

Широкополосный циркулятор Ka-диапазона частот на основе LTCC керамики

В.В. Демшевский, И.А. Богачев, С.С. Сидоренко, А.Н. Пашков, Налогин А.Г., Лободин В.В.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: В статье представлены результаты разработки и расчетов характеристик печатного микрополоскового Y-циркулятора Ka-диапазона частот на основе подложки из LTCC-керамики и ферритовой вставки из никель-цинковой шпинели, обладающей высокой намагниченностью насыщения. Показана возможность достижения ширины рабочей полосы частот до 37% при уровне развязки между выходами в -20 дБ, сохраняя при этом высокий коэффициент передачи.

Ключевые слова: Ka-диапазон частот, микрополосковый Y-циркулятор, никель-цинковая шпинель, коэффициент передачи, развязка.

1. Введение

В настоящее время активно ведутся разработки радиоаппаратуры миллиметрового диапазона длин волн для систем различного назначения, что обусловлено уменьшением габаритов радиоаппаратуры, увеличение разрешающей способности систем при сохранении габаритов, возможность передачи большого количества данных и др.

Ферритовые развязывающие приборы (ФРП) являются неотъемлемой частью для многих приемо-передающих модулей многоканальных систем, обеспечивают работу генераторов на переменные нагрузки, устойчивость работы усилительных цепочек и т.д. Особенно явно видна потребность производителей радиоэлектронной аппаратуры к миниатюрным ферритовым развязывающим приборам в микрополосковом исполнении (МФРП).

Разработка МФРП в миллиметровом диапазоне длин волн – это трудоемкий и сложный процесс, который прежде всего требует решения ряда технических задач:

- выбор ферритового материала в качестве подложки и точное измерение его характеристик;
- моделирование и расчет конструкции ФРП;
- изготовление ФРП с использованием существующих технологий;
- настройка ФРП и измерение его характеристик.

В представленной статье рассмотрена разработка микрополоскового широкополосного циркулятора Ka-диапазона для изготовления на основе технологии литья LTCC-керамики с впрессованными ферритами.

2. Материал подложки ФРП

Основным элементом любого ФРП является ферритовый материал, за счёт которого удаётся достичь невзаимных свойств в заданном диапазоне частот.

Как правило, ФРП работают либо в «дорезонансном» либо в «зарезонансном» режимах вблизи естественного ферромагнитного резонанса (ФМР) ферритового материала, из которого они изготовлены. Положение ФМР определяется намагниченностью насыщения феррита $-4\pi M_s$, внутренним полем анизотропии — H_A (незначительно у всех ферритов, кроме ферритов с гексагональной структурой) и величиной внешнего магнитного поля (H_0). Так, для тонкой пластины, намагниченной

нормально к её плоскости, собственная частота прецессии будет вычисляться по формуле [6]:

$$\omega_{\text{пл}} = \gamma(H_0 + H_A - 4\pi M_s), \quad (1)$$

где: $\gamma = 2.8 \text{ raisebox}1\text{exMGц/raisebox} - 1\text{exЭ}$ – гиромагнитное отношение.

Из соотношения (1) видно, что если нам необходимо разработать ФРП в верхнем диапазоне частотном диапазоне относительно естественного ФМР материала, то необходимо либо увеличивать внешнее магнитное поле (H_0) за счёт увеличения габаритов магнитной системы, либо уменьшать величину намагниченности насыщения феррита.

Известно и то, что за счёт увеличения намагниченности насыщения удастся достичь большей широкополосности у приборов, поэтому при разработке ФРП миллиметрового диапазона длин волн необходимо выбирать ферритовые материалы с большим значение намагниченности насыщения ($4\pi M_s$) [8].

