

Новая архитектура ферритовых развязывающих приборов на основе двусторонней копланарной линии

К.К. Фадеев

АО «НИИ «Феррит-Домен»

Аннотация: в обзоре представлена новая архитектура ферритовых развязывающих устройств на сосредоточенных элементах метрового и дециметрового диапазонов длин волн. Разработан новый тип линии передачи для ферритовых циркуляторов и вентилях высокого уровня мощности – двусторонняя копланарная линия передачи. Приведены типовые электрические параметры и особенности новой конструкции.

Ключевые слова: ферритовый циркулятор, высокий уровень мощности, двусторонняя копланарная линия.

1. Введение

В стенах АО «НИИ «Феррит-Домен» за 67-летнюю историю института разработаны многочисленные марки ферритовых материалов, с внедрением которых стало возможным реализовать развязывающие приборы различных видов и областей применения. Традиционная классификация таких устройств основывается преимущественно на геометрии и типе проводящей линии [1]. В соответствии с этим критерием выделяются волноводные, полосковые (в том числе коаксиальные и drop-in исполнения) и микрополосковые, реализуемые на диэлектрических или ферритовых подложках.

Отдельно стоит выделить приборы на сосредоточенных элементах, конструктивное исполнение которых предполагает согласование ферритового резонатора с внешним трактом посредством индуктивных и емкостных СВЧ-компонентов [2].

Каждое из перечисленных исполнений ферритовых развязывающих устройств имеет свои преимущества и недостатки, определяющие возможность их интеграции в конечную аппаратуру. В условиях доминирующего тренда современной радиоэлектроники на миниатюризацию СВЧ-модулей и применяемой в их составе электронно-компонентной базы (ЭКБ) в целом массогабаритные характеристики классических ферритовых устройств перестают соответствовать сегодняшним требованиям. Существующие подходы к проектированию ферритовых узлов исчерпывают свой потенциал, поскольку габариты приборов остаются в жесткой зависимости от длины волны [1], что заставляет искать принципиально новые решения.

После введения санкционного режима и снижения доступности зарубежной ЭКБ со стороны разработчиков отечественной аппаратуры стали поступать нестандартные запросы. В частности, возникла необходимость в изготовлении циркуляторов метрового диапазона длин волн (от 30 до 120 МГц), способных функционировать при уровнях мощности от единиц до десятков кВт в различных режимах эксплуатации. Областью применения подобных устройств выступают мощные усилительные модули, предназначенные для накачки энергией пучков заряженных частиц в ускорительных системах [3]. В указанных диапазонах частот применяются в первую

очередь циркуляторы на сосредоточенных элементах, поскольку применение дискретных СВЧ-компонентов вместо распределенных отрезков линии передачи позволяет реализовать структуры с габаритами существенно меньше длины волны.

Несмотря на наличие в номенклатуре АО «НИИ «Феррит-Домен» некоторого количества типовых исполнений развязывающих приборов подобного функционала, прямое масштабирование классических прототипов привело к выходу геометрических размеров полученных макетов за рамки допустимых значений, и предлагать такие консервативные решения оказалось нецелесообразным как по причине неудовлетворительных массогабаритных параметров, так и вследствие их низкой технологичности и отсутствии требуемой ЭКБ.

2. Характеристики новой конструкции и экспериментальные результаты

Итогом многочисленных изысканий стало оригинальное техническое решение, основанное на использовании архитектуры ферритового развязывающего устройства на базе двусторонней копланарной линии передачи СВЧ-сигнала, схема проводящей линии которой представлено на рисунке 1.

