

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

Исследование двойной электронной управляемости дисперсионных характеристик электромагнитно-спиновых волн в сильно анизотропных слоистых мультиферроидных структурах

Представлены результаты численного моделирования электрической и магнитной перестройки фазы, частоты, времени задержки электромагнитно-спиновых волн в тонкопленочной слоистой мультиферроидной структуре вида металл - диэлектрический зазор - сегнетоэлектрик - гексаферрит - диэлектрическая подложка. На примере данной структуры показана потенциальная возможность использования мультиферроидных слоистых структур гексаферрит-сегнетоэлектрик в качестве основы для построения фазовращателей, резонаторов, линий задержки с двойным (электрическим и магнитным) управлением их рабочими характеристиками в субтерагерцовом диапазоне частот.

Ключевые слова: мультиферроники, гибридные электромагнитно-спиновые волны, гексаферрит, сегнетоэлектрик

В последние годы большое внимание уделяется исследованию мультиферроидных слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик, построенных на тонких анизотропных ферритовых пленках гексагональной структуры [1,2]. Взаимодействие электромагнитной волны в сегнетоэлектрическом слое со спиновой волной в близко расположенном ферритовом слое приводит к образованию гибридной электромагнитно-спиновой волны, дисперсионная характеристика которой зависит от прикладываемых к структуре электрического и магнитного полей. Электрическое управление дисперсионными характеристиками структуры осуществляется путем изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика, находящегося в парамагнитной фазе, за счет приложения к нему электрического поля. Магнитное управление реализуется за счет изменения магнитной проницаемости пленки гексаферрита при приложении к ней магнитного поля смещения. Возможность сочетания электрического и магнитного типов управления, а так же высокое поле магнитной кристаллографической анизотропии пленки гексаферрита дают уникальную возможность построения на основе мультиферроидных структур гексаферрит-сегнетоэлектрик широкополосных, быстродействующих, энергосберегающих СВЧ устройств субтерагерцового диапазона частот, с двойным электронным управлением их рабочими характеристиками.

Целью данной работы является теоретическое исследование электрической и магнитной управляемости дисперсионных характеристик электромагнитно-спиновых волн в слоистых тонкопленочных мультиферроидных структурах, обладающих сильной магнитной кристаллографической анизотропией. Анализ проводится на основе численного решения точного дисперсионного уравнения дипольно-обменных электромагнитно-спиновых волн, полученного в работе [3] и обобщенного на случай одноосной магнитной анизотропии слоя феррита. Геометрия и параметры рассмотренной слоистой

структуры показаны на рис. 1(а), где $c, a, L, b, d, \epsilon_c, \epsilon_a, \epsilon_L, \epsilon_b, \epsilon_d$ – толщины и диэлектрические проницаемости соответствующих слоёв, M_0, H^U – намагниченность насыщения и эффективное поле одноосной магнитной кристаллографической анизотропии слоя гексаферрита. Возможность практической реализации подобной слоистой мультиферроидной структуры с относительно низкими потерями на СВЧ была продемонстрирована, например, в работе [1]. Все расчёты проведены для основной моды электромагнитно-спиновых волн с использованием диагонального приближения, справедливость применения которого предварительно проверялась. Выбран наиболее распространённый случай, когда слоистая структура намагничена вдоль оси одноосной анизотропии, ориентированной перпендикулярно поверхности магнитной плёнки.

На рис. 1(б) представлен спектр дипольно-обменных электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ) в описанной мультиферроидной структуре. Из рисунка видно, что спектр имеет сложный характер за счёт гибридизации дисперсионной кривой основной моды дипольно-обменных спиновых волн (СВ) с большим числом электромагнитных мод. Пунктирными линиями на графике показаны дисперсионные кривые СВ, рассчитанные в магнитостатическом приближении, и чисто электромагнитный спектр волноводных мод рассматриваемой диэлектрической структуры, рассчитанный в пренебрежении магнитными свойствами слоя L . Из представленной зависимости следует, что спектр такой структуры смещён в субтерагерцовый диапазон частот при относительно небольшой напряженности внешнего магнитного поля смещения $H_0 = 15$ кЭ.

