

01;05;09

## Теоретическое исследование резонансных свойств активного кольца на основе слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик

© А.А. Никитин, А.Б. Устинов, А.А. Семенов, Б.А. Калиникос

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

(Поступило в Редакцию 3 ноября 2011 г.)

Разработана теоретическая модель сверхвысокочастотного (СВЧ) активного кольцевого резонатора на основе феррит-сегнетоэлектрической (ФС) слоистой структуры, которая служила волноводом гибридных электромагнитно-спиновых волн. Резонатор представлял собой замкнутое кольцо, в которое были последовательно включены ФС-линия задержки, СВЧ-усилитель и переменный аттенюатор. Проведено теоретическое исследование резонансных свойств такой системы. Показана возможность эффективного управления резонансными частотами кольца за счет изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя.

### Введение

В последние годы наблюдается значительный интерес к изучению колебательных и волновых процессов в искусственных мультиферроидных материалах, в том числе в слоистых феррит-сегнетоэлектрических (ФС) структурах [1]. В таких структурах возможно распространение сверхвысокочастотных (СВЧ) гибридных электромагнитно-спиновых (ЭС) волн, которые формируются в результате гибридизации быстрых электромагнитных и медленных спиновых волн [2].

Отличительной особенностью ЭС-волн является возможность электронной перестройки их спектра как магнитным, так и электрическим полями. Магнитная перестройка осуществляется за счет изменения СВЧ-магнитной восприимчивости ферритового слоя при варьировании внешнего магнитного поля. Электрическая перестройка осуществляется за счет изменения диэлектрической проницаемости слоя сегнетоэлектрика под действием приложенного электрического поля.

Электронное управление спектральными характеристиками феррит-сегнетоэлектрических волноведущих структур позволяет разрабатывать новый класс СВЧ-приборов, одновременно реализующий двойную перестройку (электрическую и магнитную) их рабочих характеристик. Заметим, что одним из основных преимуществ ФС-приборов является сочетание сравнительно быстрой узкополосной электрической перестройки и сравнительно медленной широкополосной магнитной перестройки.

К настоящему времени разработана теория, описывающая спектр гибридных ЭС-волн в ФС-слоистых структурах, и подробно изучены их свойства [2–6]. Также достаточно подробно изучены свойства ЭС-колебаний в планарных ФС-резонаторах [7–11]. Вместе с тем гибридные ЭС-волны в активных кольцевых резонаторах на основе ФС-структур исследованы еще недостаточно. Насколько нам известно, имеется только одна работа на эту тему [12]. В этой работе была впервые эксперимен-

тально продемонстрирована возможность создания активных кольцевых СВЧ-резонаторов на основе ФС-слоистой структуры. Также было проведено измерение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) активного кольцевого резонатора и электрической перестройки его резонансных частот. Показано, что добротность резонатора может достигать значений порядка 50 000. Однако теоретического описания активного кольцевого резонатора на основе ФС-слоистой структуры до сих пор проведено не было. В настоящей работе предложена теоретическая модель активного кольцевого резонатора и проведено теоретическое исследование его характеристик.

### Теоретическая модель активного кольцевого резонатора

Теоретическая модель активного кольцевого резонатора была построена для случая схемы, которая обычно используется в экспериментах (см. рис. 1). Данная схема состоит из линии задержки на основе ФС-слоистой структуры, переменного аттенюатора и СВЧ-усилителя. Все элементы включены в цепь последовательно, образуя замкнутое кольцо. Линия задержки служит для того, чтобы задерживать циркулирующий в кольце

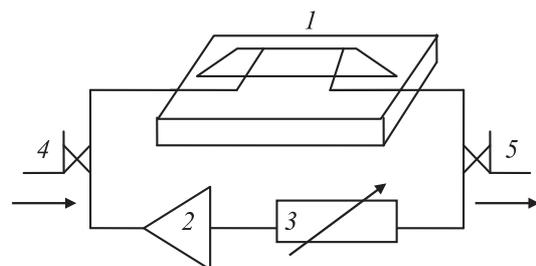


Рис. 1. Схема активного кольцевого резонатора; 1 — линия задержки; 2 — СВЧ-усилитель; 3 — аттенюатор; 4, 5 — входной и выходной направленные ответвители.

