

**Н.Ю. Григорьева, Р.А. Султанов, Б.А. Калинин**  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

## **Управляемые слоистые мультиферроидные структуры для микро- и наноэлектроники терагерцового диапазона частот**

*Анализируются физические процессы в монокристаллических слоистых мультиферроидных структурах, построенных на основе пленок сильно анизотропных ферромагнетиков (гексаферритов) и сегнетоэлектрика. В результате решения полной системы уравнений Максвелла и уравнения движения намагниченности впервые получены дисперсионные характеристики собственных колебаний и волн в таких мультиферроидных структурах. Проанализированы потенциальные возможности применения рассматриваемых мультиферроидных структур в микро- и наноэлектронике для конструирования приборов с двойным (электрическим и магнитным) управлением в субтерагерцовом диапазоне частот. Рассмотрены основные преимущества применения сильно анизотропных ферромагнитных материалов для повышения электрической управляемости мультиферроидных структур и смещения рабочих частот в терагерцовую область спектра.*

**Ключевые слова:** мультиферроики, гибридные электромагнитно-спиновые волны, гексаферрит, сегнетоэлектрик

В последние годы мультиферроидные структуры (структуры, одновременно содержащие ферритовые и сегнетоэлектрические слои), обеспечивающие двойное электронное управление (электрическое и магнитное) их рабочими характеристиками, привлекают особое внимание в связи с возможностью создания на их основе многофункциональных компонент для микро- и наноэлектроники [1–5]. На основе таких компонент могут быть построены такие СВЧ приборы, как линии задержки, фазовращатели, СВЧ резонаторы и другие СВЧ приборы, имеющие перестраиваемую полосу частот в диапазоне от 1 до 200 ГГц. Электронная перестройка рабочих характеристик таких приборов осуществляется в широком диапазоне частот за счет изменения магнитного поля смещения, а в сравнительно узком диапазоне частот – за счет изменения электрического поля смещения. Следует отметить, что электрическая перестройка в данном случае характеризуется высокой скоростью и малым энергопотреблением, поскольку обеспечивается приложением электрического напряжения к сегнетоэлектрическому слою.

Применение в слоистых мультиферроидных структурах ферритовых слоев с высокой магнитной кристаллографической анизотропией (например гексаферритов бария и стронция, магнетоплюмбита и др.) позволяет сместить рабочую полосу частот в субтерагерцовую область спектра при относительно низких магнитных полях смещения [5,6]. Развитие технологии на данный момент уже позволяет получать высококачественные гетероструктуры гексаферрит-сегнетоэлектрик-металл со сравнительно низкими потерями на СВЧ [7,8]. Однако теории распространения волн в таких структурах до сих пор разработано не было.

В данном докладе будет рассмотрена схема решения задачи о нахождении собственных волн, распространяющихся в структуре металл-диэлектрик-сегнетоэлектрик-гексаферрит-диэлектрическая подложка, отмечены особенности решения такого рода задач. Будет представлена программа расчета спектра гибридных электромагнитно-спиновых волн в структурах с одним и двумя металлическими экранами, а также представлены результаты расчета дисперсионных и полевых зависимостей гексаферрит-диэлектрических резонаторов, а также дано сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Во второй части доклада на основе анализа физических процессов распространения гибридных электромагнитно-спиновых волн в слоистых феррит-диэлектрических структурах будут подробно рассмотрены преимущества и недостатки применения в мультиферроидных структурах ферритовых слоев с высокой магнитной кристаллографической анизотропией. К преимуществам в данном случае можно отнести следующие:

1. Увеличение рабочего диапазона частот вплоть до субтерагерцовой области спектра;
2. Увеличение эффективности управления дисперсионными характеристиками за счет применения более медленных волноводных мод мультиферроидной структуры;
3. Уменьшение габаритных размеров (как толщин слоев, так и продольных размеров) мультиферроидных структур по сравнению со случаями изотропных или слабо анизотропных ферритов (например, железо-иттриевого граната) при сохранении эффективности управления и разумного уровня СВЧ потерь на распространение;
4. Дополнительные возможности контроля и управления рабочими характеристиками приборов при наличии высокой магнитной кристаллографической анизотропии у ферритового слоя мультиферроидной структуры.

К недостаткам применения в слоистых мультиферроидных структурах феррит-сегнетоэлектрик слоев с высокой магнитной анизотропией свойств можно отнести, в частности, сравнительно высокие потери при распространении волн в слоях гексаферрита и сегнетоэлектрика на частотах субтерагерцового диапазона, а также сложности в технологии синтеза гетероструктур гексаферрит-сегнетоэлектрик-управляющие электроды с хорошо контролируемыми параметрами, среди которых толщина и диэлектрические проницаемости слоев, величина и направление одноосной магнитной кристаллографической анизотропии гексаферрита, малая толщина и однородность управляющих электродов.

Особое внимание в докладе будет уделено принципам частотной и фазовой перестройки на основе электродинамического эффекта. Будут приведены примеры магнитной перестройки гексаферрит-диэлектрических резонаторов и электрической перестройки фазового набега фазовращателя, построенного на основе мультиферроидной структуры гексаферрит-сегнетоэлектрик.

## Библиографический список

1. Nan C., Bichurin M.I., Dong S., et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103. P. 031101–35.
2. Fetisov Y.K., Srinivasan G. Electrically tunable ferrite-ferroelectric microwave delay lines // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. P. 103502.
3. Semenov A.A., Karmanenko S.F., Demidov V.E., et al. Ferrite-ferroelectric layered structures for electrically and magnetically tunable microwave resonators // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 88. P. 033503.
4. Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A.. High-Q active ring microwave resonators based on ferrite-ferroelectric layered structures // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 193512.
5. Grigoryeva N.Yu., Sultanov R.A., Kalinikos B. A. Dual-tunable hybrid wave hexaferriteferroelectric millimeter-wave phase shifter // *Electronics Letters.* 2011. V. 47(1). P. 35–36.
6. Popov M., Zavislyak I., Ustinov A., Srinivasan G. Sub-Terahertz Magnetic and Dielectric Excitations in Hexagonal Ferrites // *IEEE Trans. on Magnetics.* 2011. V. 47(2). P. 289-294.
7. Harris V.G., Chen Z., Chen Y., et al. Ba-hexaferrite films for next generation microwave devices (invited) // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. P. 08M911.
8. Das J., Kalinikos B.A., Barman A.R., Patton C.E. Multifunctional dual-tunable low loss ferrite-ferroelectric heterostructures for microwave devices // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 172516–1–3.