Анализ электронной управляемости дисперсионных характеристик проводится для крайней правой гибридной ветви спектра электромагнитно-спиновых волн, образовавшейся в результате взаимодействия основной моды спиновых волн и электромагнитной моды TE_1 .

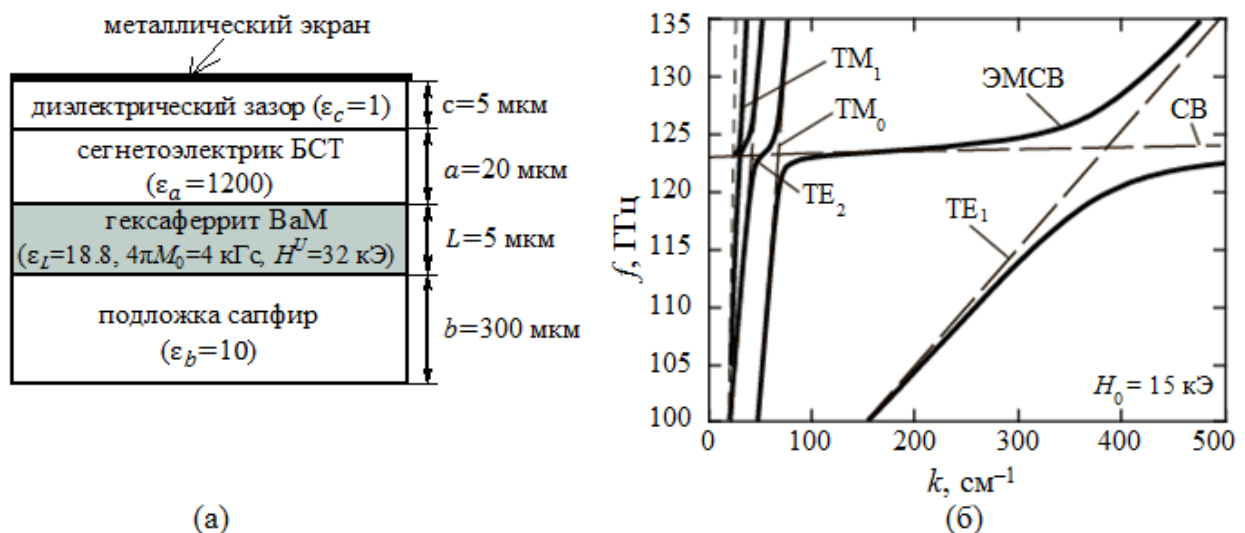


Рис. 1.

Рассчитанные зависимости электрической и магнитной перестройки фазы ($\Delta k = f(f)$), частоты ($\Delta f = f(k)$) и времени задержки ($\Delta \tau = f(f)$) электромагнитно-спиновых волн представлены на рис. 2(а)-(е). Время задержки на единицу длины

рассчитывалось по дисперсионной зависимости электромагнитно-спиновых волн как $(\tau(f) = (2\pi(df / dk))^{-1})$. Полученные зависимости, позволяют осуществлять количественную оценку эффектов электрической и магнитной перестройки дисперсионных характеристик электромагнитно-спиновых волн и наглядно демонстрируют возможность использования рассматриваемой мультиферроидной слоистой структуры в качестве основы для построения, таких СВЧ устройств как управляемые фазовращатели, резонаторы, линии задержки.

