

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФЕРРИТОВОГО ПОЛОСКОВОГО ЦИРКУЛЯТОРА ДЛЯ СВЧ-ПРИЛОЖЕНИЙ

MODELING AND OPTIMIZATION OF A FERRITE STRIPLINE CIRCULATOR FOR MICROWAVE APPLICATIONS

G. Tokin
S. Kuznetsov
D. Zhelyaleva

Summary. Ferrite stripline circulators are widely used in modern electronics due to their unique properties: low signal loss, high isolation, and the ability to transmit signals directionally. This paper examines the research and design of ferrite-garnet stripline circulators operating in the millimeter-wave range. The theoretical foundations of the operation of these devices are presented, and methods for analyzing magnetostatic fields and wave processes in ferrite are described. The influence of geometric structure parameters and material properties on the circulator's performance is studied.

A detailed design optimization algorithm is presented, allowing for minimizing signal loss and increasing the degree of isolation between ports. Graphs of the transmission coefficient, isolation level, and insertion loss as functions of frequency are obtained.

The presented formulas demonstrate the high accuracy of the developed model and confirm its applicability for the design of efficient circulating elements.

Keywords: microstrip circulator, microwave devices, ferrite materials, ferromagnetic resonance, microstrip lines, Maxwell's equations, finite element method.

Токин Георгий Михайлович

Аспирант, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС
njrb@mail.ru

Кузнецов Сергей Федорович

ФГБОУ ВО МИРЭА — Российский технологический университет
sfkuznetsov@istok.ad

Желялева Динара Рамилевна

ФГБОУ ВО МИРЭА — Российский технологический университет
drzhelyaleva@istok.ad

Аннотация. Ферритовые полосковые циркуляторы широко используются в современной радиоэлектронике благодаря своим уникальным свойствам: малым потерям сигнала, высоким коэффициентом развязки и способности направленно передавать сигналы. Данная работа посвящена исследованию и проектированию феррит-гранатовых полосковых циркуляторов миллиметрового диапазона длин волн. Представлены теоретические основы функционирования устройств подобного типа, описаны методы анализа магнитостатических полей и волновых процессов в феррите. Проведено исследование влияния геометрических параметров структуры и свойств материала на рабочие характеристики циркулятора.

Приведен подробный алгоритм оптимизации конструкции, позволяющий минимизировать потери сигнала и увеличить степень развязки между портами. Получены графики зависимостей коэффициента передачи, уровня развязки и вносимых потерь от частоты.

Представленные формулы демонстрируют высокую точность разработанной модели и подтверждают её применимость для проектирования эффективных циркулирующих элементов.

Ключевые слова: микрополосковый циркулятор, СВЧ приборы, ферритовые материалы, ферромагнитный резонанс, микрополосковые линии, уравнение Максвелла, метод конечных элементов.

Введение

Одним из наиболее важных и часто применяемых в СВЧ технике приборов является полосковый ферритовый циркулятор. Циркулятор подразумевает под собой многоплечевое (многополюсное) устройство для направленной передачи энергии электромагнитных колебаний. Подведенная к одному из существующих плеч энергия передаётся в другое, в конкретное, плечо в порядке их очередности. Функционал полоскового циркулятора заключается в ферромагнитном резонансе (ФМР), возникающим в ферритовых материалах при воздействии с магнитным полем. При определенных условиях, когда частота электромагнитного

поля совпадает с собственной частотой ферромагнитного резонанса, возникает значительное изменение импеданса материала, что позволяет реализовать однонаправленность прохождения сигнала. [1].

У циркуляторы популярны в применении их в антенно-фидерных трактах. Они используются для переключения режимов приема и передачи антенны, также модуля сложной фазированной решетки.

