика.

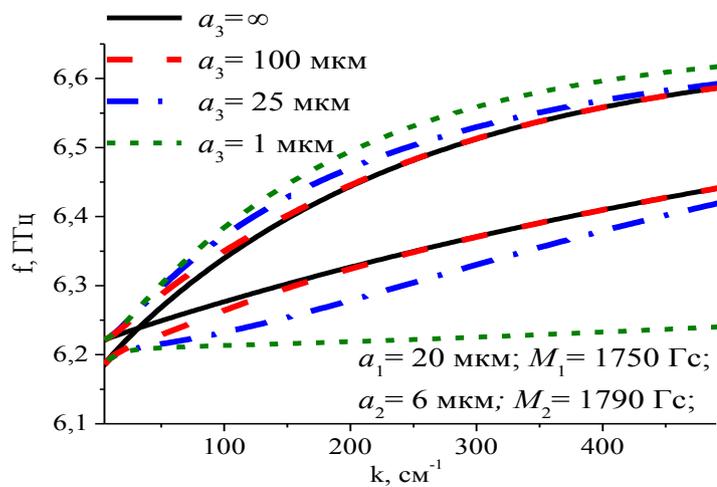


Рисунок 3.

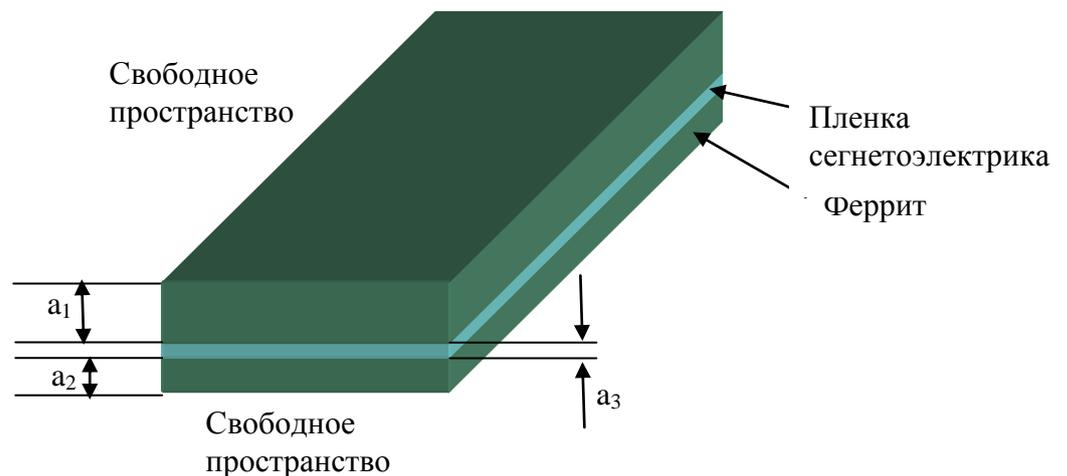


Рисунок 4.

Непосредственно в этом случае дисперсионные характеристики, недостаточно информативны для анализа диапазона электрической перестройки, поэтому проведено численное моделирование диапазона перестройки волнового числа при изменении диэлектрических проницаемостей сегнетоэлектрической пленки. На Рис. 5 и Рис. 6 приведена зависимость изменения волнового числа от частоты для верхней и нижней дисперсионных ветвей соответственно. Сплошными линиями показаны случаи с сегнетоэлектрической пленкой толщиной $a_3 = 5$ мкм, а пунктирными линиями с пленками толщиной $a_3 = 1$ мкм. Красным цветом проиллюстрирован случай $a_1 = 20$ мкм, $M_1 = 1750$ Гс, $a_2 = 14$ мкм $M_2 = 1790$ Гс, черным цветом – случай $a_1 = 20$ мкм, $M_1 = 1750$ Гс, $a_2 = 6$ мкм $M_2 = 1790$ Гс, а синим цветом – случай $a_1 = 20$ мкм, $M_1 = 1750$ Гс, $a_2 = 6$ мкм, $M_2 = 1850$ Гс. Таким образом, наибольший диапазон электрической перестройки имеют структуры, в которых ферритовые слои сильно отличаются друг от друга по толщине. Стоит также отметить, что пик электрической перестройки соответствует точке квази-пересечения дисперсионных характеристик. Увеличение толщины сегнетоэлектрика приводит к усилению взаимодействия ЭМСВ и, соответственно, большей перестройки дисперсионной характеристики. Из Рис.6 видно, что перестройка нижней дисперсионной ветви достигает больших значений, чем перестройка верхней дисперсионной ветви (Рис.5).

