

Экспериментальное исследование микроволновых характеристик Y-циркуляторов на основе магнитных нанокompозитов из опаловых матриц

О.А. Голованов¹, Г.С. Макеева², М.И. Самойлович³,
А.Б. Ринкевич⁴, Д.Н. Ширшиков¹

¹ Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения
440005, Российская Федерация, г. Пенза-5
ФВАМТО

² Пензенский государственный университет
440026, Российская Федерация, г. Пенза
ул. Красная, 40

³ ОАО «ЦНИТИ «Техномаш»
121108, Российская Федерация, г. Москва
ул. И. Франко, 4

⁴ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН
620990, Российская Федерация, г. Екатеринбург
ул. С. Ковалевской, 18

Впервые исследована возможность эффективного применения магнитных нанокompозитов в невзаимных устройствах СВЧ. Проведены измерения S-параметров матрицы рассеяния: прямых потерь, развязки между плечами и коэффициента отражения Y-циркулятора для нескольких образцов нанокompозитов из опаловых матриц с магнитными наночастицами $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ в диапазоне частот 14–18 ГГц. Показано, что циркуляторы на основе магнитных нанокompозитов из опаловых матриц имеют лучшие микроволновые характеристики, а именно: более широкую полосу рабочих частот, меньшие вносимые прямые потери, большую развязку между плечами, чем ферритовые циркуляторы.

Ключевые слова: Y-циркулятор, магнитные нанокompозиты, опаловые матрицы, невзаимные устройства СВЧ.

В настоящее время одним из перспективных направлений создания наноструктурных материалов является технология получения магнитных нанокompозитов на основе опаловых матриц путем заполнения межсферических полостей матрицы магнитными наночастицами [1]. Магнитные свойства опаловых матриц, содержащих наночастицы ферритов типа шпинели или граната, могут существенно отличаться от свойств массивных образцов.

В ОАО ЦНИТИ «Техномаш» разработана технология приготовления высококачественных образцов магнитных нанокompозитов на основе опаловых матриц, состоящих из кубических упаковок наносфер двуокиси кремния SiO_2 , содержащих в межсферических полостях наночастицы ферритов. В [1] магнитные 3D-нанокompозиты получены введением в межсферическое пространство опаловых матриц (плотно упакованных периодических структур субмикронных сфер SiO_2 с диаметром от 200 до 280 нм) нано-

частиц ферритов-шпинелей или металлических частиц.

Эксперименты показали, что внешние магнитные поля могут значительно изменять характеристики этого класса наноматериалов [2–5]. В условиях магнитного резонанса на частотах миллиметровых волн были получены изменения до 60 % [1; 2]. Столь большие изменения, которые могут реализоваться в широком интервале частот, представляют несомненный интерес для использования в магнитоуправляемых электронных приборах и устройствах СВЧ.

Другое направление применения магнитных нанокompозитов – это разработка на их основе невзаимных устройств СВЧ. Так в настоящее время исследуются циркуляторы, вентили на основе нанокompозитов из ферромагнитных нанопроволок [6–9].

Магнитные нанокompозиты на основе опаловых матриц имеют небольшие магнитные потери [3], их диэлектрическая проницаемость в два-три

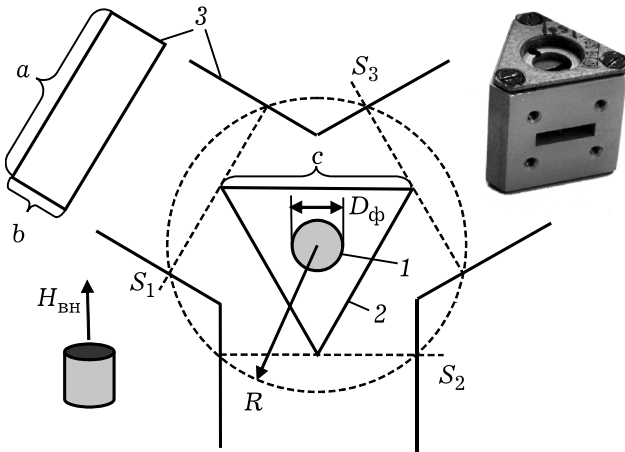


Рис. 1. Y-циркулятор: 1 – магнитный нанокомпозит; 2 – диэлектрическая вставка; 3 – прямоугольные волноводы; S_1 , S_2 , S_3 – входные сечения циркулятора; $a = 16,0$ мм, $b = 4,0$ мм, $c = 16,0$ мм, $R = 14,5$ мм

