

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

© Р.А. Султанов, Н.Ю. Григорьева, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: natalygr69@gmail.com

(Поступило в Редакцию 13 марта 2014 г.)

Представлены результаты численного моделирования электрической и магнитной перестройки фазы, частоты и 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 слоистых мультиферроидных структур гексаферрит–сегнетоэлектрик в качестве основы для построения принципиально новых приборов генерации и обработки сверхвысокочастотных сигналов с двойным (электрическим и магнитным) управлением их рабочими характеристиками в субтерагерцовом диапазоне частот.

Введение

В последние годы большое внимание уделяется исследованию слоистых структур феррит-сегнетоэлектрик, построенных на основе тонких анизотропных ферритовых пленок гексагональной структуры [1–3]. Подобные структуры часто называют искусственными мультиферроиками. Как известно, применение феррит-сегнетоэлектрических слоистых структур в спин-волновых приборах обработки СВЧ-сигналов обеспечивает возможность двойного электронного управления (электрического и магнитного) их рабочими характеристиками [4–7], а применение в таких слоистых структурах ферритовых слоев с сильной магнитной кристаллографической анизотропией (например, гексаферритов) позволяет сместить рабочую полосу частот в субтерагерцовую область спектра при относительно низких магнитных полях смещения [2,3].

Напомним, что в основе двойной перестройки дисперсионных характеристик слоистых мультиферроидных структур лежит электродинамический эффект [8]. 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. Именно благодаря этому возможно эффективное двойное управление рабочими характеристиками спин-волновых приборов, изготовленных на основе таких слоистых структур. Электрическое управление в искусственных мультиферроидных структурах 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 также высокое поле магнитной кристаллографической анизотропии пленки гексаферрита дают уникальную возможность построения на основе мультиферроидных структур гексаферрит–сегнетоэлектрик широкополосных, быстродействующих, энергосберегающих устройств генерации и обработки сигналов субтерагерцового диапазона частот с двойным электронным управлением их рабочими характеристиками, например, таких как фазовращатели, линии задержки, резонаторы и др.

В настоящей работе представлено теоретическое исследование электрического и магнитного управлений дисперсионными характеристиками электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ) в слоистых тонкопленочных мультиферроидных структурах, обладающих сильной магнитной кристаллографической анизотропией. Анализ проводится на основе численного решения точного дисперсионного уравнения дипольно-обменных ЭМСВ, полученного в работе [9] и обобщенного на случай одноосной магнитной кристаллографической анизотропии ферритового слоя. Представлены результаты расчета фазовой и частотной электронной перестройки, а также изменения времени задержки дипольно-обменных ЭМСВ.

Модификация спектра при изменении управляющих полей

Геометрия исследуемой слоистой мультиферроидной структуры показана на рис. 1. Структура состоит из четырех слоев. Один из них — пленка гексаферрита ВаМ толщиной $L = 5 \mu\text{m}$ с намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 4 \text{ kG}$, диэлектрической проницаемостью $\epsilon_L = 18.8$, эффективным полем одноосной магнитной кристаллографической анизотропии

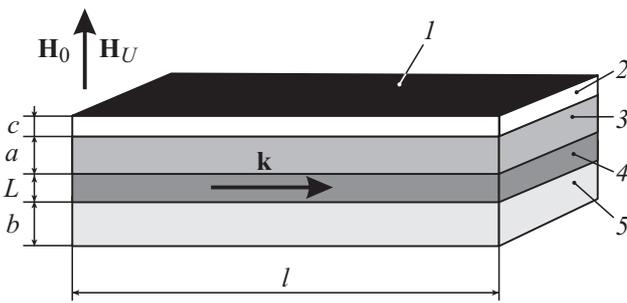


Рис. 1. Геометрия слоистой мультиферроидной структуры.