Из представленных зависимостей видно, что эффективно использовать одновременно электрическую и магнитную перестройку рассматриваемых параметров можно в диапазонах соответствующих наиболее сильному взаимодействию дисперсионных кривых спиновой и электромагнитной волны. В случае изменения фазы и времени задержки электромагнитно-спиновой волны в таких диапазонах наблюдаются наибольшие изменения названных параметров за счет электрической перестройки. Так для $H_0 = 15$ кЭ наибольшее изменение фазового набега (рис. 2(а)) и времени задержки (рис. 2(в)) электромагнитно-спиновой волны в результате изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика наблюдается в диапазоне частот 120÷124 ГГц. При этом изменения фазового набега на 360° можно достичь уже на дистанции 320 мкм (при $f = 122.35$ ГГц, $\Delta\epsilon_a = 300$). Эффективность электрической управляемости фазовым сдвигом при этом составит ~ 1.2 град/ед. ϵ_a . Наибольшее изменение времени задержки при $\Delta\epsilon_a = 300$ в пересчете на дистанцию 1 см составляет ~ 19 нсек ($f = 123.5$ ГГц) относительно начального значения ~ 60 нсек, то есть более чем на 30 % при эффективности перестройки ~ 70 псек/ед. ϵ_a . Изменение внешнего магнитного поля на 5 кЭ позволяет перестраивать область эффективной электрической перестройки фазы (рис. 2(б)) и времени задержки (рис. 2(г)) электромагнитно-спиновой волны по частоте на 15 ГГц, что почти в 4 раза превосходит диапазон эффективной электрической перестройки дисперсионных характеристик. Следует отметить, что полученное расчётное значение эффективности электрической управляемости фазовым сдвигом на несколько порядков выше, чем значения, полученные в работе [4] для микрополосковых сегнетоэлектрических фазовращателей. В то же время рассчитанные значения фазового набега превышают фазовый набег, полученный в работе [5] для слабоанизотропных слоистых структур ЖИГ-БСТ.

Эффективное двойное управление частотой электромагнитно-спиновой волны (рис.2(д),(е)), для описанной выше слоистой структуры, наблюдается в диапазоне 400÷500 см^{-1} . Так для $k = 450 \text{см}^{-1}$ электрическая перестройка частоты (рис.2(д)) возможна в полосе от 0.3 до 1.3 ГГц, а изменение внешнего магнитного поля на 5 кЭ, позволяет обеспечить перекрытие по частоте от 109 до 122 ГГц (рис.2(е)). При этом продольные размеры резонаторной структуры в случае квадратного сечения составят порядка 100×100 мкм². Типичные же рабочие значения волновых чисел для мультиферроидных структур на основе слабоанизотропных магнитных плёнок обычно не превышают 150см^{-1} , что соответствует продольным размерам порядка 300×300 мкм².