В качестве материала подложек для прибора 8 – мм диапазона длин волн был выбран феррит со структурой типа шпинель, разработанный в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

3. Разработка микрополоскового Y-циркулятора

Как известно, циркулятор – это невзаимное многополюсное, многоплечевое устройство, которое может пропускать электромагнитные волны в одних направлениях (например, со входа 1 на вход 2, со входа 2 на вход 3 и т.д.) и задерживать или вовсе не пропускать в других (например: со входа 3 на вход 2 или со входа 2 на вход 1 и т.д.).

Микрополосковый Y-циркулятор выполняют на основе простого Y-образного делителя мощности, выполненного на диэлектрической подложке, в центре которого в диэлектрическую подложку помещается так называемая ферритовая вставка. Поступающая на вход 1 ТЕМ волна разветвляется на две волны, огибающие ферритовую вставку с двух сторон. Области существования вращающегося вектора H для этих волн попадают в ферритовую вставку, при этом направления вращения вектора H относительно направления поля подмагничивания оказываются противоположными. Из-за различия магнитных проницаемостей феррита μ_+ и μ_- – волны, огибающие ферритовую вставку, имеют различные фазовые скорости. Размер ферритовой вставки и величина внешнего смещения магнитного поля влияют на то, что эти волны, например, на вход 2 придут в фазе, а на вход 3 – в противофазе. Таким образом передача ТЕМ волны осуществиться со входа 1 на вход 2.

Внешний вид модели разработанного циркулятора представлен на Рисунке 1. Циркулятор выполнен на диэлектрической пластине из LTCC керамики с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon=7$. Пластина имеет размеры 5.6x4.9 мм и толщину 0.25 мм. Основание пластины и проводящий рисунок выполнены из меди. В центре пластины впрессована круглая ферритовая вставка диаметром 1.8 мм из литий-цинковой шпинели ЛЦ-380, обладающей большой намагниченностью насыщения. Электромагнитные параметры ЛЦ-380 приведены в Таблице 1.

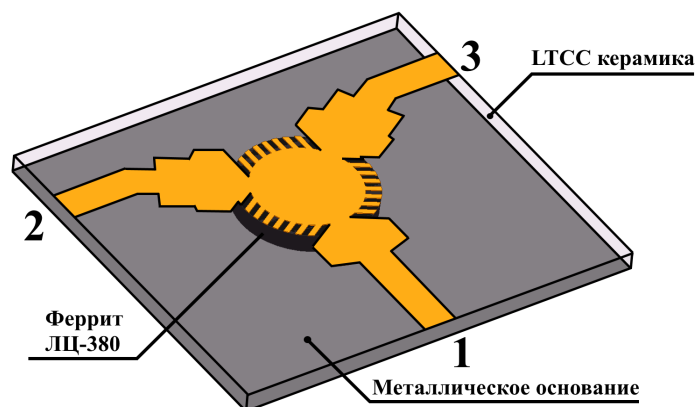


Рисунок 1. Внешний вид разработанного Y-циркулятора

Таблица 1. Электромагнитные параметры ЛЦ-380

Литий – цинковая шпинель (ЛЦ -380)		
Диэлектрическая проницаемость	ϵ	14,9÷15,9
Тангенс угла суммарных потерь	$\text{tg}(\delta)\Sigma$	$1 \cdot 10^{-3}$
Намагниченность насыщения	$4\pi M_s$	380 ± 27 кА/м
Плотность	ρ	4,73 г/см ³

На Рисунке 2 приведены результаты расчета S-параметров разработанного циркулятора. Из них видно, что циркулятор имеет развязку S23 по уровню -20 дБ в диапазоне частот 23.4 – 33.9 ГГц. При этом коэффициент передачи S21 в среднем равен -0.3 дБ. Таким образом ширина рабочей полосы частот циркулятора составляет 37.5 %. Результаты были получены при величине внешнего смещения магнитного поля 350 кА/м.

На Рис.3 приведено распределение напряженности электрического поля E в подложке при подаче сигнала на вход 1 разработанного Y-циркулятора. Из картины напряженности поля E видно, что основная часть энергии идет на вход 2.