$H_U = 32 \text{ kOe}$, $\theta_U = 0^\circ$ и константой обменного взаимодействия $\alpha = 7.85 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^2$. Спины на обеих поверхностях пленки гексаферрита считаются свободными ($\eta \rightarrow 0$). Пленка выращена на сапфировой подложке 5 толщиной $b = 300 \mu\text{m}$ и $\epsilon_b = 10$. Поверх пленки гексаферрита выращен сегнетоэлектрический слой толщиной $a = 20 \mu\text{m}$ с начальной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_a = 1200$, типичной для пленок БСТ (титаната бария–стронция), находящихся в парафазе. От верхнего металлического экрана 1 пленка сегнетоэлектрика отделена диэлектрическим слоем 2 толщиной $c = 5 \mu\text{m}$ с $\epsilon_c = 1$. Слой под сапфировой подложкой является воздушным зазором с $\epsilon_d = 1$, толщина которого принята равной бесконечности. Все расчеты были проведены с использованием одномодового приближения, справедливость применения которого предварительно проверялась. Моделирование проведено для наиболее часто встречающегося на практике случая, когда слоистая структура намагничена вдоль оси одноосной анизотропии, ориентированной перпендикулярно поверхности магнитной пленки.

Следует отметить, что одним из практически реализуемых вариантов приложения управляющего электрического поля к пленке сегнетоэлектрика является создание разности потенциалов U между металлическими электродами, сформированными на ее верхней и нижней поверхностях. При этом толщина электрода между сегнетоэлектриком и гексаферритом подбирается такой, чтобы в рассматриваемом диапазоне частот он являлся прозрачным для СВЧ-поля ($< 100 \text{ nm}$), что позволяет не учитывать его наличие при описании волновых процессов в слоистой структуре. Такой способ приложения управляющего электрического поля обеспечивает наиболее однородное распределение напряженности электрического поля по всему объему слоя сегнетоэлектрика. Возможность практической реализации подобной слоистой мультиферроидной структуры с относительно низкими потерями на СВЧ была продемонстрирована в работе [10].

Рис. 2 демонстрируют модификацию спектра дипольно-обменных ЭМСВ при изменении значений управляющих электрического и магнитного полей для описан-

ной выше структуры. Спектр собственных волн такой структуры имеет сложный характер вследствие гибридизации дисперсионной кривой спиновых волн с большим числом мод электромагнитных волн. В рассматриваемом диапазоне величин прикладываемых внешних магнитных полей он смещен в субгерагерцовый диапазон частот. Штриховыми линиями на графиках показаны дисперсионные кривые спиновых волн, рассчитанные в магнито-статическом приближении, а также чисто электромагнитный спектр волноводных мод рассматриваемой диэлектрической структуры, полученный в пренебрежении магнитными свойствами слоя L .

Три части рис. 2, *a* соответствуют трем значениям ϵ_a : 1200, 900, 700. Это эквивалентно приложению к сегнетоэлектрическому слою напряжений соответственно около 0, 40 и 75 V (см., например, [11]). Отметим, что приведенные значения напряжений, создающих управляющее электрическое поле, существенно меньше значений, типичных для мультиферроидных структур на основе слабоанизотропных магнитных пленок, например, на основе ЖИГ [5].

В наибольшей степени изменение диэлектрической проницаемости пленки сегнетоэлектрика сказывается на дисперсионной ветви моды TE_1 . Как видно из приведенных спектров, уменьшение ϵ_a приводит к заметному ослаблению эффекта гибридизации дисперсионных кривых дипольно-обменной спиновой и электромагнитной волн TE_1 -типа со смещением соответствующей частотной щели в сторону меньших значений волновых чисел. Именно эта мода электромагнитных волн и соответствующие ей „быстрая“ и „медленная“ ветви дипольно-обменных ЭМСВ являются наиболее управляемыми. Однако для практического использования наибольший интерес представляет крайняя правая медленная гибридная ветвь, так как описываемые ею волны обладают низкой фазовой и групповой скоростью при относительно малых потерях на распространение.

Три части рис. 2, *b* соответствуют трем значениям внешнего магнитного поля смещения величинами в 10, 13 и 15 kOe. По мере увеличения напряженности постоянного магнитного поля дисперсионные кривые дипольно-обменных ЭМСВ смещаются в область более высоких частот, а структура спектра практически не изменяется. Это обусловлено тем, что данная область частот лежит выше частот отсечек мод электромагнитного спектра. В отличие от случая изменения управляющего электрического поля изменение магнитного поля смещения не приводит к заметному изменению степени гибридизации дисперсионных кривых дипольно-обменной спиновой и электромагнитных волн. С увеличением магнитного поля точка фазового синхронизма основной моды дипольно-обменных спиновых волн и электромагнитной моды TE_1 смещается в более коротковолновую область спектра, что сопровождается сравнительно слабым увеличением ширины частотной щели.