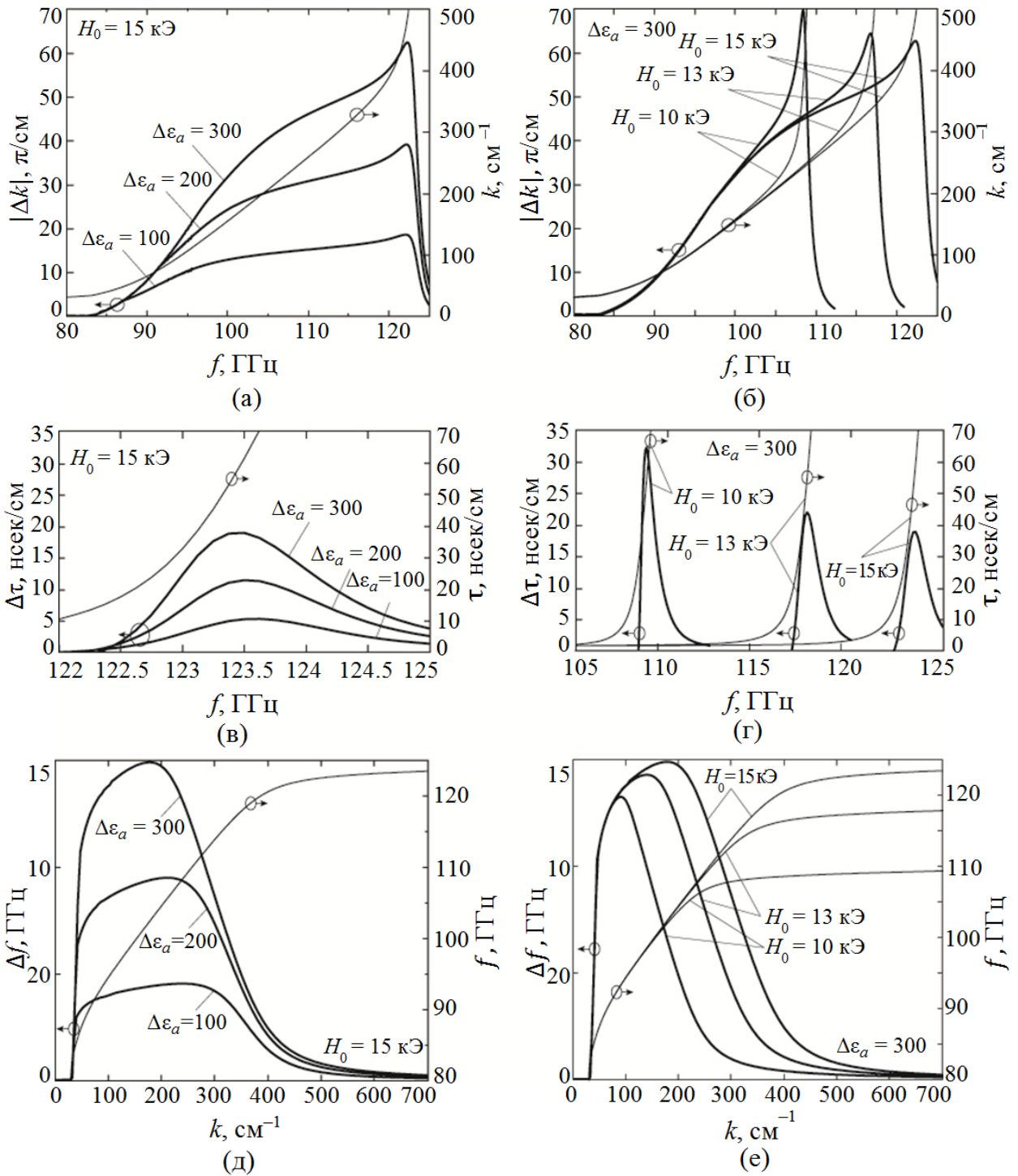


Рис. 2.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что использование мультиферроидных слоистых структур гексаферрит-сегнетоэлектрик в качестве волноведущих элементов при построении планарных СВЧ устройств с двойным электронным управлением их рабочими характеристиками позволяет уменьшить габаритные размеры, снизить величины управляющего электрического поля и повысить рабочие частоты до 100 ГГц и выше. Полученные результаты позволяют рассматривать мультиферроидные структуры на основе магнитных плёнок с сильной магнитной кристаллографической анизотропией в качестве перспективных волноведущих элементов при создании многофункциональной элементной базы субтерагерцового диапазона частот.

Библиографический список

1. Das J. Electric-field control of ferromagnetic resonance in monolithic $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}\text{-Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ heterostructures / J. Das, Y.-Y. Song, M. Wu // – Journal of applied physics. – 2010. – Vol. 108. – №4. – pp. 1 - 4.
2. Grigoryeva N. Yu. Dual-tunable hybrid wave hexaferrite–ferroelectric millimetre-wave phase shifter / N. Yu. Grigoryeva, R. A. Sultanov, B. A. Kalinikos // – Electronics Letters. – 2011. – Vol. 47. – №1. – pp. 35 - 36.
3. Григорьева Н.Ю. Влияние параметра закрепления поверхностных спинов ферритовой пленки на дисперсионные характеристики слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик / Н.Ю. Григорьева, Р.А. Султанов, Б.А. Калиникос // – ФТТ. – 2011. – Т.53. – Вып.5. – С. 971-979.
4. Miranda F.A. Design and development of ferroelectric tunable microwave components for Ku- and K-band satellite communication systems / F.A. Miranda, G. Subramanyam, F.W. van Keuls, R.R. Romanofsky, J.D. Warner, C.H. Mueller // – IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 2000. – Vol. 48. – №. 7. – pp. 1181 - 1189.
5. Demidov V.E. Electrically tunable microwave phase shifter based on layered ferrite-ferroelectric structure / V.E. Demidov, P. Edenhofer, B.A. Kalinikos // Electronics Letters.. – 2001. – Vol. 37. – №. 19. – pp. 1154 - 1156.