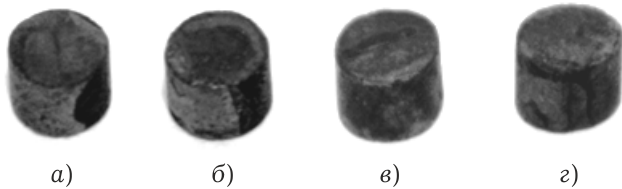


Рис. 2. Образцы магнитных нанокомпозитов (в форме цилиндрических вкладышей в Y-циркулятор): а) с магнитными наночастицами $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; б) с магнитными наночастицами $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; в) с магнитными наночастицами $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; г) с магнитными наночастицами $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

раза меньше, чем ферритов, которые используются в настоящее время в технике СВЧ. Это дает основание перспективности использования магнитных нанокомпозитов в создании невзаимных устройств СВЧ (циркуляторов, вентилях).

Однако на сегодняшний день имеется достаточно мало сведений о гиромангнитных свойствах (невзаимности) магнитных нанокомпозитов на основе опаловых матриц. Невзаимные устройства СВЧ на основе этих нанокомпозитов пока еще не реализованы.

Экспериментальные и теоретические исследования невзаимных устройств СВЧ на основе магнитных нанокомпозитов из опаловых матриц до настоящего времени не проводились, отсутствует и оценка их характеристик.

Целью данной работы является экспериментальное исследование волноводных циркуляторов на основе магнитных нанокомпозитов из опаловых матриц, измерение их микроволновых характеристик и их сравнение с характеристиками ферритовых циркуляторов СВЧ.

Проведены измерения S-параметров матрицы рассеяния Y-циркуляторов на основе нанокомпозитов из опаловых матриц с магнитными нано-

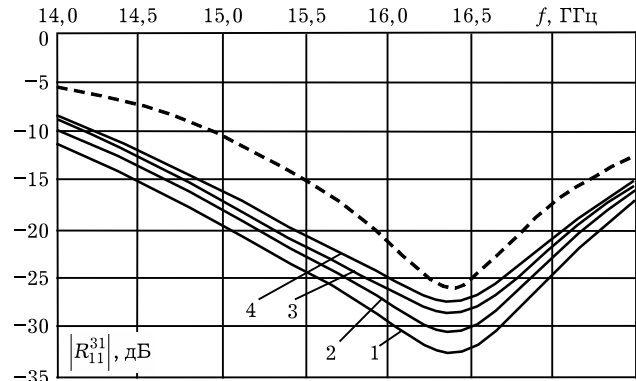


Рис. 3. Экспериментальные частотные зависимости развязки $|R_{11}^{31}|$ между плечами Y-циркулятора на основе магнитных нанокомпозитов из опаловых матриц (—): 1 – с магнитными наночастицами $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 2 – с магнитными наночастицами $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 3 – с магнитными наночастицами $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 4 – с магнитными наночастицами $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (---) – Y-циркулятор на основе магний-марганцевого MgMn феррита

частицами кобальт-цинкового $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита, никель-цинкового $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита в диапазоне частот 14–18 ГГц. Результаты измерений получены при помощи панорамного измерителя КСВН и затуханий P2-67.

В стандартном ферритовом Y-циркуляторе с размерами $a = 16,0$ мм, $b = 4,0$ мм, $c = 16,0$ мм, $R = 14,5$ мм (рис. 1) цилиндрический вкладыш из магний-марганцевого MgMn феррита заменялся на образцы магнитных нанокомпозитов из опаловых матриц.

Для экспериментального исследования Y-циркулятора были изготовлены образцы магнитных нанокомпозитов из опаловых матриц с наночастицами ферритов $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ в форме цилиндрических вкладышей в Y-циркулятор (рис. 2) с диаметром $D_\phi = 6,4$ мм и высотой $h = 3,4$ мм.