Моделирование процесса распространения волн

Для моделирования процессов распространения волн в полосковом ферритовом циркуляторе использу-

ются системы уравнений Максвелла (1) и методы численного анализа.

$$\begin{cases} \nabla \times E = -j\omega\mu H \\ \nabla \times H = j\omega\varepsilon E \end{cases} \quad (1)$$

где:

- E, H , — векторы поля;
- ω — угловая частота;
- ε — диэлектрическая проницаемость подложки

Используя метод конечных элементов, можно построить трехмерную модель циркулятора и проанализировать распределение полей внутри устройства. Это позволяет определить оптимальные размеры и конфигурацию полосок для минимизации потерь, и повышения эффективности. Этот метод позволяет решать дифференциальные уравнения, определяющие электромагнитные поля, путем деления исследуемой области на небольшие элементы и аппроксимации решений на каждом элементе [2].

Шаги метода конечных элементов:

1. Разбиение геометрии: Устройство делится на мелкие элементы, каждый из которых имеет простую форму (например, тетраэдры).
2. Аппроксимация функций: Электромагнитные поля представляются как линейные комбинации базисных функций, определенных на элементах сетки.
3. Формулировка слабых форм уравнений: Уравнения Максвелла преобразуются в интегральные выражения, называемые слабыми формами.
4. Решение системы уравнений: Полученная система алгебраических уравнений решается численно, используя итерационные методы.

Циркулятор описывается матрицей рассеяния \hat{S} размером 3×3 (для трёхплечего устройства) по формуле (2):

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Идеальные свойства:

- прямые потери: $|S_{21}| = |S_{32}| = |S_{13}| \approx 0$ дБ;
- развязка: $|S_{12}| = |S_{23}| = |S_{31}| \ll -20$ дБ;
- отражение: $|S_{11}| = |S_{22}| = |S_{33}| \ll -15$ дБ.

На низких частотах используют цепную модель как в формуле (3) с:

- индуктивностями, имитирующими ферритовый диск;
- ёмкостями полосковых линий;
- взаимными индукциями, отражающими невзаимность [3].

$$Z_{вх} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + j\omega M \quad (3)$$

где M — невзаимная взаимоиндукция

Параметры модели

При моделировании важно учитывать следующие ключевые параметры:

- Геометрические характеристики: Толщина и ширина полосок, расстояние между ними.
- Материал: Электрические и магнитные свойства феррита, диэлектрической подложки и проводников.
- Частота: Рабочая частота устройства определяет длину волны и соответствующие резонансные эффекты.
- Направления распространения: Анализируются направления прихода и ухода волн, определяемые геометрией и ориентацией постоянных магнитных полей [4].

Цель моделирования состоит в определении распределения электрических и магнитных полей внутри устройства, оценке коэффициентов отражения и пропускания, а также расчете потерь мощности. Типичные результаты включают:

- Распределение напряженности электрического и магнитного полей.
- Диаграмму направленности антенны (если применимо).
- Коэффициенты рассеяния (S -параметры) для оценки характеристик передачи и отражения.

Метод конечных элементов применяется в различных областях электроники, включая проектирование антенн, фильтров, резонаторов и микрополосковых линий. Например, при разработке полоскового ферритового циркулятора этот метод позволяет точно рассчитать коэффициент изоляции, уровень обратных потерь и рабочую полосу частот.

Таким образом, точное моделирование процесса распространения волн играет ключевую роль в создании высокоэффективных микроволновых устройств, используемых в современных коммуникациях и радиолокационной технике [5].

Моделирование ферритового материала

Для проектирования Y циркулятора прежде всего необходимо выбрать ферритовый материал. От его материала зависят такие характеристики как: стабильность электрических параметров в диапазоне температур, ширина полосы рабочих частот, прямые потери и развязка между плечами [6].

Большинство ферритовых марок имеют «доменный» резонанс и собственный ферромагнитный резонанс создают единую размытую по частоте область существенного поглощения СВЧ энергии в слабых полях для того, чтобы обеспечить малые потери в слабых полях рабочая частота f обязана быть больше значения $f_{\text{макс}}$, определяющего высокочастотную границу этой области (4):

$$f < f_{\text{макс}} = (H_a + M_s) \tag{4}$$

где γ — гиромагнитное отношение, его значение равно 2,8 МГц/Э,

H_a — внутреннее поле анизотропии феррита,

M_s — намагниченность насыщения феррита.

