

**В.В. Витько, А.А. Никитин, А.А. Никитин,
А.Б. Устинов, А.А. Семенов**
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

Электрическая перестройка дисперсионных характеристик электромагнитно-спиновых волн в структуре, содержащей два ферритовых и один сегнетоэлектрические слои

В работе найдены спектры электромагнитно-спиновых волн, распространяющихся в структуре, содержащей два ферритовых слоя, разделенных тонкой сегнетоэлектрической пленкой. Проанализировано влияние различных параметров исследуемой структуры на диапазон электрической перестройки дисперсионных характеристик.

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

Развитие технологии создания тонкопленочных гетероструктур стимулирует поиск и исследование новых искусственных функциональных материалов. В области СВЧ электроники одним из перспективных направлений исследования являются искусственные мультиферроидные структуры [1], которые могут быть образованы путем комбинации ферритовых и сегнетоэлектрических слоев [2]. Мультиферроидные свойства в таком случае проявляется в основном за счет двух эффектов. Первый – это магнитоэлектрический эффект, который основан на механическом взаимодействии ферритовых и сегнетоэлектрических кристаллических подрешеток [3]. Второй – это эффект электродинамической связи между спиновыми волнами (СВ) и электромагнитными волнами (ЭМВ) в феррит-сегнетоэлектрической (ФС) структуре [4], в результате которой в ФС структурах распространяются гибридные электромагнитно-спиновые волны (ЭМСВ).

Спектры ЭМСВ в ФС структурах, состоящих из одного слоя феррита и нескольких сегнетоэлектрических слоев, были изучены в работах [5, 6]. В них дисперсионные уравнения были получены методом тензорных функции Грина. Однако использование слоистых ФС структур в СВЧ электронике ограничено толщиной сегнетоэлектрического слоя. Из работы [7] известно, что для обеспечения эффективной гибридизации ЭМВ и СВ на частотах до 10 ГГц необходимо использование сегнетоэлектрических слоев толщиной порядка 300 мкм. В настоящее время становится актуальным исследование тонкопленочных ФС структур. В данной работе предложен новый метод создания электронно-управляемых мультиферроидных структур на основе сегнетоэлектрических пленок толщиной порядка нескольких десятков микрометров. Метод заключается во введении тонкой сегнетоэлектрической пленки между двумя пленками железо-иттриевого граната (ЖИГ). Изменение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки позволяет управлять взаимодействием СВ в разных ферритовых слоях, а, следовательно, и управлять результирующей дисперсией в исследуемой структуре. Отметим, что исследование спектра СВ для структуры, состоящей из нескольких ферритовых слоев, разделенных немагнитными диэлектрическими слоями было выполнено в работах [8, 9]. В результате было установлено, что наличие двух и более ферритовых слоев приводит к расщеплению основной моды на две и более дисперсионных ветвей. Однако в этом случае теоретические результаты были получены в магнитоэлектрическом

приближении, т.е. без учета электромагнитного запаздывания. Таким образом, целью данной работы является исследование дисперсионных характеристик ЭМСВ в структуре, содержащей два ферритовых и один сегнетоэлектрический слой.

Для исследования особенностей электрической перестройки спектров ЭМСВ была использована теория, построенная в работе [10]. Для моделирования были выбраны следующие параметры. Диэлектрические проницаемости пленок феррита с номерами 4 и 2 и диэлектрические проницаемости диэлектрических слоев, выполняющие роль подложек для пленок феррита с номерами 1 и 5, были равны $\epsilon_1=\epsilon_2=\epsilon_4=\epsilon_5=14$. Толщина диэлектрических слоев составляла $a_1=a_5=500$, а ферритовой пленки – $a_2=20$ мкм (с намагниченностью $M_2=1750$ Гс). Параметры пленки феррита с номером 4 – $a_4=6$ мкм, $M_2=1790$ Гс. Ферритовые слои разделены сегнетоэлектрическим слоем с толщиной $a_3=25$ мкм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_3=1500$ как показано на рис. 1. Стоит отметить, что внешнее поле H_0 составляло 1500 Э.