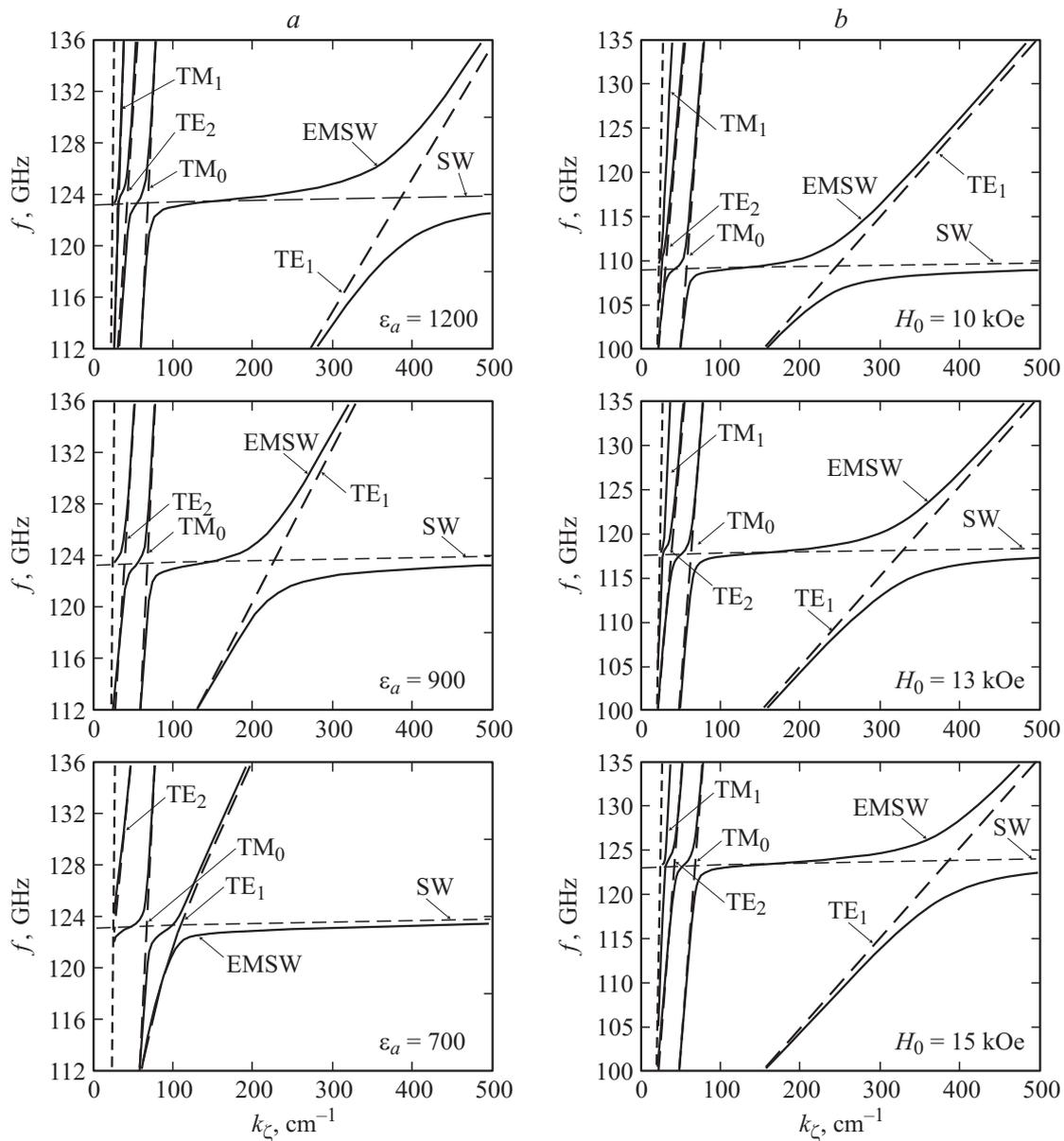


Рис. 2. Модификация спектра ЭМСВ при изменении: *a* — управляющего электрического и *b* — управляющего магнитного поля. Пунктирные линии — дисперсионные кривые чисто спиновых и чисто электромагнитных волн, сплошные линии — гибридный спектр.