СВЧ-сигнал на определенное время, иными словами, вносить определенный фазовый сдвиг. Широкополосный СВЧ-усилитель с переменным аттенюатором обеспечивает регулируемое усиление СВЧ-сигнала в кольце. Такое усиление обычно называют коэффициентом усиления кольца и обозначают как  $G$ .

Рассмотрим кратко принцип работы активного кольцевого резонатора. СВЧ-сигнал, введенный в кольцо, циркулирует в нем. Его амплитуда резонансно возрастает на тех частотах, на которых полный набег фазы  $\Delta\varphi$  кратен  $2\pi$ . Если потери при распространении ЭС-волн в линии задержки превосходят усиление  $G$ , то активный кольцевой резонатор представляет собой многополосный СВЧ-фильтр. При этом ширина формируемых резонансных кривых (полос заграждения) определяется коэффициентом усиления  $G$  и может быть весьма мала. Если же усиление СВЧ-сигнала в кольце превосходит потери, то на резонансных частотах кольца начинается генерация СВЧ-сигнала.

Выберем (условно) точки ввода и вывода сигнала, циркулирующего в кольце. (На практике для ввода и вывода сигнала могут быть использованы направленные ответвители СВЧ сигнала.) Будем считать входной сигнал монохроматическим т. е.

$$A_{in} = A_0 \exp(i\omega t). \quad (1)$$

Выходной же сигнал будем считать результатом суперпозиции бесконечного числа затухающих циркулирующих в кольце волн (в нашем случае — электромагнитно-спиновых волн). Тогда выражение для амплитуды выходного сигнала можно записать в виде

$$A_{out} = \sum_{n=1}^{\infty} A_0 \exp(-i\mathbf{K}(\omega)nd) \exp(i\omega t), \quad (2)$$

где  $\mathbf{K}(\omega) = k(\omega) - i\alpha(\omega)$  — комплексное волновое число сигнала, циркулирующего в кольце,  $n$  — число циркуляций,  $d$  — длина кольца,  $k(\omega)$  — волновое число сигнала в кольце, а  $\alpha(\omega)$  — обобщенный декремент пространственного затухания сигнала в кольце. Комплексный коэффициент передачи кольца  $\mathbf{H}$  найдем как отношение комплексных амплитуд выходного и входного сигналов. Имеем

$$\mathbf{H} = \sum_{n=1}^{\infty} \exp[-i\mathbf{K}(\omega)nd]. \quad (3)$$

Как известно, комплексный коэффициент передачи любого СВЧ-устройства можно представить в виде

$$\mathbf{H}(\omega) = |H(\omega)| \exp[i\varphi(\omega)], \quad (4)$$

где  $|H(\omega)|$  — передаточная функция устройства по амплитуде, т. е. его АЧХ, а  $\varphi(\omega)$  — фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами, т. е. его фазочастотная характеристика (ФЧХ).

Применив к выражению (3) формулу Эйлера и выполнив суммирование, для модуля коэффициента передачи

активного кольцевого резонатора по мощности, получаем

$$H_p = \frac{1}{2} \frac{\exp(-\alpha(\omega)d)}{\operatorname{ch}(\alpha(\omega)d) - \cos(k(\omega)d)}. \quad (5)$$

Заметим, что  $H_p$  мы определили как  $H_p = |\mathbf{H}|^2$ . Эта величина часто используется в экспериментах. Формула для фазы коэффициента передачи активного кольца имеет вид

$$\phi = \arctg \left[ \frac{\sin(k(\omega)d)}{\cos(k(\omega)d) - \exp(-\alpha(\omega)d)} \right] \pm R\pi, \quad (6)$$

где  $R = 0, 1, 2, \dots$

Важно отметить, что полученные формулы могут быть использованы не только для расчета резонансных кривых и фазовых характеристик кольцевых резонаторов, построенных на волноводах ЭС-волн, но и для описания кольцевых резонаторов, использующих различные линии передачи волнового сигнала. В качестве примеров иных волноводов (линий передачи) можно привести обычные СВЧ-микроразветвители или щелевые линии, световоды, акустические волноводы и др. При этом для расчетов АЧХ и ФЧХ различных кольцевых резонаторов необходимо знать закон дисперсии  $k(\omega)$  конкретного волновода, на котором построен резонатор, а также и декремент затухания волны.

