

**Медведев Ю.О., Корытов В.А., Фадеев К.К.,
Черепанов А.С.**

АО «НИИ «Феррит-Домен»

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Разработка широкополосного ферритового циркулятора С и Х диапазона с шириной полосы 100%

Представлены численные и экспериментальные результаты разработки коаксиального ферритового циркулятора низкой мощности, полоса рабочих частот которого, полностью перекрывает С и Х СВЧ диапазоны(4-12ГГц). Параметры полученного прибора заметно лучше аналогов.

Ключевые слова: Ферритовый циркулятор, СВЧ, ферромагнитный резонанс, метод конечных элементов.

Ферритовые развязывающие приборы на протяжении многих десятков лет являются неотъемлемым элементом СВЧ радиоэлектроники. И даже не смотря на их очевидные недостатки и связанный с ними постепенный отказ от использования данного типа приборов, есть области радиотехники, в которых их применение и по сей день актуально.

Естественной целью при их разработке является увеличение рабочей полосы, коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) плечей, прямых и обратных потерь, которые влияют и в некоторых случаях являются ограничивающими для характеристик конечных радиотехнических систем.

В настоящее время разработано огромное количество типов ферритовых развязывающих приборов. Наибольшее распространение получили У-циркуляторы и вентили на их основе ввиду простоты их конструкции, технологичности. [1]

Первые работы, связанные с разработкой подобных приборов, имеющих полосу рабочих частот 100% были проведены еще в середине 80-х годов 20-го века в фирмах Aertech(на данный момент в собственности ST microwave) и НИИ «Домен». [2]

В настоящее время отечественными и зарубежными предприятиями разработан целый ряд циркуляторов с полосой частот 100%. Приведем электрические характеристики тех, которые работают в диапазоне 4-12 ГГц. [3][4]

Таблица 1.

	Модель	Прямые потери дБ, макс	Развязка дБ, мин	КСВ макс.
Феррит-Квазар	ЗССВ80-1	1.1	13	1.6
Ditom	D3C4012	1.0	14	1.5

Целью данной работы была разработка циркулятора с параметрами не хуже, чем у аналогов.

Разрабатываемое устройство представляет из себя классический дорезонансный полосковый ферритовый циркулятор, в котором развязывающие свойства обеспечиваются невзаимностью дифракции волны на поперечно подмагниченном феррите. Конструкция прибора включает в себя корпус, керамическое кольцо, ферритовое кольцо, ферритовый диск, металлический полосок сложной формы, магнитную систему, разъемы и

алюминиевые щитки. Назначение большей части элементов конструкции очевидно и не требует дополнительного пояснения. Керамический вкладыш служит для уменьшения габаритов прибора. Кроме того, его косвенной функцией является защита хрупкого внутреннего ферритового вкладыша от возможных деформаций.

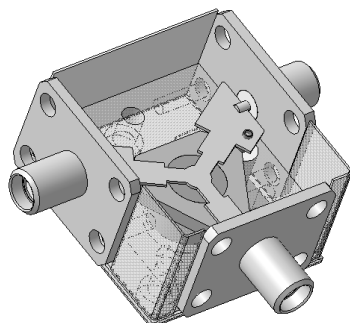


Рис. 1. Конструкция прибора

Развязывающие свойства в требуемой полосе рабочих частот достигаются благодаря использованию составных ферритовых вкладышей разных марок (кольцо и диск), причем внутренний диск должен обеспечивать требуемую циркуляцию в верхней части диапазона, а внешнее кольцо в нижней части. При этом важно добиться отсутствия увеличенных потерь в верхней части диапазона, связанных с ферромагнитным резонансом, а также потерь в нижней части диапазона, связанных, во-первых, с колебаниями стенок доменов, а во-вторых с резонансным поглощением за счет действия собственных внутренних магнитных полей. Однако предусмотреть эти факторы и выбрать марку ферритовых вкладышей единственным образом лишь на основании расчета оказалось сложно. Поэтому были выбраны несколько марок как внутреннего, так и внешнего ферритов по следующим формулам. [5]

$$\alpha_{pm} = 1 - 0.004566 * Z_0 \epsilon_r$$

$$A = 653 * h * \frac{\alpha_{pm}}{\lambda * m * Z_0}$$

$$p = \frac{0.95 * A}{\sqrt{A^2 + 1}}$$

$$M = \frac{p * f}{\gamma}$$

$$D = \frac{0.58 * \lambda}{\epsilon_{\phi} \sqrt{0.9 - p}}$$

где α_{pm} – коэффициент, учитывающий краевые поля в симметричной полосковой линии; Z_0 – волновое сопротивление подводящей линии; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего полосковую линию; h – высота линии; λ – средняя длина волны; m – коэффициент, приближенно учитывающий несимметричность линии ($m=2$ для симметричной линии); p – относительная намагниченность феррита; D – диаметр ферритового диска; ϵ_{ϕ} – относительная диэлектрическая проницаемость феррита.