Электрическая и магнитная управляемость дисперсионных характеристик

Анализ электронной управляемости дисперсионных характеристик гибридных дипольно-обменных ЭМСВ проводился для крайней правой медленной гибридной ветви спектра ЭМСВ, образовавшейся в результате взаимодействия основной моды спиновых волн и электромагнитной моды TE_1 (рис. 2).

На рис. 3 представлены зависимости электрической и магнитной перестройки фазы $\Delta k = f(f)$, частоты $\Delta f = f(k)$ и времени задержки $\Delta \tau = f(f)$ ЭМСВ при

различных значениях управляющих электрического и магнитного полей. В частности, зависимости $\Delta k = f(f)$ (рис. 3, *a, b*) показывают частотное изменение фазового набега дипольно-обменной ЭМСВ относительно начальных значений, взятых при $\epsilon_a = 1200$, для различных значений $\Delta \epsilon_a$ и при различных величинах внешнего магнитного поля H_0 . Из представленных зависимостей следует, что гибридные ЭМСВ, распространяющиеся в слоистой мультиферроидной структуре, приобретают значительный фазовый набег на сравнительно коротких дистанциях пробега. Так, например, фазовый набег волны на длине 1 см при $H_0 = 15$ kOe для частот 100–122.35 GHz составил $17.5\pi - 154\pi$.