Экспериментальные зависимости S-параметра матрицы рассеяния $|R_{11}^{31}|$ – развязки между плечами (т. е. коэффициента прохождения волны H_{10} из плеча 1 в плечо 3 – обратных потерь) Y-циркулятора от частоты приведены на рис. 3 (сплошные кривые 1–4) для нескольких образцов магнитных нанокомпозитов из опаловых матриц: образец 1 – с магнитными наночастицами кобальт-цинкового феррита $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 2 – магнитными наночастицами кобальт-цинкового $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и никель-цинкового $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ферритов; 3, 4 – с магнитными наночастицами никель-цинкового $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита. Номер кривой на рис. 3 соответствует номеру образца.

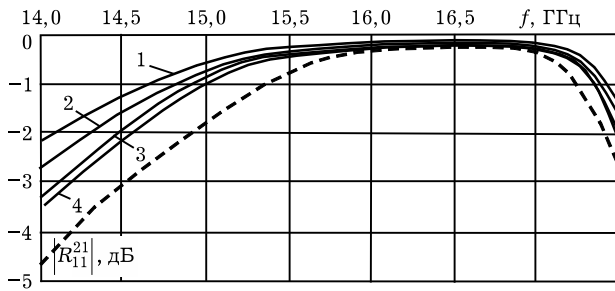


Рис. 4. Экспериментальные частотные зависимости прямых потерь $|R_{11}^{21}|$ Y-циркулятора на основе магнитных нанокompозитов из опаловых матриц (—): 1 — с магнитными наночастицами $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 2 — магнитными наночастицами $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 3 — с магнитными наночастицами $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 4 — с магнитными наночастицами $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (---) — Y-циркулятор на основе магний-марганцевого MgMn феррита

Для сравнения на рис. 3 (пунктирная линия) показана экспериментальная частотная зависимость развязки между плечами Y-циркулятора на основе магний-марганцевого MgMn феррита.

В эксперименте Y-циркулятор на основе магнитных нанокompозитов из опаловых матриц настраивался на рабочую частоту $f = 16,4$ ГГц при следующих значениях напряженности внешнего постоянного магнитного поля: образец 1 — $H_B = 1500$ Э, образец 2 — $H_B = 1590$ Э, образец 3 — $H_B = 1650$ Э, образец 4 — $H_B = 1640$ Э.

На рис. 4, 5 (сплошные кривые 1–4) приведены экспериментальные зависимости S-параметров матрицы рассеяния $|R_{11}^{21}|$ (прямых потерь, т. е. коэффициента прохождения волны H_{10} из плеча 1 в плечо 2) и $|R_{11}^{11}|$ (коэффициента отражения на входе) Y-циркулятора от частоты для нескольких образцов магнитных нанокompозитов из опаловых матриц. Для сравнения на рис. 4, 5 (пунктирные линии) показаны соответствующие экспериментальные зависимости для Y-циркулятора на основе магний-марганцевого MgMn феррита.

Из результатов измерений (рис. 3–5) следует, что Y-циркулятор на основе магнитных нанокompозитов из опаловых матриц имеет более широкую полосу рабочих частот, меньшие прямые потери, большую развязку между плечами, чем Y-циркулятор на основе магний-марганцевого феррита. Наилучшие характеристики Y-циркулятора (рис. 3–5) получены для образца (N1) композита из опаловых матриц с магнитными наночастицами кобальт-цинкового феррита $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

Режим работы циркуляторов на основе магнитных нанокompозитов из опаловых матриц дорезонансный. При этом в рабочей точке

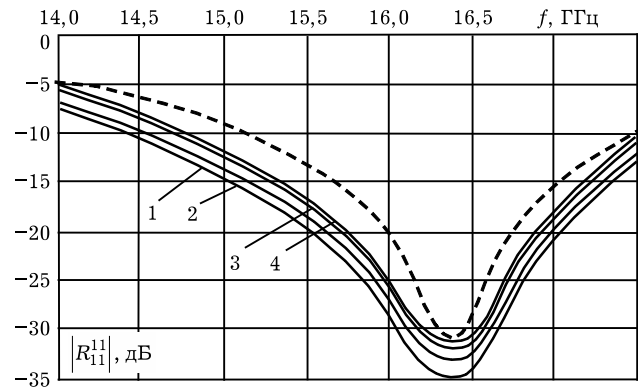


Рис. 5. Экспериментальные частотные зависимости коэффициента отражения $(|R_{11}^{11}|)$ на входе Y-циркулятора на основе магнитных нанокompозитов из опаловых матриц (—): 1 — с магнитными наночастицами $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 2 — с магнитными наночастицами $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 3 — с магнитными наночастицами $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 4 — с магнитными наночастицами $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; (---) — Y-циркулятор на основе магний-марганцевого MgMn феррита

Y-циркуляторов с магнитными нанокompозитами напряженность внешнего постоянного магнитного поля $H_B = 1500$ – 1650 Э, что на 800 – 900 Э больше, чем для ферритового Y-циркулятора.