При этом ввиду недостаточности системы некоторые параметры (например, высота вкладыша) задавались до расчета. Вычисления проводились для внутреннего и внешнего вкладышей и в итоге были выбраны марки ферритов (6СЧ1, 8СЧ5Б для внешних и 1СЧ2Г, 2СЧ11, 3СЧ21 для внутренних) с близкими к расчетным намагниченностям насыщения,

получены приблизительные значения высоты линии, радиусов ферритовых вкладышей. Дальнейшая задача заключалась в выборе геометрии металлического полоска и оптимизации полученной модели. Полученная в итоге модель анализировалась методом конечных элементов на компьютере и по его результатам была получена итоговая форма полоска наилучшим образом удовлетворяющая условиям технического задания. Важной задачей при выборе и оптимизации формы полоска является согласование всего устройства как внутри себя на разных участках проводящей линии с различным (воздушным, керамическим, ферритовым) заполнением, так и с внешними линиями передачи. В данном случае стояла задача согласования с SMA разъемом 50 Ом. Общие подходы к согласованию в дорезонансных ферритовых развязывающих приборах достаточно подробно описаны в литературе (ссылки). В данной работе применялось согласование с помощью ряда четвертьволновых трансформаторов, точные параметры которых были подобраны в ходе оптимизации.

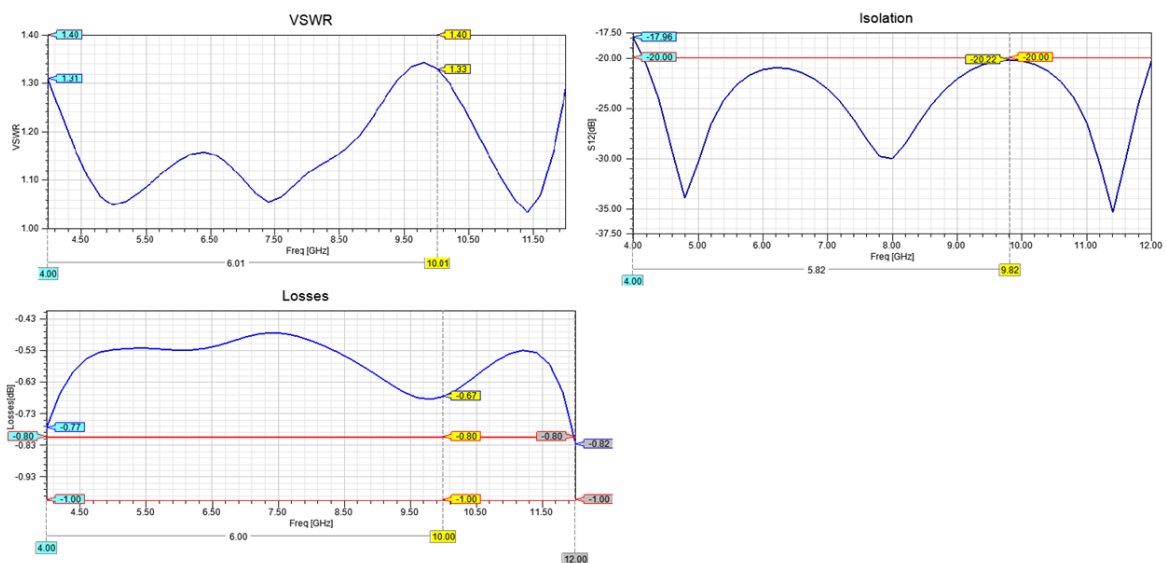


Рис. 2. Параметры компьютерной модели.

