

УДК 621.396.69

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СВЧ-ГИРАТОРА

Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьёв И.Н., Соловьёв А.Н., Коваленко Д.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», Великий Новгород Великий Новгород, Россия (173003, Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41), Mirza.Bichurin@novsu.ru

Статья посвящена изучению возможности создания СВЧ-гиратора на основе магнитоэлектрического материала. Полученные экспериментальные данные подтверждают возможность использования магнитоэлектрического материала для конструирования СВЧ-гираторов. Устройство позволяет регулировать активное сопротивление линии передачи на частоте около 4,14 ГГц на 2 Ом, реактивное сопротивление на 2 Ом при постоянном подмагничивающем поле 830 Э и приложенном постоянном электрическом поле 100 В. В перспективе совершенствование технологий изготовления магнитоэлектрических элементов позволит перейти к низковольтному электронному способу управления гиратором, что позволит использовать это устройство в интегральных схемах СВЧ. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчётными. В дальнейшем предполагается экспериментальное изучение СВЧ-гиратора, в котором использован магнитоэлектрический эффект в области магнитоакустического резонанса.

Ключевые слова: магнитоэлектрические материалы, магнитоэлектрический гиратор, СВЧ-гиратор.

THE STUDY OF MAGNETOELECTRIC MICROWAVE GYRATOR

Bichurin M.I., Petrov R.V., Soloviev I.N., Soloviev A.N., Kovalenko D.V.

Novgorod State University, Velikiy Novgorod Velikiy Novgorod, Russia (173003, Velikiy Novgorod, Bolshaiy St-Peterburgskaiy, d. 41), Mirza.Bichurin@novsu.ru

The article is devoted to the study of magnetoelectric MICROWAVE gyrator. In this paper we discuss the measurement data of magnetoelectric device for prototyping of the microwave gyrator. We received useful experimental results. Model allows to adjust of the transmission lines impedance at frequency 4.14 GHz by range 47 - 49 Ohm, with bias field about 830 Oe and control electric field from 0 V to 100 V. Finally we suggest how to improve presented results to design the magnetoelectric gyrator.

Keywords: magnetoelectric materials, magnetoelectric gyrator, MICROWAVE gyrator.

Введение

Перспективы дальнейшего развития СВЧ-техники, в том числе интегральные технологии создания приёмо-передающих модулей для фазированных антенных решёток,

предполагают использование многофункциональных и комплексных материалов, обладающих существенными преимуществами перед традиционными. Магнитоэлектрические (МЭ) материалы, интенсивно изучаемые в последнее время во всём мире, позволяют создавать устройства с улучшенными характеристиками. Наряду с хорошо изученными МЭ-устройствами, такими как фазовращатель, аттенюатор, фильтр, имеется ряд устройств, требующих проведения новых исследований. К таким устройствам до настоящего времени относили и МЭ-гиратор. По определению, впервые данному Б. Теллегеном в статье [1], гиратор – это базовый элемент электрической цепи, четырехполюсник, в идеальном случае соответствующий формулам:

$$\begin{aligned}V_1 &= -sI_2, \\V_2 &= sI_1,\end{aligned}$$

где V – напряжение, I – ток, s – коэффициент гирации.

Такой гиратор преобразует импеданс цепи, изменяет фазу проходящего сигнала [2].

Необходимость использования гираторов в СВЧ-цепях диктуется разницей в волновом сопротивлении различных участков СВЧ интегрального устройства. Для согласования импедансов различного значения необходимо использовать гираторы. Применение интегральных СВЧ-МЭ-гираторов позволит существенно улучшить амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики устройств, сократить габариты и массу, позволит осуществить интегральный способ управления характеристиками СВЧ-тракта. На сегодняшний день разработаны достаточно эффективные МЭ-материалы, которые можно использовать для создания МЭ-гиратора [3–5].

В отличие от известного и применяемого в технике СВЧ-гиратора на эффекте Фарадея, который осуществляет поворот фазы на 180° , гиратор с использованием МЭ-эффекта обладает способностью также инвертировать импеданс линии передачи и преобразовывать входное напряжение в ток и наоборот. Гиратор на МЭ-эффекте имеет компактную форму благодаря используемому сосредоточенному элементу. Это позволяет существенно сократить габаритные размеры предлагаемого СВЧ-гиратора и применять его в устройствах микро- и нанoeлектроники. Итак, возможно использование этого устройства в технике СВЧ для инвертирования импеданса, поворота фазы электромагнитной волны, преобразования электрического тока в электрическое напряжение или, наоборот, преобразования электрического напряжения в электрический ток [6].

Исследование магнитоэлектрического гиратора

Для исследования эффекта гирации в устройстве нами был разработан макет, на котором был поставлен ряд экспериментов.

Элементы МЭ-гиратора расположены на подложке толщиной 1 мм и диэлектрической проницаемостью равной 5 (рис. 1). Два микрополосковых элемента длиной 20 мм и шириной 0,5 и 6 мм расположены на расстоянии 0,5 мм друг от друга. Для лучшего согласования входная и выходная линии подключены на некотором расстоянии от края микрополосковых элементов. Между микрополосковыми элементами гиратора установлен МЭ-элемент. МЭ-элемент представляет собой в данном случае слоистую структуру, один слой – это иттрий-железистый гранат (ИЖГ) толщиной 6,4 мкм на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) толщиной 450 мкм. Размер ферритового элемента – квадрат со стороной 3 мм. Второй слой – это пьезоэлектрик ЦТС с толщиной 200 мкм и диаметром 5 мм с нанесёнными на обе стороны металлизированными обкладками. Два слоя (ИЖГ и ЦТС) склеены между собой клеем на основе этил-2-цианоакрилата.