В настоящей работе для моделирования характеристик ФС-активного кольцевого резонатора в качестве  $k(\omega)$  использован закон дисперсии квазиповерхностных ЭС-волн [3]. Обобщенный декремент затухания  $\alpha$  вычисляли по формуле

$$\alpha(\omega) = (\alpha(\omega)_{ESW}d - g_0)/d, \quad (7)$$

где  $\alpha(\omega)_{ESW}$  — декремент пространственного затухания ЭС-волны, а  $g_0$  — коэффициент усиления кольца (безразмерная величина). Он связан с  $G$  (измеренным в децибеллах) выражением  $G = 20 \lg[\exp(g_0)]$ . Для вычисления  $\alpha(\omega)_{ESW}$  пользовались следующим приближенным выражением:

$$\alpha(\omega)_{ESW} \approx \frac{\partial k(\omega)}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial k(\omega)}{\partial \epsilon} \epsilon_a \operatorname{tg} \delta, \quad (8)$$

где  $\Delta H$  — полуширина кривой ферромагнитного резонанса (ФМР) ферритового слоя,  $\epsilon_a$  — диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрического слоя,  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрика.

## Результаты моделирования и их обсуждение

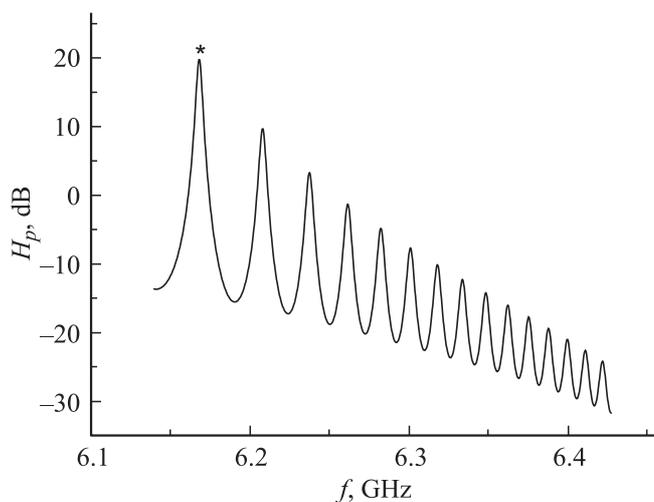
Учитывая, что в экспериментах с феррит-сегнетоэлектрическими СВЧ-устройствами в качестве магнетика обычно используют эпитаксиальные пленки железонитридевого граната (ЖИГ), а в качестве сегнетоэлектрика — керамические пластины титаната бария-стронция

(БСТ), то при проведении моделирования заданы параметры этих материалов. Так, для пленки ЖИГ брали намагниченность насыщения  $4\pi M_0 = 1750$  Gs и полуширину кривой ФМР  $\Delta H = 1$  Oe, а для пластины БСТ — диэлектрическую проницаемость в нулевом поле  $\epsilon_a = 1500$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta = 10^{-2}$ . Не внося значительной погрешности в результаты расчета, в качестве длины кольца  $d$  брали расстояние между микрополосковыми антеннами, которое соответствует длине пути, проходимого ЭС-волной в линии задержки, а фазовым набегом в электронных цепях кольца пренебрегали. В приведенном ниже расчете  $d = 5$  mm. Остальные параметры модели кольца были следующими: напряженность внешнего магнитного поля  $H = 1500$  Oe, толщина пластины БСТ  $a = 0.5$  mm, толщина подложки  $b = 0.5$  mm, ее диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_b = 14$ . Обозначения, описывающие геометрию ФС структуры, были взяты такими же, как и в работе [3].