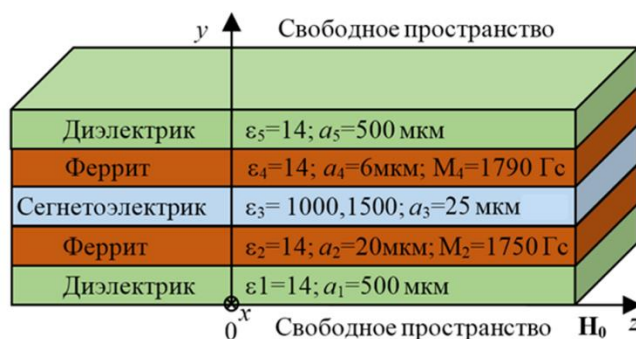


Рисунок 1. Исследуемая ФС структура

Дисперсионные характеристики СВ в двух ферритовых пленках, расположенных на расстоянии $a_3=25$ мкм ($\epsilon_3=1$) друг от друга, показаны на рис. 2 красной прерывистой линией. Хорошо известно, что поверхностные СВ являются не взаимными. Это значит, что распределения полей СВ зависят от направления распространения волны. При наличии сегнетоэлектрического слоя, расположенного между ферритами, дисперсионные характеристики ЭМВ (черная пунктирная линия) пересекает дисперсионную характеристику СВ (красная прерывистая линия). Это приводит к образованию ЭМСВ, которые показаны синими сплошными линиями на рис. 2. Для ЭМВ, распространяющиеся вдоль оси x, СВ в толстом феррите (a_2) сильнее взаимодействуют с дисперсионной характеристикой ЭМВ, которые располагаются в сегнетоэлектрическом слое (a_3). В этом случае средняя дисперсионная кривая ЭМСВ практически совпадает с верхней дисперсионной кривой СВ (верхняя красная прерывистая линия). При этом нижняя и средняя дисперсионные кривые ЭМСВ испытывают сильное расталкивание. В случае противоположного направления распространения взаимодействие ЭМВ и СВ в тонком ферритовом слое (a_4) сильнее, следовательно, начало средней дисперсионной кривой ЭМСВ совпадает началом нижней дисперсионной кривой СВ (нижняя красная прерывистая линия), а взаимодействие между средней и нижней дисперсионными характеристиками ЭМСВ слабое. Следовательно, диапазон электрической перестройки дисперсионных характеристик в случае противоположного направления оси x

должен быть меньше.

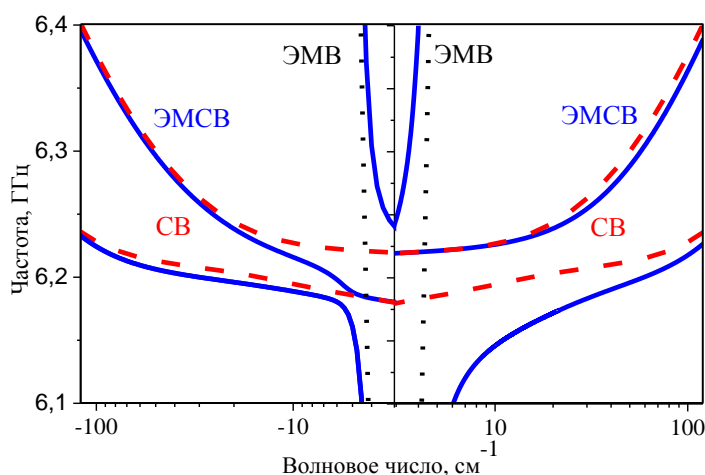


Рисунок 2. Спектры ЭМСВ волн в многослойной ФС структуре

Стоит отметить, что дисперсионные характеристики ЭМСВ сильно зависят от параметров структуры, в которой они распространяются. Следовательно, подбирая параметры структуры возможно увеличить диапазон электрической перестройки дисперсионных характеристик ЭМСВ. Таким образом, для изучения данного эффекта были построены зависимости перестройки волнового числа (Δk) от частоты для различных параметров структуры при изменении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от 1500 до 1000. Результаты моделирования при толщинах сегнетоэлектрического слоя от 10 до 30 мкм представлены на рис. 3. Стоит отметить, что для расчета диапазона перестройки волновых чисел были выбраны нижняя и средняя дисперсионные ветви как наиболее информативные.

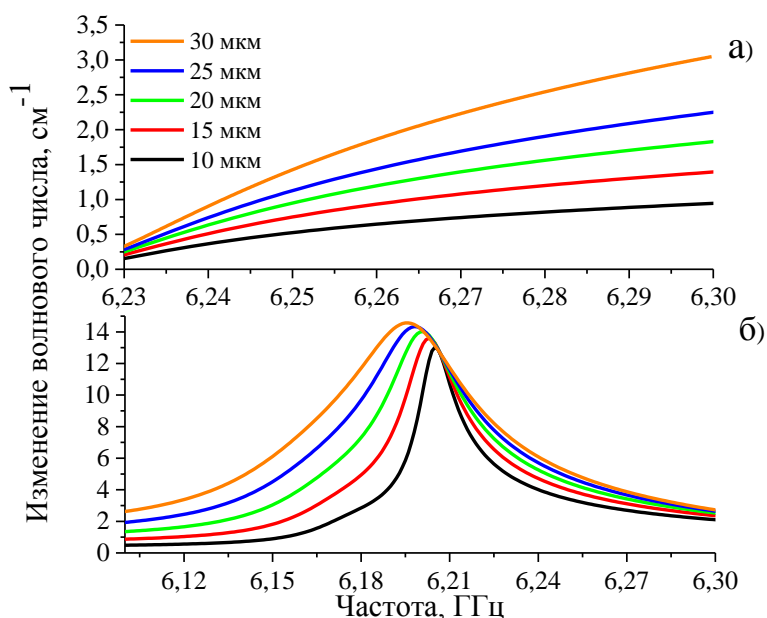


Рисунок 3. Зависимость изменения волнового числа от частоты для (а) средней и (б) нижней дисперсионной ветви