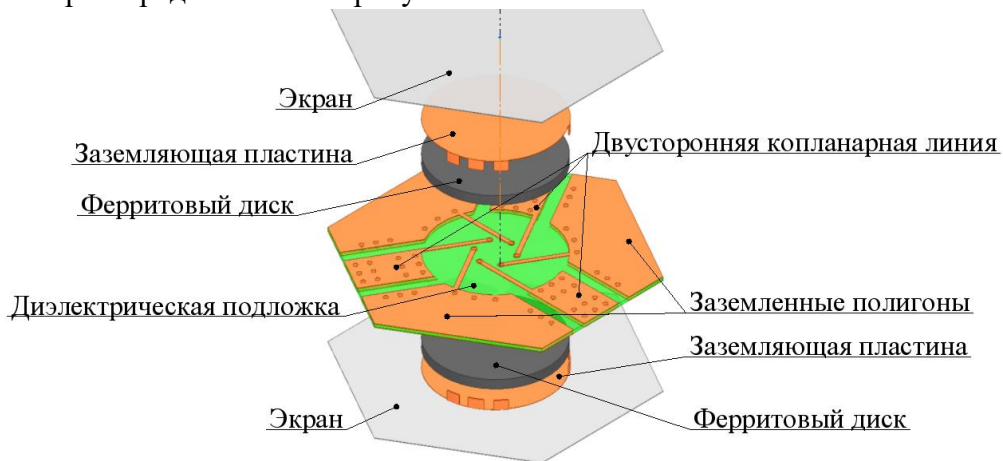


Рисунок 1. Схема проводящей линии циркулятора на сосредоточенных элементах на основе двусторонней копланарной линии

Ключевые конструктивные особенности нового решения заключаются в возможности реализации передающей линии на двусторонней печатной плате, а также в специфике распределения напряженности электрического поля. В отличие от традиционной копланарной линии, в разработанной структуре основная часть энергии поля сосредоточена вне диэлектрической подложки. Вышеперечисленное обеспечивает следующие преимущества:

- возможность гибкой регулировки волнового сопротивления;
- повышения уровня передаваемой мощности при одновременном снижении вносимых потерь;
- минимизация диэлектрических потерь в подложке;
- высокая плотность компоновки дискретных элементов за счет двустороннего монтажа.

Развернутый теоретический анализ геометрии и специфики интеграции двусторонней копланарной линии в ферритовые развязывающие приборы представлен в ранее опубликованной работе автора [4].

Прямое сопоставление новой разработки и классической конструкции предыдущего поколения, представленное на рисунке 2, наглядно демонстрирует качественное изменение технологического уровня. Если традиционное исполнение характеризуется громоздкой системой согласования, использованием морально

устаревших навесных конденсаторов, а также избыточными массой и габаритами, то предлагаемое решение отличается высокой компактностью, планарным исполнением на печатной плате и применением современных высоковольтных SMD-конденсаторов.

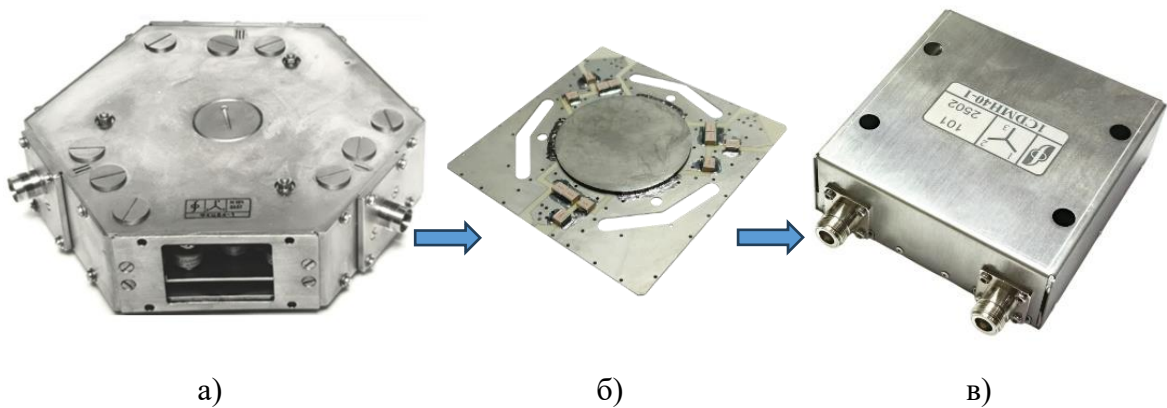


Рисунок 2. Сравнение технологического уровня приборов разного поколения: а) предыдущее поколение – габариты 248x339x73 мм, масса 9,5 кг; б) двусторонняя копланарная линия, выполненная на печатной плате; в) новое поколение – габариты 124x124x40 мм, масса 2 кг.

