Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы с улучшенными характеристиками для СВЧ аппаратуры мм-диапазона

А.С. Семенов, А.Г. Налогин, А.А. Алексеев, А.В. Цыберт, А.Ю. Безруков, А.Д. Нагорнов АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в докладе рассмотрены конструктивные и технологические особенности, возникающие перед разработчиком при создании микрополосковых ферритовых устройств для СВЧ аппаратуры мм — диапазона длин волн. Приведены результаты разработок микрополосковых ферритовых циркулятора и вентиля миллиметрового диапазона длин волн, обладающих улучшенными характеристиками по сравнению с их отечественными и зарубежными аналогами.

Ключевые слова: мм – диапазон длин волн, Ка диапазон частот; микрополосковый ферритовый вентиль, ферритовый Y-циркулятор, электродинамическое моделирование, никель-цинковая шпинель.

1. Введение

Одной из важнейших задач современной СВЧ - электроники является разработка радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), работающей в миллиметровом диапазоне длин волн. Освоение миллиметрового диапазона позволяет решить актуальные задачи в области навигации, связи, медицины и обороноспособности страны.

Переход в миллиметровый диапазон длин волн позволит уменьшить габаритные размеры современной радиоаппаратуры, повысить разрешающую способность радионавигационных систем и увеличить плотность передачи данных, что особенно актуально для связи 5-го поколения (5G).

Важное место во всех радиосистемах занимают ферритовые развязывающие приборы, которые обеспечивают равномерность уровня СВЧ мощности генераторов, устойчивость работы усилительных цепочек на переменные нагрузки, позволяют распределять мощность СВЧ сигнала в цепях радиолокационных станций.

Несмотря на то, что на мировом рынке имеются микрополосковые ферритовые развязывающие приборы мм-диапазона длин волн, их электрические и массогабаритные характеристики не удовлетворяют современным требованиям разработчиков перспективной радиоэлектронной аппаратуры. Для создания РЭА нового поколения требуются МФРП с увеличенной рабочей полосой частот, с низкими прямыми потерями и с уменьшенными массогабаритными характеристиками.

В рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в НПП «Исток» требовалось разработать МФРП с улучшенными характеристиками. Требования к разрабатываемым приборам приведены в таблице 1.

Таблица 1. Требования к разрабатываемым приборам

Тип прибора	Диапазон рабочих частот ∆f, ГГц	КСВН	Прямые потери αпр, дБ	Развязка / обратные потери араз/аобр, дБ	Входная непрерывная мощность Рвх, Вт
Циркулятор Ка диапазона	36,538,5	< 1,4	< 0,8	> 20	0,1
Вентиль Ка диапазона	3337	< 1,4	< 1	> 20	2
Вентиль V-диапазона	45,848,9	< 1,4	< 0,9	> 18	0,1

2. Выбор ферритового материала

Ключевым элементом любого ферритового развязывающего прибора является ферритовый материал, за счёт которого удаётся достичь невзаимных свойств у прибора в заданном диапазоне частот. Существующие ферритовые материалы вносят свои особенности при разработке ферритовых приборов миллиметрового диапазона, определяя в них предельно достижимые параметры и характеристики.

На основе исследований проведенных в работах [1, 2, 6], в качестве подложки приборов был выбран ферритовый материал, разработанный в АО «НПП «Исток» им. Шокина» — никель-цинковая шпинель (НЦВ). Этот материал обладает большим значением намагниченности насыщения ($M_s \approx 380 \text{ кA/м}$), что позволит обеспечить широкую полосу рабочих частот у разрабатываемых приборов. Низкий уровень тангенса угла суммарных потерь НЦВ, в свою очередь позволит обеспечить малые потери в прямом направлении прохождения СВЧ сигнала через разрабатываемые приборы.

С помощью разработанных в НПП «Исток» измерительных методик и стендов [3], были измерены электромагнитные параметры заготовок из НЦВ для последующего расчёта конструкции разрабатываемых приборов мм-диапазона (таблица 2).

Наименование параметра	Обозначение	Значение по ТУ	Измеренное значение
Диэлектрическая проницаемость	ε	12,3÷13,7	13,0 ± 4 %
Тангенс угла суммарных потерь	$\operatorname{tg}(\delta)\Sigma$	1,6·10-3	$1,5\cdot 10^{-3} \pm 3,7\cdot 10^{-4}$
Намагниченность насыщения, кА/м	$4\pi \mathrm{Ms}$	378±27	$380\pm4~\%$

Таблица 2. Электромагнитные характеристики заготовок из НЦВ

3. Электродинамическое моделирование конструкции МФРП мм-диапазона.