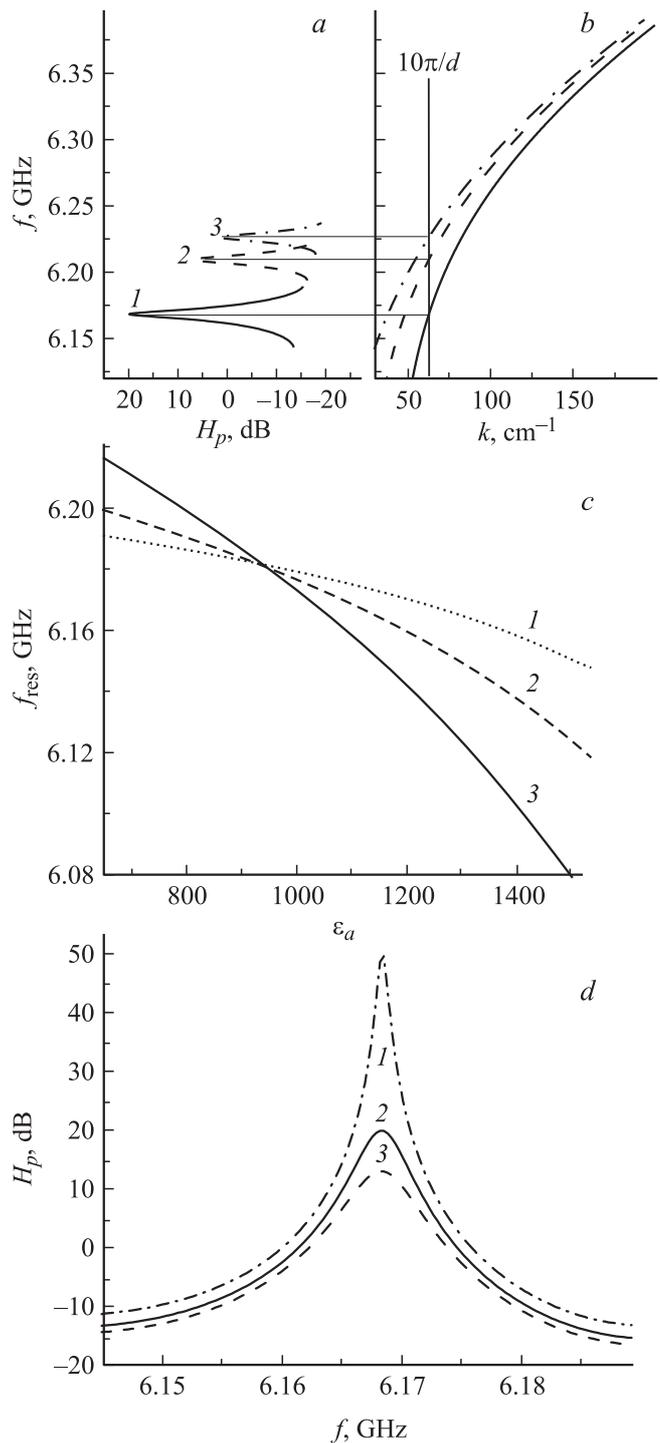
Теоретическое исследование проводилось при варьировании толщины пленки ЖИГ  $L$ , диэлектрической проницаемости БСТ  $\epsilon_a$  и коэффициента усиления  $G$ . Отметим, что на практике уменьшение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика реализуется путем приложения к нему электрического поля.

На рис. 2 показана резонансная характеристика активного кольцевого резонатора, иными словами — его АЧХ, рассчитанная по формуле (5) для  $L = 15 \mu\text{m}$ ,  $\epsilon_a = 1500$  и  $G = 1$  dB. Как видно, АЧХ имеет гребенчатую форму, т.е. представляет собой набор узких резонансных пиков (полос пропускания на резонансных частотах кольца). С ростом частоты коэффициент передачи кольца спадает и ширина резонансных кривых, измеренная по уровню 3 dB от максимума, увеличивается из-за возрастания потерь на распространение ЭС-волн. Потери же растут с частотой из-за уменьшения групповой скорости ЭС-волн.

Влияние изменения величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon_a$  на частотное положение отдельно взятого



**Рис. 2.** Резонансная характеристика активного кольцевого резонатора на основе слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик.