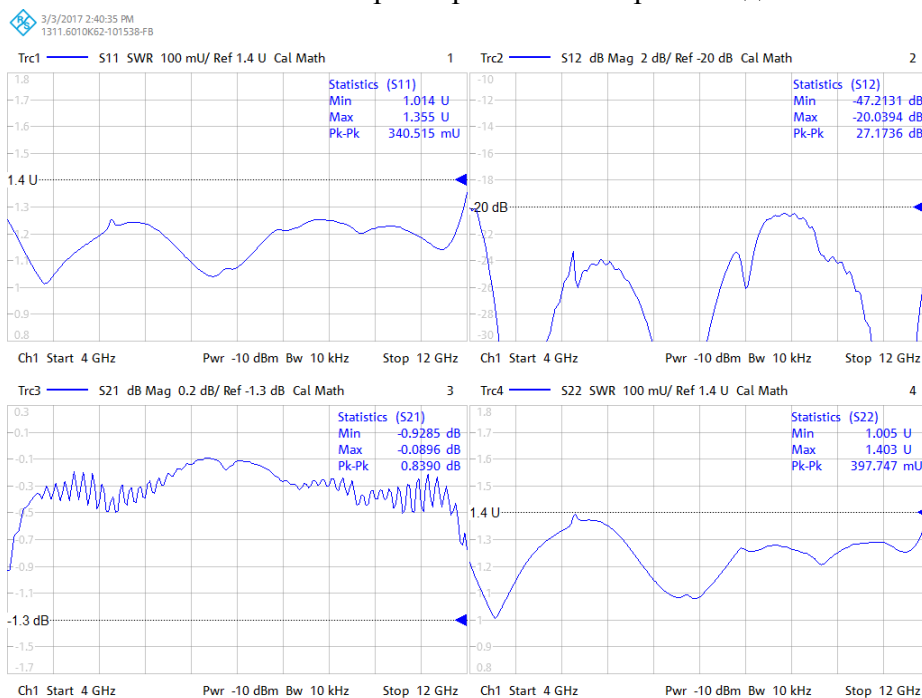


Рис. 3. Параметры макета.

При этом необходимо отметить, что в компьютерной модели хорошие результаты с запасом по параметрам были получены для всех комбинаций выбранных ферритовых вкладышей, однако удовлетворительные параметры реального макета были получены лишь для одной комбинации ферритов - 6СЧ1, 3СЧ21 (рис. 3).

Как видно из рисунка 3, прибор имеет следующие параметры: потери не хуже 0.93 дБ, развязки не хуже 20 дБ, КСВн плечей не хуже 1.4. При этом несмотря на удовлетворительные полученные результаты, их негативной особенностью является резкое увеличение потерь на низких частотах, что ограничивает теоретические возможности прибора в полной полосе требуемых рабочих частот. Стоит отметить также, что макеты с остальными комбинациями вкладышей давали еще более сильный завал на низких частотах и в дальнейшем не рассматривались.

Результатом этой работы стал прибор, параметры которого значительно лучше, чем у аналогов, и с запасом удовлетворяют изначальным требованиям. В используемом подходе основной упор делался на компьютерное моделирование электродинамики структуры разрабатываемого прибора, а упомянутые выше эмпирические формулы были использованы лишь для определения начальной модели и выбора групп ферритовых материалов, используемых в дальнейшем моделировании. Стоит отметить очень хорошее качественное соответствие параметров реального макета и компьютерной модели, что говорит о корректности используемого подхода. Однако при этом необходимо иметь в виду, что реальный макет подстраивался и представлены оптимально полученные параметры.

Библиографический список

1. Неганов В.А., Яровой Г.П. «Теория и применение устройств СВЧ Учебное пособие для вузов». — М.: Радио и связь, 2006. — 720 с.
2. Научно технический отчет по ОКР «Разработка ферритовых вентилях и циркуляторов со 100 процентной полосой рабочих частот», 1985. — Р.49.
3. Сайт компании Ditom Microwawe Inc. [Электронный ресурс] URL: https://www.ditom.com/new_products_circulators.php (дата обращения: 17.03 2017).
4. Сайт НПК «Феррит-Квазар» [Электронный ресурс] URL: <http://www.ferrite-quasar.ru/ru/products/ci/ci3e.html> (дата обращения: 17.03 2017).
5. Вамберский М.В., Абрамов В.П., Казанцев В.И. «Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ» М.: Радио и связь, 1982. — 136 с.: ил.
6. А.Л. Микаэлян «Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах». М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 664с.
7. Гуревич А.Г. «Ферриты на сверхвысоких частотах». М.: Физматгиз, 1960. — 480 с.
8. Vilas Vernon Risser Jr. «Design and construction of microstrip circulators», Ph.D. Dissertation, Iowa State University, 1969 - P. 79
9. Young Cheol Yoo, Ki Hwan Eom «A study on the design of coaxial isolator with filter circuit» // International Journal of Future Generation Communication and Networking 2011. — Vol. 4, N 3. P. 95-106.
10. Tong Nguyen, Dr Ray Kwork « Stripline circulator», Final project EE172 course report, San Jose State University, 2011. — P. 16.
11. Научно технический отчет по ОКР «Разработка ферритовых вентилях и циркуляторов со 100 процентной полосой рабочих частот», 1985. — Р.49.