Таким образом, впервые проведены экспериментальные исследования циркуляторов СВЧ на основе магнитных нанокompозитов из опаловых матриц и измерены их микроволновые характеристики. Получены экспериментальные зависимости прямых потерь, развязки между плечами и коэффициента отражения для Y-циркулятора на основе нанокompозитов из опаловых матриц с магнитными наночастицами кобальт-цинкового $\text{Co}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита, никель-цинкового $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита в диапазоне частот 14 – 18 ГГц.

Показано, что циркуляторы на основе магнитных нанокompозитов из опаловых матриц имеют лучшие микроволновые характеристики, а именно: более широкую полосу рабочих частот, меньшие вносимые прямые потери, большую развязку между плечами, чем ферритовые циркуляторы.

Достигнутые в эксперименте характеристики невзаимных устройств СВЧ (циркуляторов) на основе магнитных нанокompозитов из опаловых матриц имеют лучшие показатели:

- значительно большую развязку, что позволяет увеличить мощность передатчика РЛС, а следовательно, и максимальную дальность обнаружения цели;

- более широкую полосу рабочих частот, что позволяет уменьшить длительность высокочастотных импульсов;

стотного импульса, а следовательно, и разрешающую способность РЛС по дальности.

Таким образом, применение невзаимных устройств СВЧ (циркуляторов, вентиляей) на основе магнитных нанокмозитов позволит улучшить технические характеристики РЛС.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований грант № 12-02-97025-р_поволжье_а.

Список литературы

1. Нанокмозиты на основе опаловых матриц с 3D-структурой, образованной магнитными наночастицами / А.Б. Ринкевич [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 4. С. 55–63.
2. Микроволновые свойства 3D-нанокмозитных металлodielectricких наноматериалов / А.Б. Ринкевич [и др.] // Наука и технологии в промышленности. 2011. № 3. С. 52–61.
3. Частотная зависимость коэффициента поглощения миллиметровых волн в 3D-нанокмозитах на основе опаловых матриц / А.Б. Ринкевич [и др.] // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 1–5.
4. Anomalous magnetic antiresonance and resonance in ferrite nanoparticles embedded in opal matrix / V.V. Ustinov [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. V. 324. P. 78–82.
5. Magnetic antiresonance in metamaterial based on opal matrix with metallic cobalt nanoparticles embedded / A.B. Rinkevich [et al.] // Metamaterials. 2012. V. 6. № 1–2. P. 27–36.
6. Nonreciprocal microwave devices based on magnetic nanowires / B.K. Kuanr [et al.] // Applied Physics Letters. 2009. № 94. P. 202505.
7. Spiegel J., Huynen I. Microwave properties of ferromagnetic nanowires and applications to tunable devices // Solid State Phenomena. 2009. Vol. 152–153. P. 389–393.
8. An unbiased integrated microstrip circulator based on magnetic nanowired substrate / M. Darques [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. V. 53. № 6. P. 2043.
9. Design and simulation of self-biased circulators in the ultra high frequency band / J. Wang [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. № 324. P. 991–994.

Experimental investigation of microwave performances of Y-circulator based on magnetic opal nanocomposites

*O.A. Golovanov, G.S. Makeeva, M.I. Samoylovich,
A.B. Rinkevich, D.N. Shirshikov*

At first the possibility of effective application of magnetic opal nanocomposites in the nonreciprocal microwave devices was investigated experimentally. The scattering parameters of Y-circulator based on $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ and $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ magnetic opals were measured at frequencies from 14 GHz to 38 GHz. It is shown that the magnetic opal nanocomposite-based circulators have improved performances: bigger isolation, smaller insertion losses and a wider pass band as compared to MgMn ferrite-based circulator.

Keywords: Y-circulator, magnetic opal nanocomposites, opal, nonreciprocal microwave devices.