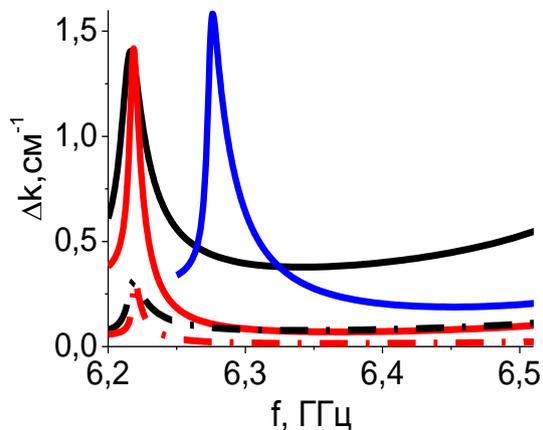


Рисунок 5.

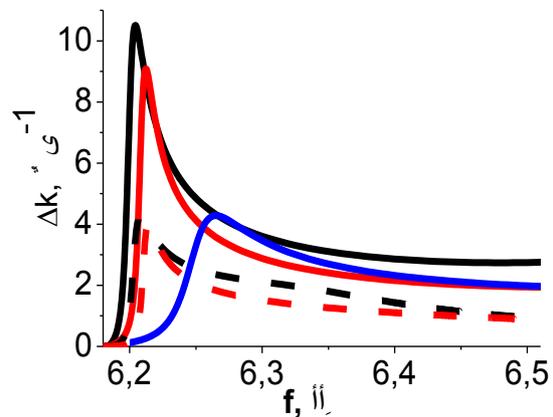


Рисунок 6.

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность электрического управления спектром ЭМСВ в тонкопленочной ФС структуре, которая достигается за счет изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя толщиной 1-5 мкм, расположенного между двумя слоями феррита. Проанализировано влияние тонкой сегнетоэлектрической пленки на спектр волн в исследуемых структурах. Показана возможность электрического управления спектром электромагнитно-спиновых волн. На основе чего было установлено, что наибольшая электрическая перестройка наблюдается в случае использования различных по толщине ферритовых пленок в ФС структуре.

Библиографический список

1. Demidov V. E. Dipole-exchange theory of hybrid electromagnetic-spin waves in layered film structures / V. E. Demidov, B. A. Kalinikos, P. Edenhofer // *J. Appl. Phys.* 2002. V.91. P. 10007-10007-10
2. Демидов В. Е. Спектр дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных слоистых структурах металл-сегнетоэлектрик-ферромагнетик-сегнетоэлектрик-металл / В. Е. Демидов, Б. А. Калиникос // *Письма в ЖТФ.* 2000. Т. 26. Вып. 7. С. 8-17.
3. Демидов В. Е. Дисперсионные характеристики поверхностных электромагнитно-спиновых волн в слоистых структурах феррит-сегнетоэлектрик-диэлектрик-металл / В. Е. Демидов, Б. А. Калиникос, С. Ф. Карманенко, А. А. Семенов, П. Эденхофер // *Письма в ЖТФ.* 2002. Том 28. С. 75-83.
4. Emtage P. R. Magnetostatic waves and spin waves in layered ferrite structures / P. R. Emtage and Michael R. Daniel // *PHYSICAL REVIEW B.* 1984. V. 29. № 1.
5. Grunberg P. Magnetostatic spin-wave modes of a ferromagnetic multilayer / P. Grunberg and K. Mika // *PHYSICAL REVIEW B.* 1983. V. 27. № 5.
6. CamleyTalat R. E. Magnetic excitations in layered media: Spin waves and the light-scattering spectrum / R. E. CamleyTalat S. Rahman and D. L. Mills // *PHYSICAL REVIEW B.* 1983 V.7. № 1.
7. 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.