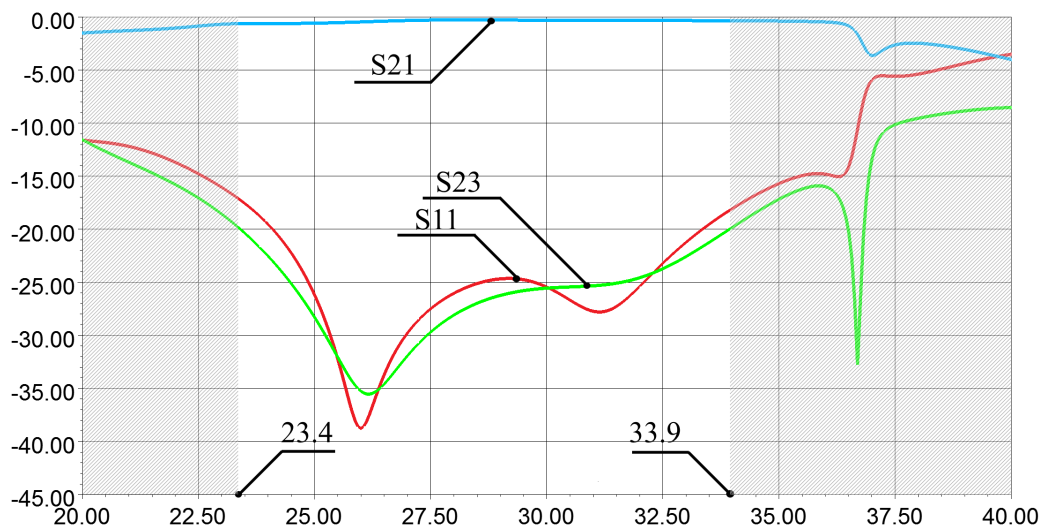


Рисунок 2. S-параметры разработанного Y-циркулятора

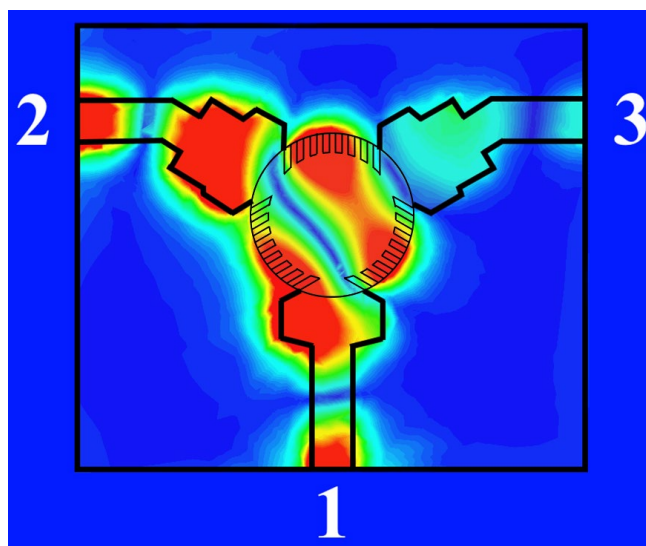


Рисунок 3. Распределение напряженности электрического поля E в подложке

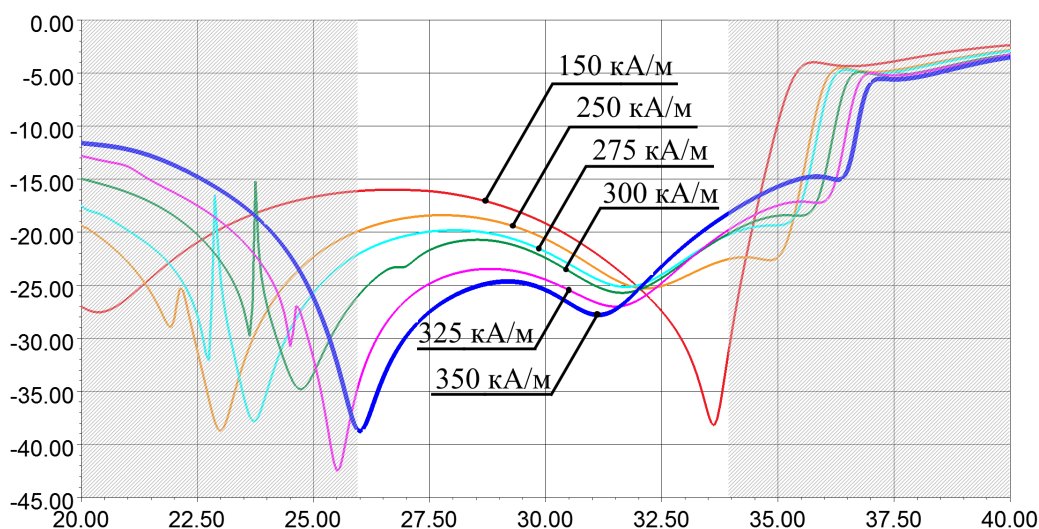


Рисунок 4. Зависимость развязки между выходами 2 и 3 Y-циркулятора от магнитного поля смещения

На Рисунке 4 приведены результаты расчетов изменения развязки между выходами 2 и 3 разработанного Y-циркулятора при изменении величины внешнего смещения магнитного поля. Из графиков видно, что при увеличении значения величины внешнего смещения магнитного поля улучшается развязка между выходами, а рабочая полоса циркулятора смещается вверх по частоте.

4. Выводы

Таким образом, в представленной статье была рассмотрена разработанная модель печатного микрополоскового Y-циркулятора Ка диапазона частот, выполненного на основе подложки из LTCC керамики с впрессованной в нее ферритовой вставкой из никель-цинковой шпинели ЛЦ-380, которая обладает большой намагниченностью насыщения. Использование ферритовых вставок из никель-цинковых шпинелей открывает большие перспективы для дальнейших разработок ФРП в миллиметровом

диапазоне длин волн. В таком исполнении разработка в России выполняется впервые. Ширина рабочей полосы частот циркулятора составляет 37.5 % по уровню развязки между выходами -20 дБ, а коэффициент передачи -0.3 дБ.