Из данного рисунка видно, что уменьшение толщины сегнетоэлектрического слоя в ФС структуре приводит к уменьшению взаимодействия между ЭМВ и СВ. В предельном случае при толщине порядка нескольких микрометрах это взаимодействие может достигать

достаточно малых значений, особенно для средней дисперсионной ветви. Отметим, что перестройка волнового числа для нижней дисперсионной ветви достигает больших значений, чем для средней. Следовательно, влияние диэлектрической проницаемости сильнее и электрическая перестройка ЭМСВ на нижней дисперсионной ветви выше. Кроме того, интервал электрической перестройки увеличивается с увеличением толщины сегнетоэлектрического слоя.

Было исследовано влияние толщин ферритовых слоев. Зависимости изменения волновых чисел от частоты для структуры с различными толщинами a_2 для нижнего феррита и a_3 для верхнего феррита (от 6 до 20 мкм) показаны на рисунке 4 и 5 соответственно.

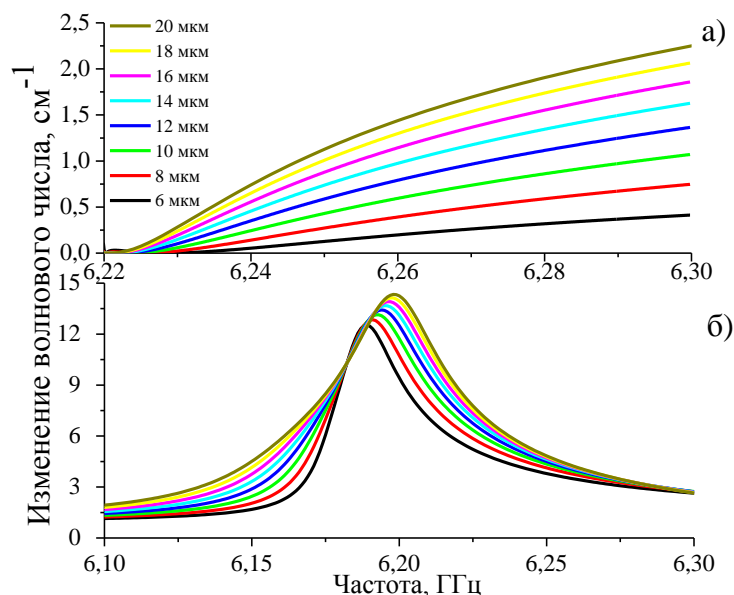


Рисунок 4. Зависимости изменения волновых чисел от частоты для (а) средней и (б) нижней дисперсионных ветвей в структуре с толщинами нижнего феррита от 6 до 20 мкм

Из приведенных рисунков видно, что увеличение толщины нижнего феррита приводит к уменьшению взаимодействия между ЭМВ и СВ. Следовательно, диапазон перестройки волновых чисел уменьшается для средней дисперсионной ветви и увеличивается для нижней. В этом случае частота, при которой достигается максимальное значение электрической перестройки, смещается к более низким значениям. Стоит отметить, что перестройка средней дисперсионной ветви имеет другое поведение, чем для нижней. Перестройка волновых чисел для нижней ветви имеет максимальные значения вблизи частоты взаимодействия волн, а для средней ветви они растут с увеличением частоты.

Увеличение толщины верхнего феррита приводит к более сильному взаимодействию между волнами, а частота, при которой достигается максимальное значение электрической перестройки, смещается к большим значениям. Наличие толстого слоя феррита приводит к более сильному взаимодействию ЭМВ и СВ. Следовательно, электрическая перестройка ЭМСВ в этом случае может быть увеличена.

В данной работе были исследованы спектры ЭМСВ, распространяющихся в ФС структурах, состоящих из двух ферритовых слоев, разделенных пленкой сегнетоэлектрика. Показана перестройка дисперсионных характеристик спектров ЭМСВ электрическим полем. Были исследованы и проанализированы влияния структурных параметров на диапазоны

электрической перестройки. Установлено, что изменение толщин ферритов приводит к значительному изменению взаимодействия между ЭМВ и СВ.