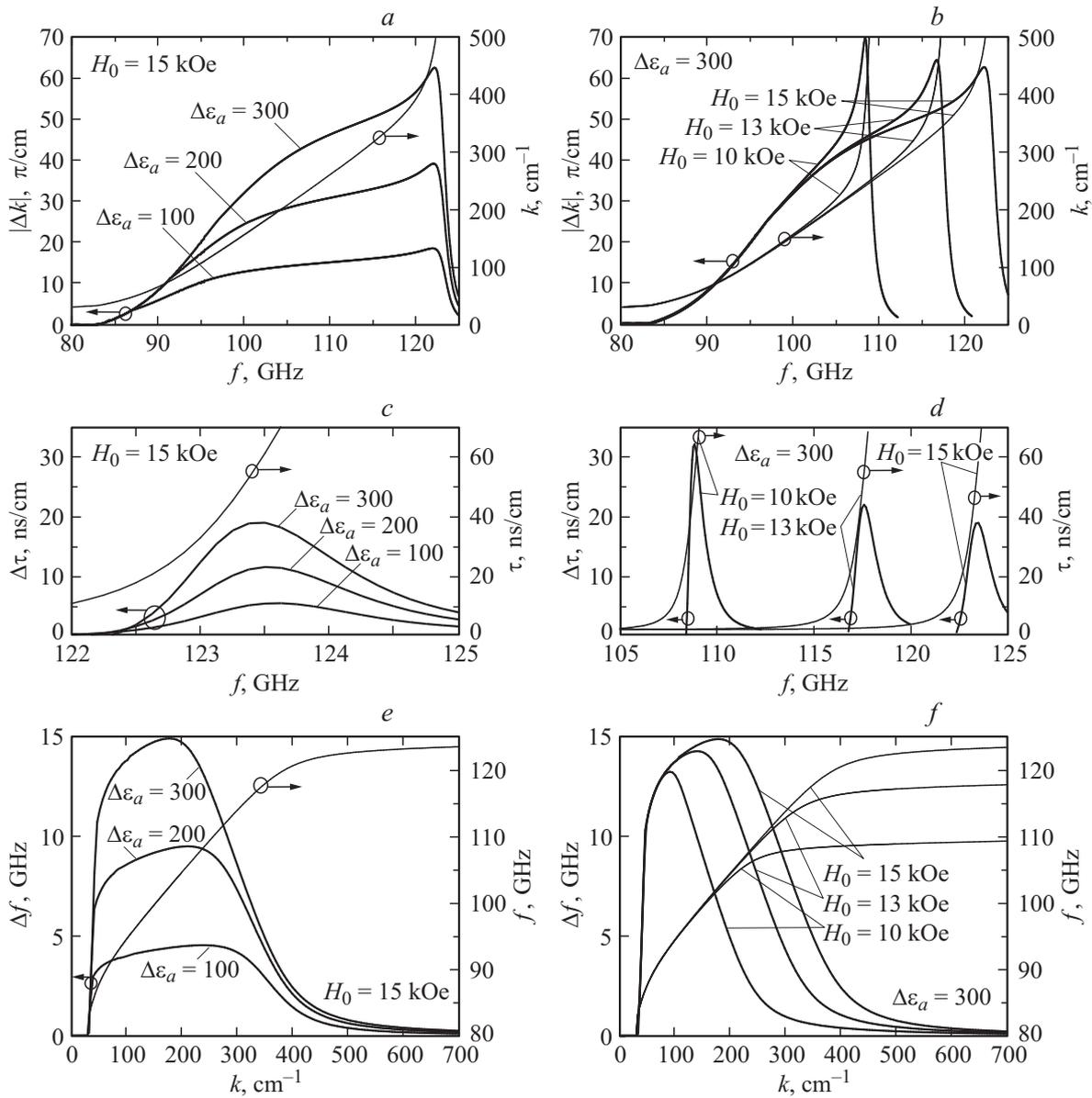


Рис. 3. Электрическая и магнитная перестройки: *a, b* — фазового набега, *c, d* — времени задержки и *e, f* — частоты ЭМЦВ при различных значениях управляющих магнитного и электрического полей; *a, c, e* — $H_0 = 15$ кОе; *b, d, f* — $U = 40$ В ($\Delta\epsilon_a = 300$). Тонкими линиями обозначены соответствующие дисперсионные зависимости рассматриваемой медленной ветви спектра.

Наибольшее изменение фазового набега и наиболее высокая эффективность электрической перестройки наблюдаются в диапазоне частот, соответствующих области сильного взаимодействия дисперсионных кривых основной моды дипольно-обменной спиновой волны и электромагнитной моды TE_1 (например, для $H_0 = 15$ кОе соответствующий диапазон равен 120–122.35 GHz). Отметим, что изменения фазового набега на 360° при $\Delta\epsilon_a = 300$ и $H_0 = 15$ кОе можно достичь уже на дистанции $320 \mu\text{m}$ (на частоте $f = 122.35$ GHz). При этом эффективность электрической управляемости фазовым сдвигом составит $\sim 1.2^\circ/\text{unit } \epsilon_a$. Полученное расчетное значение эффективности электрической управляемости на несколько

порядков выше, чем значения, представленные в работе [4] для микрополосковых сегнетоэлектрических фазовращателей. Кроме того, рассчитанные значения фазового набега превышают фазовый набег, полученный и для слоистых структур ЖИГ-БСТ в работе [5], в пересчете на 1 mm длины пробега волны.

Как следует из рис. 3, *b, c* с уменьшением внешнего магнитного поля происходит смещение области взаимодействия дисперсионных кривых основной моды дипольно-обменной спиновой волны и электромагнитной моды TE_1 в сторону низких частот. Таким образом, изменение внешнего магнитного поля на 5 кОе позволяет плавно перестраивать область электрической перестройки по частоте на 14 GHz. Диапазон магнитной

перестройки в этом случае почти в 6 раз превосходит диапазон эффективной электрической перестройки дисперсионных характеристик.

Расчетные зависимости электрической и магнитной перестройки времени задержки для описанной выше тонкопленочной слоистой мультиферроидной структуры приведены на рис. 3, *c, d*. Время задержки на единицу длины рассчитывалось по дисперсионной зависимости дипольно-обменных ЭМСВ как $\tau(f) = (2\pi(df/dk))^{-1}$. Из представленных зависимостей следует, что для рассматриваемой структуры максимальное время задержки составляет 70 ns/cm, что соответствует диапазону волновых чисел $\leq 700 \text{ cm}^{-1}$. Наибольшее изменение времени задержки при изменении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика и наиболее высокая эффективность электрической перестройки наблюдаются в диапазоне частот (123–124) GHz для $H_0 = 15 \text{ kOe}$. Так, на дистанции 1 см при $H_0 = 15 \text{ kOe}$ и $\Delta\epsilon_a = 300$ наибольшее изменение времени задержки составляет около 19 ps относительно начального значения примерно в 60 ps на частоте 123.5 GHz (т.е. более, чем на 30%), а эффективность перестройки составляет $\sim 70 \text{ ps/unit } \epsilon_a$. С уменьшением внешнего постоянного магнитного поля происходит смещение данной области взаимодействия в сторону низких частот. При этом изменение внешнего магнитного поля на 5 kOe позволяет обеспечить перекрытие по частоте от 108.9 до 123.5 GHz, что почти в 4 раза превосходит диапазон эффективной электрической перестройки дисперсионных характеристик.