Время проектирования ферритового циркулятора, необходимо правильно подобрать марку феррита, он должен соответствовать требованиям намагниченность насыщения феррита (5):

$$M_s \leq \frac{f}{1,2 \cdot \gamma} - H_a \tag{5}$$

Время работы прибора данное условие обязано выполняться на нижней частоте рабочего диапазона частот [7].

Для исключения потерь в слабых полях намагниченность насыщения феррита обязана выполнять требования условию (6):

$$M_s \leq \frac{f_{\text{min}}}{\gamma} - H_a \tag{6}$$

где f_{min} — минимальная частота рабочего диапазона, его значения не превышает $\pm 10-15\%$ от среднего значения.

Таблица 1. Параметры феррита марки НМ-160К

Наименование	Обозначение	Измеренное значение	Погрешность измерений
Диэлектрическая проницаемость	ϵ	13,2	$\pm 2\%$
Магнитная проницаемость	μ	0,8	$\pm 0,01\%$
Тангенс угла диэлектрических потерь	$tg\delta_\epsilon$	$3 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2,5 \cdot 10^{-5}\%$
Тангенс угла магнитных потерь	$tg\delta_\mu$	$9 \cdot 10^{-3}$	$\pm 2,5 \cdot 10^{-5}\%$
Намагниченность насыщения	M_s	162 кА/м	$\pm 5\%$

На основе математических условий (1)–(3) для разработки устройства Y-циркулятора с центральной частотой 10 ГГц необходимо использовать феррит марка НМ-160К, он наиболее подходящий, представляет из себя кристаллическую структуру шпинели с добавлением меди, никеля [8]. Параметры данного материала показаны в таблице 1.

Моделирование микрополосковой линии

Ширина подводящего полоска позволяет обеспечить качественное согласование разрабатываемого прибора с другими элементами СВЧ тракта. Расчет производится на волновом сопротивлении 50 Ом:

1. Расчет волнового числа (7):

$$k = \frac{c}{4 \cdot f_{\text{ц}} \cdot \sqrt{\epsilon}}, \tag{7}$$

где c — скорость света;

ϵ — диэлектрическая проницаемость ферритовой подложки;

$f_{\text{ц}}$ — центральная частота микрополоскового ферритового развязывающего прибора.

2. Проверка выполнения условия не возникновения поперечной волны (8):

$$h \leq k \tag{8}$$

3. Вычисление коэффициента j по формуле (9):

$$j = \frac{75 \cdot 10^9}{f_{\text{ц}} \cdot \sqrt{\epsilon} - 1} \tag{9}$$

4. Проверка выполнения условия не возникновения волн высшего типа HE_1 по формуле (10):

$$h \leq j \tag{10}$$

5. Вычисление частоты поперечного резонанса по формуле (11):

$$F = \frac{107,5}{h \cdot \sqrt{\epsilon}} \tag{11}$$

6. Проверка выполнения условия не возникновения поперечного резонанса, по формуле (12):

$$f_{\text{ц}} < F \tag{12}$$

7. Вычисление коэффициента d по формуле (13):

$$d = \frac{Z_{\text{в}}}{60} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon + 1}{2}} + (\epsilon - 1) \cdot \left(\frac{0,226 + \frac{0,12}{\epsilon}}{\epsilon + 1} \right), \tag{13}$$

где Z_b — требуемая величина волнового сопротивления полосков.

8. Расчет ширины полоска, который обеспечит необходимую величину волнового сопротивления, рассчитывается по формуле (14):

$$w = \frac{8 \cdot h}{(e^d - 2 \cdot e^{-d})}, \quad (14)$$

где e — число Эйлера, его значение 2,718 [9].

В данной работе были рассчитаны микрополосковая линия и толщина ферритовой подложки НМ-160К:

- а) Ширина МПЛ = 552 мкм;
- б) Толщина феррита = 700 мкм.

С учетом данной математической модели был смоделирован полосковый Y-циркулятор в X-диапазоне с параметрами (рисунок 1):

- а) диэлектрическая проницаемость феррита, $\epsilon = 13,2$;
- б) полоса рабочих частот = 18,8 %.
- в) намагниченность насыщения феррита, $4\pi M_s = 2035$ Гс;
- г) толщина подложки, $h = 0,7$ мм;
- д) Гирротропия = 0,694.