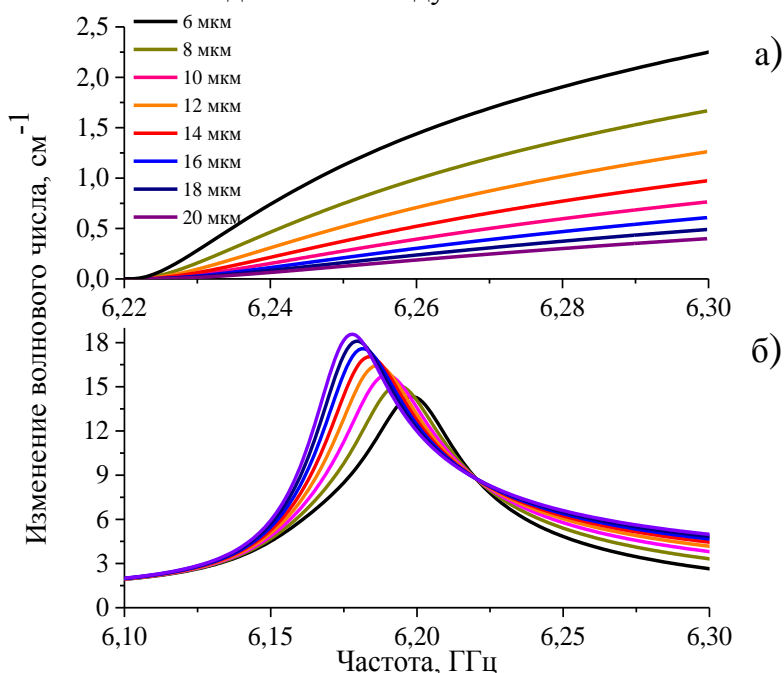


Рисунок 5. Зависимости изменения волновых чисел от частоты для (а) средней и (б) нижней дисперсионных ветвей в структуре с толщинами верхнего феррита от 6 до 20 мкм

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке в рамках гранта РФФИ (№14-02-31638 мол_а).

Библиографический список

1. C. A. F. Vaz, Artificial multiferroic heterostructures / Vaz C. A. F., Staub U. // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2013. – Т. 1. – №. 41. – pp. 6731-6742.
2. U. Ozgur, Microwave ferrites, part 2: passive components and electrical tuning / Ozgur U., Alivov Ya., Morkoc H. // *J. Mater Sci: Mater Electron*. – 2009. – Vol. 20. – pp. 911–952.
3. S. Shastry, Microwave magnetoelectric effects in single crystal bilayers of yttrium iron garnet and lead magnesium niobate-lead titanate / Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M. I., Petrov V. M., Tatarenko A. S. // *Physical Review B*. – 2004. – Т. 70. – №. 6. – p. 064416.
4. V. B. Anfinogenov, Hybrid electromagnetic-spin waves in contacting layers of ferrite and ferroelectric / Anfinogenov V. B., Verbitskaja T. N., Gulyaev Yu. V., Zil'berman P. E., Meriakri S. V., Ogrin Yu. F., and Tikhonov V. V. // *Sov. J. Commun. Technol. Electron*. – 1989. – Vol. 34. – Iss. 116.
5. V. E. Demidov, Electrical tuning of the dispersion characteristics of spin waves in metal-ferroelectric-ferrite-ferroelectric-metal layered structures / Demidov V. E., Kalinikos B. A. // *Technical Physics Letters*. – 1999. – Vol. 25. – Iss. 11. – pp. 880-883.
6. V. E. Demidov, Dipole-exchange theory of hybrid electromagnetic-spin waves in layered film structures / Demidov V. E., Kalinikos B. A., Edenhofer P. // *J. Appl. Phys*. – 2002. – Vol. 91. – pp. 10007-10007-10.
7. 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. – Iss. 19. – pp. 1154-1156.
8. R. E. Camley, Magnetic excitations in layered media: Spin waves and the light-scattering spectrum / Camley R. E., Rahman T. S., Mills D. L. // *Phys. Rev. B*. – 1983. – Vol. 27. – №1. – pp.261-277.
9. P. R. Emtage, Magnetostatic waves and spin waves in layered ferrite structures / Emtage P. R., Daniel M. R. // *Phys. Rev. B*. – 1984. – Vol. 29. – №1. – pp.212-220.
10. A.A. Nikitin, Dispersion of spin-electromagnetic waves in ferrite-ferroelectric multilayered structure / A.A. Nikitin, P.Yu. Beliaevskiy, V.V. Vitko, A.B. Ustinov, A.A. Semenov // "European Microwave Week" Amsterdam RAI, The Netherlands, October 28 – November 2 2012.