На основе точно измеренных электромагнитных характеристик никель-цинковой шпинели, был произведен аналитический расчёт топологии разрабатываемых приборов по формулам из книги Вамберского М.В. «Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ» [4], затем требовалось создать электродинамические модели приборов для анализа их S-параметров и последующей оптимизации их конструкции.

При построении электродинамических моделей микрополосковых ферритовых развязывающих приборов методом конечных элементов используются следующие граничные условия:

1. Рисунок топологии и обратная сторона ферритовой платы считаются идеальными проводниками (за исключением танталовой нагрузки у вентилей), что

исключает из расчёта потери на излучение в свободное пространство.

- 2. Внешнее магнитное поле считается однородным и прикладывается только к области под диском циркуляции приборов.
- 3. Приборы возбуждаются сосредоточенными портами с сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом.
- 4. Ферритовая плата задается в виде двух материалов намагниченного феррита (область циркуляции) и ненамагниченного феррита (остальная часть платы). В намагниченном феррите задается величина намагниченности насыщения материала, а в ненамагниченном феррите нет.

По предложенному Семеновым А.С. алгоритму проектирования [5], созданы и оптимизированы электродинамические модели МФРП мм-диапазона. Оптимизация моделей приборов проводилась путем варьирования радиуса диска циркуляции, ширины подводящих МПЛ и сопротивления нагрузки у ферритовых вентилей. Оптимизированные модели МФРП мм-диапазона длин волн и их S-параметры представлены на рисунках $1\div 3$.

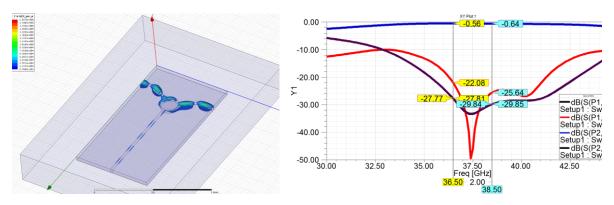


Рисунок 1. Распределение электрического поля и S-параметры модели *Y*-циркулятора *Ка*-диапазона частот.

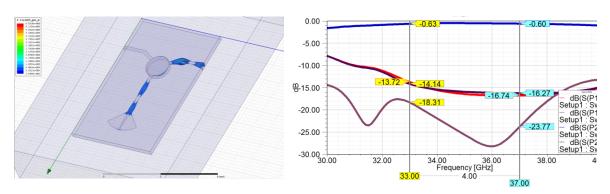


Рисунок 2. Распределение электрического поля и S-параметры модели вентиля *Ка*-диапазона частот.

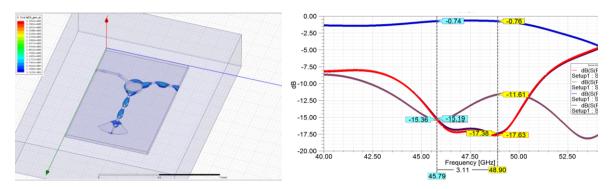


Рисунок 3. Распределение электрического поля и S-параметры модели вентиля *V*-диапазона частот.

Таким образом, с помощью электродинамического моделирования и последующей оптимизации, удалось разработать конструкции микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона, удовлетворяющие заданным требованиям.

4. Изготовление МФРП мм-диапазона и измерение их электрических параметров

Проведённые расчёты и моделирование показали, что конструкция разработанных вентилей и Y-циркулятора должна состоять из платы из НЦВ, толщиной 0,25 мм и 0,2 мм для приборов Ка- и V-диапазонов частот соответственно, и магнитной системы, обеспечивающей необходимое внешнее поле подмагничивания (не менее 0,53 Тл).

Поэтому, для получения необходимой величины поля подмагничивания приборов, в их конструкцию было добавлено основание из магнитомягкого материала - технического железа ГОСТ 19904-90 (рисунок 4).