**Рис. 3.** Резонансные кривые (a) и дисперсионные характеристики (b) для разных значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon_a$ : 1 — 1500, 2 — 1000, 3 — 750; (c) зависимости резонансной частоты от  $\epsilon_a$  для разных значений толщины  $L$  пленки ЖИГ: 1 — 20, 2 — 10, 3 — 5  $\mu\text{m}$ ; (d) резонансные кривые для разных значений коэффициента усиления  $G$ : 1 — 0, 2 — 1, 3 — 4 dB.

резонансного пика, обозначенного на рис. 2 звездочкой, показано на рис. 3, a. Дальнейшие расчеты, приведенные в настоящей работе, были сделаны именно для этого

пика. Из рис. 3 видно, что уменьшение  $\epsilon_a$  в 2 раза ведет к сдвигу этого резонансного пика вверх по частоте примерно на 60 МГц. Такой сдвиг вызван смещением дисперсионной характеристики ЭС-волн в ФС-слоистой структуре, как показано на рис. 3, *b*.

На рис. 3, *c* показаны зависимости частоты резонансного пика от  $\epsilon_a$ , рассчитанные для нескольких значений толщин пленки ЖИГ  $L$ . Видно, что перестройка резонансной частоты возрастает с увеличением толщины пленки ЖИГ.

Рис. 3, *d* демонстрирует влияние величины коэффициента усиления  $G$  на добротность резонанса. Как ясно из простых физических соображений, увеличение  $G$  ведет к компенсации результирующих потерь СВЧ-сигнала в кольце, а следовательно, к сужению резонансного пика, т. е. к увеличению добротности. Численные оценки показывают возможность достижения добротности отдельно взятого резонансного колебания в несколько десятков тысяч.

## Заключение

В статье разработана теоретическая модель феррит-сегнетоэлектрического активного кольцевого резонатора. Получены выражения для расчета резонансных кривых и соответствующих им фазовых характеристик. Показано, что резонансная характеристика представляет собой набор резонансных пиков, ширина которых зависит от результирующих потерь СВЧ-сигнала, циркулирующего в кольце. Резонансные частоты для исследованной модели резонатора ЖИГ–БСТ изменялись на 60 МГц при уменьшении диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от 1500 до 750. В целом полученные теоретические данные находятся в качественном соответствии с имеющимися экспериментальными данными [12].

Настоящая работа проведена в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг. и АВЦП „Развитие потенциала высшей школы“ на 2009–2013 гг., а также проектов РФФИ и гранта президента РФ.

## Список литературы

- [1] Ozgur U., Alivov Y., Morkoc H. // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2009. Vol. 20. N 10. P. 911–952.
- [2] Демидов В.Е., Калинин Б.А. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 7. С. 8–17.
- [3] Demidov V.E., Kalinikos B.A., Edenhofer P. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. N 12. P. 10 007–10 016.
- [4] Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. N 3. P. 031 913/1-3.
- [5] Григорьева Н.Ю., Султанов Р.А., Калинин Б.А. // ФТТ. 2011. Т. 53. Вып. 5. С. 971–979.
- [6] Устинов А.Б., Колков П.И., Никитин А.А., Калинин Б.А., Фетисов Ю.К., Srinivasan G. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 6. С. 75–79.
- [7] Semenov A.A., Karmanenko S.F., Demidov V.E., Kalinikos B.A., Srinivasan G., Slavin A.N., Mantese J.V. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. N 3. P. 033 503/1-3.
- [8] Ustinov A.B., Tiberkevich V.S., Srinivasan G., Slavin A.N., Semenov A.A., Karmanenko S.F., Kalinikos B.A., Mantese J.V., Ramer R. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. N 9. P. 093 905/1-7.
- [9] Ustinov A.B., Kalinikos B.A., Tiberkevich V.S., Slavin A.N., Srinivasan G. // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103. N 6. P. 063 908/1-3.
- [10] Song Y.-Y., Das J., Krivosik P., Mo N., Patton C.E. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. N 18. P. 182 505/1-3.
- [11] Устинов А.Б., Srinivasan G. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 147–150.
- [12] Ustinov A.B., Srinivasan G., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. N 19. P. 193 512/1-3.