5 параметры полученные в ходе моделирования прибора представлены на рисунке 2

Разработанная модель микрополоскового циркулятора на подложке из феррита марки НМ-160К имеет прямые потери 0,5 дБ развязку в районе 25 дБ и КСВН равную 1,3 что полностью удовлетворяет требованиям к данным приборам [10].

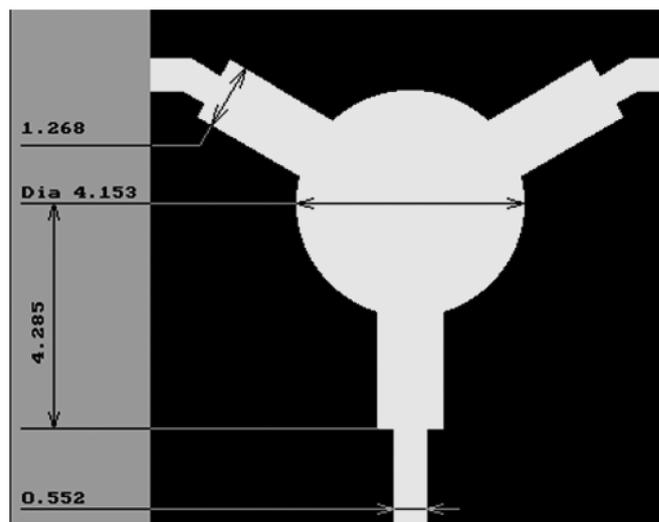


Рис. 1. Модель Y-циркулятора с граничными условиями

Заключение

Ферритовые полосковые циркуляторы представляют собой перспективные устройства для применения в микроволновых системах. Правильный выбор материалов, точная геометрия и использование эффективных методов моделирования обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики данных устройств

В данной работе была продемонстрирована математическая модель Y-циркулятора в X-диапазоне с расчетными параметрами полностью удовлетворяющими техническими характеристиками прибора.