Особый интерес представляет анализ величины прямых потерь, уровень которых в новой конструкции оказался существенно ниже, чем у классических аналогов (до - 1 дБ). Минимизация потерь СВЧ-мощности в проводящей линии устройства позволяет снизить выделение тепла. Это, в свою очередь, обеспечивает как расширение динамического диапазона устройства по уровню предельной рабочей мощности, так и дополнительное сокращение его массогабаритных показателей за счет оптимизации элементов теплоотвода. Типовые электрические параметры серийных образцов разработанных изделий представлены на рисунке 3.

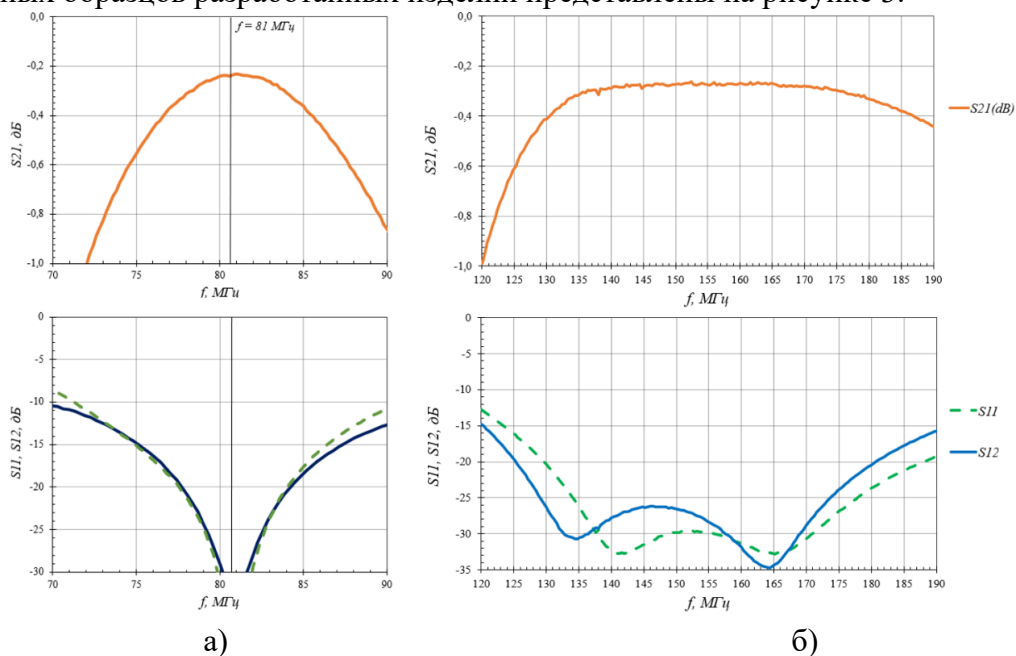


Рисунок 3. Типовые электрические параметры изделий: а) узкополосных, б) широкополосных.

3. Заключение

В результате проведенных исследований разработана базовая концепция нового поколения ферритовых развязывающих устройств. На основе предложенного подхода

создана линейка циркуляторов для метрового диапазона длин волн из 4 типоразмеров, представленных на рисунке 4:

- 124 × 124 мм – до 1500 Вт;
- 85 × 64 мм – до 250 Вт;
- 69 × 52 мм – до 160 Вт;
- 51 × 51 мм – до 50 Вт.

Типоразмер 124x124 мм



Узкополосные циркуляторы:
рабочие частоты от 30 до 120 МГц

$P_{\text{непр}}$ до 2 кВт

$P_{\text{имп}}$ до 16 кВт

Типоразмер 85x64 мм



Узкополосные и широкополосные
циркуляторы:
рабочие частоты от 80 до 200 МГц

$P_{\text{непр}}$ до 250 Вт

$P_{\text{имп}}$ до 2 кВт

Типоразмер 69x52 мм

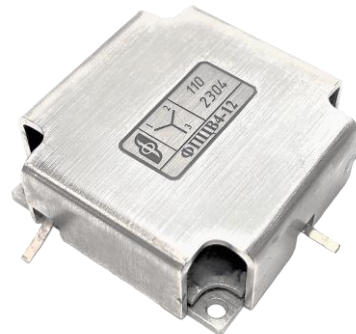


Широкополосный циркулятор с полосой рабочих
частот 225-400 МГц:

$P_{\text{непр}}$ до 160 Вт

$P_{\text{имп}}$ до 1,5 кВт

Типоразмер 51x51мм



Узкополосные и широкополосные
циркуляторы:
рабочие частоты от 80 до 200 МГц:

$P_{\text{непр}}$ до 50 Вт

$P_{\text{имп}}$ до 1 кВт

Рисунок 4. Разработанные типоразмеры.

Конструкция каждого типоразмера допускает исполнение как с коаксиальными, так и с полосковыми выводами. Стандартизации корпусов по типоразмеру позволила

достичь максимальной унификации сборочных единиц: печатная плата, ферритовые вкладыши и магнитная система остаются неизменными, а настройка под конкретные рабочие частоты осуществляется исключительно варьированием параметров согласующей цепи. В настоящий момент полученные результаты масштабируются на новый типоразмера 160×150 мм, предназначенный для работы на уровнях непрерывной мощности свыше 2 кВт.

Работоспособность и стойкость разработанных циркуляторов к воздействию высокого уровня мощности подтверждены успешными натурными испытаниями опытных образцов в предельно допустимых режимах эксплуатации. В непрерывном режиме испытания проводились при мощности до 2 кВт. В импульсном режиме подавался сигнал со следующими параметрами: длительность импульса 350 мкс, частота следования импульсов 20 Гц, пиковая мощность от 1 до 32 кВт.

Перспективным вектором дальнейшего развития ферритовых развязывающих приборов на основе двусторонней копланарной линии является создание особо мощных устройств метрового диапазона длин волн (с импульсной мощностью свыше 50 кВт), а также миниатюризация существующих и общепринятых конструкций приборов дециметрового диапазон длин волн.

Разработанные изделия уже нашли применение в составе аппаратуры следующих потребителей:

- НИЯУ «МИФИ», г. Москва;
- ООО «НПП «Триада-ТВ», г. Новосибирск;
- ООО «Фирма «НИТА», г. Санкт-Петербург (приборы для авиационного диапазона связи);
- АО «Марийский машиностроительный завод», г. Йошкар-Ола.

Успешный опыт эксплуатации подтверждает эффективность предложенных технических решений. Результаты применения изделий в аппаратуре НИЯУ «МИФИ» опубликованы в работе [5].

В итоге с уверенностью можно сказать, что разработанное решение на основе двусторонней копланарной линии – копланарные циркуляторы и вентили расширяет номенклатуру ферритовых развязывающих устройств, формируя самостоятельный класс изделий с принципиально новым вариантом реализации проводящей линии. Инновационность конструкции подтверждена патентом РФ, а ключевые результаты работы опубликованы в профильных научно-технических сборниках. Реализация работы позволила снизить зависимость от современных образцов импортной ЭКБ подобного типа при создании перспективных систем отечественной радиоэлектроники.

Список литературы

1. Вамберский М. В., Абрамов В. П., Казанцев В. И. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ – М.: Радио и связь, 1983.
2. Linkhart D.K. Microwave Circulator Design Second Edition – Artech House, 2014.
3. Шарков Б. Ю., Мешков И. Н. Развитие физики и технологии ускорителей заряженных частиц – М.: РАН, 2021.
4. Фадеев К.К., Савельев Е.И. Анализ возможности применения копланарных полосковых линий в ферритовых развязывающих устройствах высокого уровня мощности на сосредоточенных элементах // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, вып. №3(567), 2025. – С. 6-14.
5. Лозеева Т.А., Калмыкова Л.В., Александров В.А. и др. Исследование возможности реализации усилителей киловаттного уровня СВЧ диапазона на отечественной элементной базе // Двадцать девятая международная конференция «Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC'2025» Сборник тезисов международной конференции (Санкт-Петербург, 15-19 сентября 2025 г.). – СПб.: АО «НИИЭФА», 2025. – С. 176.