На рис. 3, *e, f* представлены зависимости $\Delta f = f(k)$, показывающие изменение частоты гибридной ЭМСВ при изменении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика на $\Delta\epsilon_a$ и при фиксированном значении H_0 в зависимости от волнового числа. Из рис. 3, *e* следует, что при напряженности внешнего магнитного поля $H_0 = 15 \text{ kOe}$ рассматриваемая слоистая мультиферроидная структура позволяет обеспечить электрическую перестройку частоты до 15 GHz в диапазоне волновых чисел $(50\text{--}400) \text{ cm}^{-1}$. Отметим, что высокие значения электрической перестройки частоты свойственны работе на участках дисперсионных кривых дипольно-обменных ЭМСВ с более „электромагнитным“ характером поведения, которые характеризуются большими групповыми скоростями и плохо перестраиваются внешним магнитным полем. С другой стороны, в областях с более „спин-волновым“ характером поведения гибридной волны, т.е. для волновых чисел, больших 500 cm^{-1} , почти не наблюдается электрической частотной перестройки дисперсионных кривых, что характерно для чисто спиновых волн. Однако в этой области наблюдается высокая эффективность перестройки внешним магнитным полем. Рабочим участком для рассматриваемой структуры, позволяющим использовать как быстродействующую и энергетически менее затратную электрическую перестройку, так и широкополосную магнитную перестройку с сохранением преимуществ спиновых волн перед электромагнитными, является промежуточный участок

со значениями волновых чисел $400\text{--}500 \text{ cm}^{-1}$. Так, для $k = 450 \text{ cm}^{-1}$ электрическая перестройка частоты возможна в полосе от 0.3 до 1.3 GHz, а изменение внешнего магнитного поля на 5 kOe позволяет обеспечить перекрытие по частоте от 109 до 122 GHz (рис. 2, *f*). При этом продольные размеры резонаторной структуры в случае квадратного сечения составили бы около $100 \times 100 \mu\text{m}^2$. Типичные же рабочие значения волновых чисел для мультиферроидных структур на основе слабоанизотропных магнитных пленок обычно не превышают 150 cm^{-1} , что соответствует продольным размерам резонатора около $300 \times 300 \mu\text{m}^2$.

Заключение

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

Список литературы

- [1] *Das J., Song Y.-Y., Wu M.* // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 1–5.
- [2] *Popov M., Zavislyak I., Ustinov A., Srinivasan G.* // IEEE Trans. on Mag. 2011. Vol. 47. P. 289–294.
- [3] *Grigoryeva N.Yu., Sultanov R.A., Kalinikos B.A.* // El. Lett. 2011. Vol. 47. P. 35–36.
- [4] *Miranda F.A., Subramanyam G., van Keuls F.W., Romanofsky R.R., Warner J.D., Mueller C.H.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2000. Vol. 48. P. 1181–1187.
- [5] *Demidov V.E., Edenhofer P., Kalinikos B.A.* // El. Lett. 2001. Vol. 37. P. 1154–1156.
- [6] *Устинов А.Б., Колков П.И., Никитин А.А., Калиникос Б.А., Фетисов Ю.К., Srinivasan G.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 1. С. 75–79.
- [7] *Никитин А.А., Устинов А.Б., Семенов А.А., Калиникос Б.А.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 7. С. 98–101.
- [8] *Демидов В.Е., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 21. С. 86–94.
- [9] *Григорьева Н.Ю., Султанов Р.А., Калиникос Б.А.* // ФТТ. 2011. Т. 53. С. 971–979.
- [10] *Das J., Kalinikos B.A., Barman A.R., Patton C.E.* // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. P. 719–722.
- [11] *Ustinov A.B., Tiberkevich V.S., Srinivasan G., Slavin A.N., Semenov A.A., Karmanenko S.F., Kalinikos B.A., Ramer R.* // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. P. 093 905.