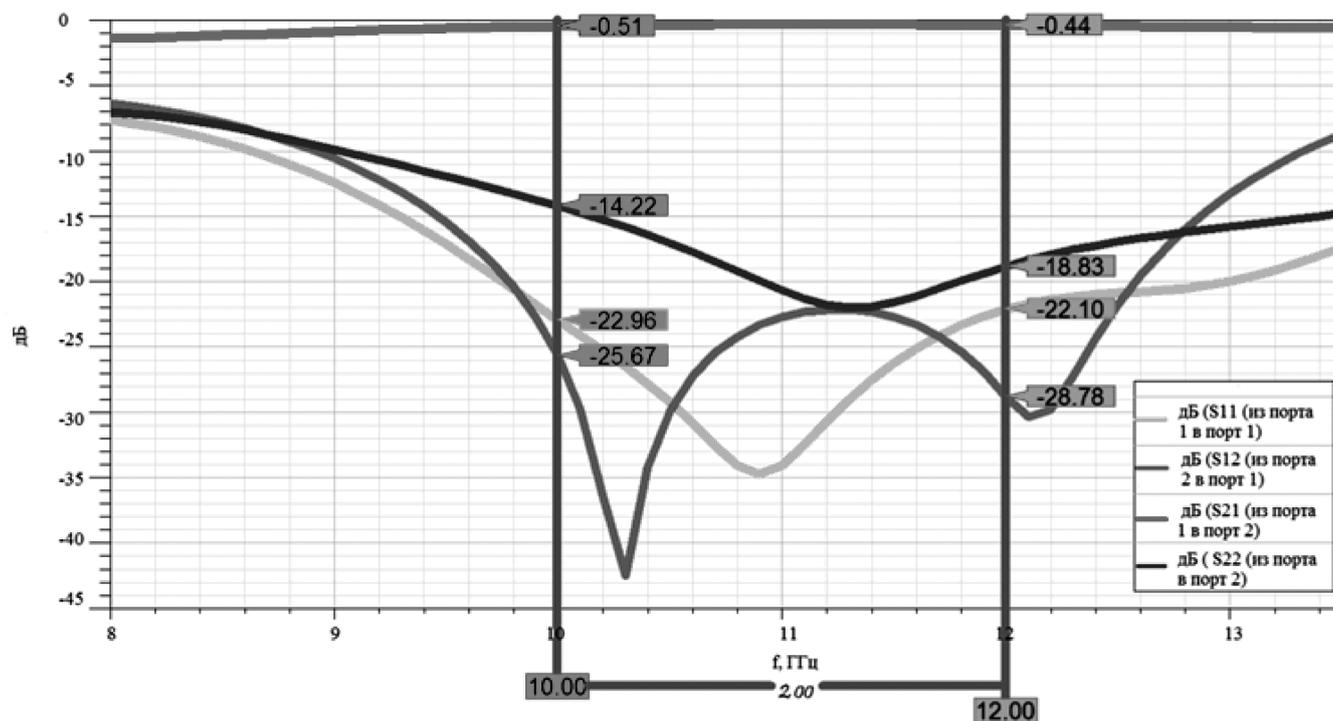


Рис. 2. S-параметры Y-циркулятора

ЛИТЕРАТУРА

1. Современная микроэлектроника: тенденции развития, проблемы и угрозы / А.И. Белоус, В.А. Лабунов // Тезисы докладов конференции, освещающие актуальные вопросы разработки, производства и применения электронной компонентной базы и электронных модулей. — 2019.
2. Развитие СВЧ электроники в России. / С.В. Щербаков // Материалы научно-технической конференции «СВЧ-электроника — 2016». Фрязино, — 2016. — 18–19 мая
3. URL:<https://cernexwave.com/wp-content/uploads/2020/01/Cernexwave-Microstrip-Dual-junction-Circulator.pdf> \ Электронный каталог компании «CernexWave». (Дата обращения 04.09.2023)
4. В.А. Сергеев, Р.Г. Тарасов, А.А. Куликов Диагностика качества выходных усилителей мощности приемо-передающих модулей АФАР по температурным полям / Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Куликов А.А. // Электроника и электронные устройства — 2019. — №1(55). — 112–117с.
5. Метрологическое обеспечение производства и разработок ферритов для приборов СВЧ-электроники / Налогин А.Г., Семенов М.Г., Мясников А.В., Семенов А.С., Панков Р.П., Пархоменко М.П., Каленов Д.С., Федосеев Н.А., Налогин И.А., Троицкая Л.А. // Тезисы докладов Юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина». — 2018. — с. 109.
6. Микроразветвляющие ферритовые развязывающие приборы миллиметрового диапазона длин волн с улучшенными характеристиками / А.С. Семенов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — 2020.
7. Бородин В.Н., Козлов В.А., Михалицын Е.А., Сорокин А.В. Автоматизированное проектирование ферритовых циркуляторов на сосредоточенных элементах // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — 2020. — Т. 63, № 5. — С. 312–321.
8. Крехтунов В.М., Комиссарова Е.В., Русов Ю.С. Исследование ферритовых СВЧ устройств: учебно-методическое пособие. — Новосибирск: НГТУ, 2020. — 84 с. — ISBN 978-5-7782-4210-9.
9. Крехтунов В.М., Комиссарова Е.В., Русов Ю.С. Исследование ферритовых СВЧ устройств: учебно-методическое пособие. — Новосибирск: НГТУ, 2020. — 84 с. — ISBN 978-5-7782-4210-9.
10. Мациевский С.В., Каминский В.И. Моделирование характеристик гибридного ускорителя электронов с питанием от автогенератора через ферритовый циркулятор // Радиотехника и электроника. — 2022. — Т. 67, № 4. — С. 345–352.

© Токин Георгий Михайлович (njrb@mail.ru); Кузнецов Сергей Федорович (sfkuznetsov@istok.ad);

Желялева Динара Рамилевна (drzhelyaleva@istok.ad)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»