Список литературы

1. Bouchra Rahali, Mohammed Feham - Substrate Integrated Waveguide Power Divider, Circulator and Coupler in 10-15 GHz band. International Journal of Information Sciences and Techniques (IJIST) Vol.4, No ½, 2012;
2. Bouchra Rahali, Mohammed Feham - Design of V-Band Substrate Integrated Waveguide Power Divider, Circulator and Coupler. International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol.4, No.1, 2014;
3. Wenquan Che, Xiao Jing Ji, Edward K. N. Yung - Miniaturized Planar Ferrite Junction Circulator in the Form of Substrate-Integrated Waveguide. Wiley Periodicals, Inc. – 2007;
4. Junxia He, Kuandong Gao, Zhenhai Shao - A novel compact Ka-band high-rejection diplexer based on substrate integrated waveguide. International Conference Computational Problem-Solving (ICCP) 2012;
5. Semenov A.S., Nalogin A.G., A.A. Alekseev – Journal of Physics^ Conference Series. – 2020. – V.1499
6. Абрамов, В.П. Невзаимные устройства на ферритовых резонаторах/ В.П. Абрамов, В.А. Дмитриев, С.А. Шелухин// М: Радио и связь – 1989. – 200 с;
7. Пат. RU2809942C1;
8. Семенов А.С. Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы для СВЧ аппаратуры Ка-диапазона частот. / А.С. Семенов, А.Г.Налогин, А.А. Алексеев. // Научно-технический сборник «Электронная техника». - 2020. - Серия 1. – выпуск 2 (545).