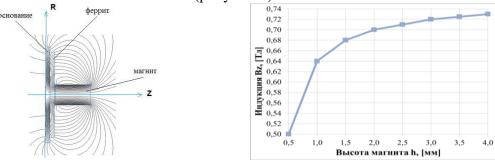


Рисунок 4. Распределение силовых линий в Y-циркуляторе Ка-диапазона с магнитной системой, состоящей из магнита и основания из магнитомягкого материала и зависимость поля подмагничивания от высоты магнита, диаметром 1,2 мм.

По разработанной в АО НПП «Исток» технологии были изготовлены МФРП мм-диапазона длин волн и проведено измерение их электрических характеристик.

На рисунках 6-8 представлены опытные образцы и электрические характеристики Y-циркулятора и вентилей миллиметрового диапазона длин волн.



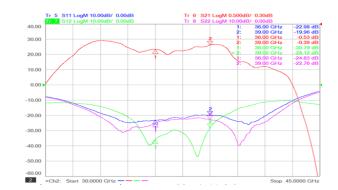


Рисунок 6. Макет У-циркулятора Ка-диапазона частот и его электрические характеристики.



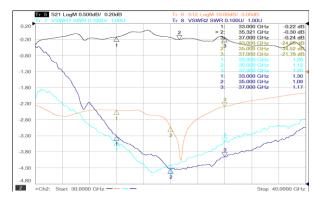
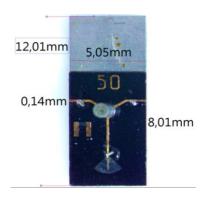


Рисунок 7. Макет ферритового вентиля Ка-диапазона частот и его электрические характеристики.



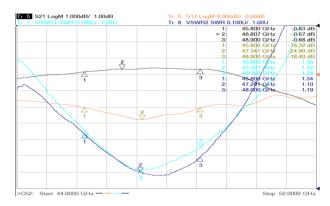


Рисунок 8. Макет ферритового вентиля V-диапазона частот и его электрические характеристики.

Как видно из рисунков 6-8, разработанные ферритовые приборы миллиметрового диапазона имеют электрические характеристики, близкие к полученным в ходе моделирования, что позволило существенно сократить время на доработку их конструкции.

5. Заключение

В ходе проведенной работы были разработаны и изготовлены вентиль и Уциркулятор Ка-диапазона частот, а также макет вентиля V-диапазона частот. Электрические параметры разработанных МФРП приведены в таблице 3.

Таблица 3. Электрических параметры ФРП миллиметрового диапазона длин волн.

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Ү-циркулятор Ка-диапазона	Вентиль Ка-диапазона	Вентиль V-диапазона
Диапазон рабочих частот, ГГц	$\Delta \mathrm{f}$	3639	3337	45,848,9
Прямые потери, дБ	α_{np}	не более 0,7	не более 0,8	Не более 0,9
Развязка (обратные потери), дБ	$\alpha_{(pa3/o6p)}$	не менее 22	не менее 20	Не менее 18
КСВНвх, вых.	$K_{c_T} U$	не более 1,3	не более 1,4	Не более1,4
Входная				
непрерывная	Рвх. ср.	0,1	2	0,1
мощность, Вт				

Сравнение разработанных вентилей и Y-циркулятора с их отечественными и мировыми аналогами показало, что они превосходят их по комплексу электрических параметров.

Разработанные приборы обладают расширенной полосой рабочих частот и уменьшенными прямыми потерями, что позволяет эффективно применять их при разработке систем связи 5-го поколения и другой перспективной гражданской и военной СВЧ техники.

Список литературы

- 1. Semenov A.S. et al. Development of microstrip ferrite decoupling devices for mm-wave range microwave equipment // Journal of Physics: Conference Series, 2020
- Семенов А.С. и др. Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы для СВЧ аппаратуры Ка-диапазона частот // Научно-технический сборник «Электронная техника». - 2020. - Серия 1. – выпуск 2 (545).
- 3. Семенов А.С. и др. Метрологическое обеспечение разработок ферритовых материалов для сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Сборник статей VI Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017 г., с. 27-31.
- 4. Вамберский М.В. и др. Конструирование ферритовых развязывающих приборов –М.: Радио и связь, 1982.
- 5. Семенов А.С. Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы миллиметрового диапазона длин волн с улучшенными характеристиками: дисертация на соискание учёной степени кандидата техн. наук АО «НПП «Исток» им. Шокина», Фрязино, 2020 156 с.