МЭ-эффект в композиционных материалах можно рассматривать как результат взаимодействия пьезоэлектрических и магнитоэлектрических свойств. Механизм МЭ-эффекта в подобных структурах состоит в следующем: внешнее электрическое поле вызывает деформацию пьезоэлектрической компоненты, приводящую к возникновению механических напряжений в ферритовой компоненте. В результате изменяются магнитные свойства феррита. Как результат в диапазоне СВЧ наблюдается сдвиг линии ферромагнитного резонанса (ФМР). Таким образом, изменяются параметры МЭ-гиратора, что фиксируется измерительными приборами. Ожидаемые изменения в параметрах должны происходить для коэффициентов прохождения и отражения, также должны изменяться фаза и импеданс линии передачи. Экспериментальное обнаружение изменений в указанных параметрах будет являться свидетельством, подтверждающим справедливость предположения о возможности практического построения гиратора на МЭ-резонаторе.

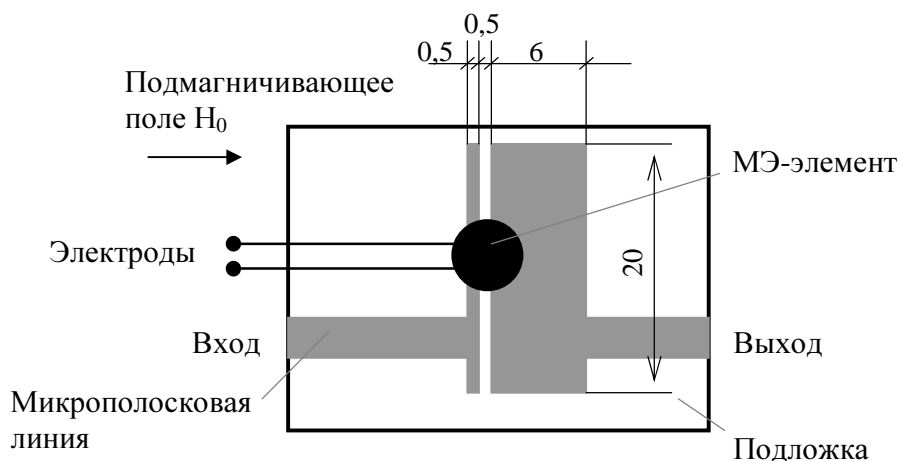


Рисунок 1. Конструкция магнитоэлектрического СВЧ-гиратора.

Эквивалентная схема магнитоэлектрического гиратора приведена на рис. 2а. На рис. 2б приведена свернутая эквивалентная схема устройства.

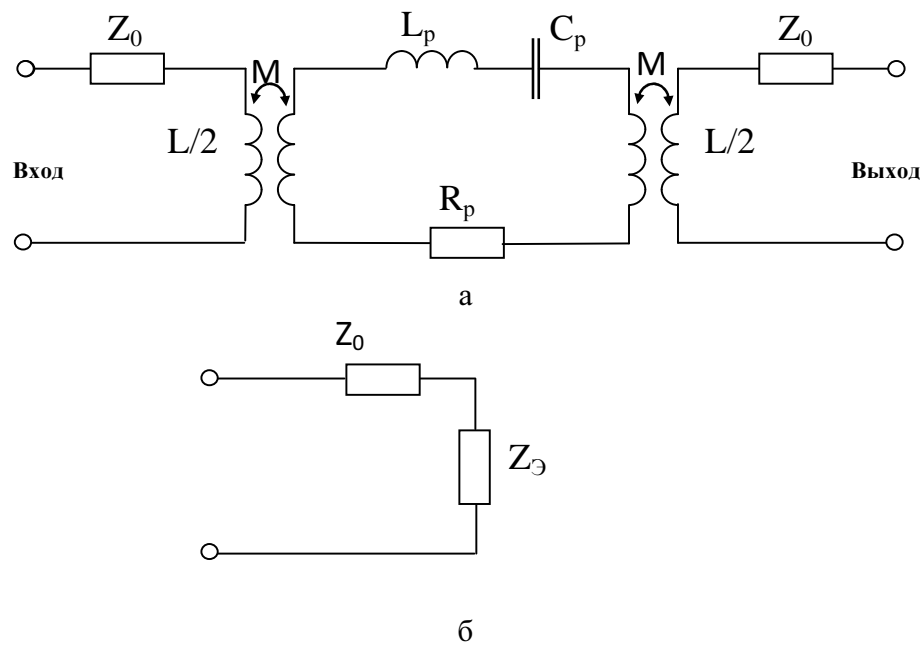


Рисунок 2. Эквивалентная схема магнитоэлектрического резонатора.

Комплексное сопротивление \bar{Z}_3 эквивалентной схемы описывается формулой:

$$\bar{Z}_3 = |Z(\omega)| \cdot e^{-j\varphi(\omega)}; \quad (1)$$

где $Z(\omega)$ – активное сопротивление, φ – фаза.

Коэффициент передачи в рассматриваемом резонаторе рассчитывается по следующей формуле:

$$K(\omega) = \frac{\frac{\omega^2 M^2}{Z_0}}{\frac{\omega^2 M^2}{Z_0} + j\omega L_p + R_p + j\omega L - \frac{j}{C_p \omega}}; \quad (2)$$

На рисунке 3 изображён макет устройства, на котором проводились измерения.



Рисунок 3. Макет устройства.

Результатом описанного взаимодействия является преобразование импеданса в линии передачи и изменение фазы сигнала.

Измерительный стенд

Для измерения параметров гиратора использовался PLANAR OBZOR-804 Network Analyzer, электромагнит, блок питания электромагнита, регулируемый блок питания, гауссметр. Схема измерительной установки для измерения параметров гиратора представлена на рис. 4.

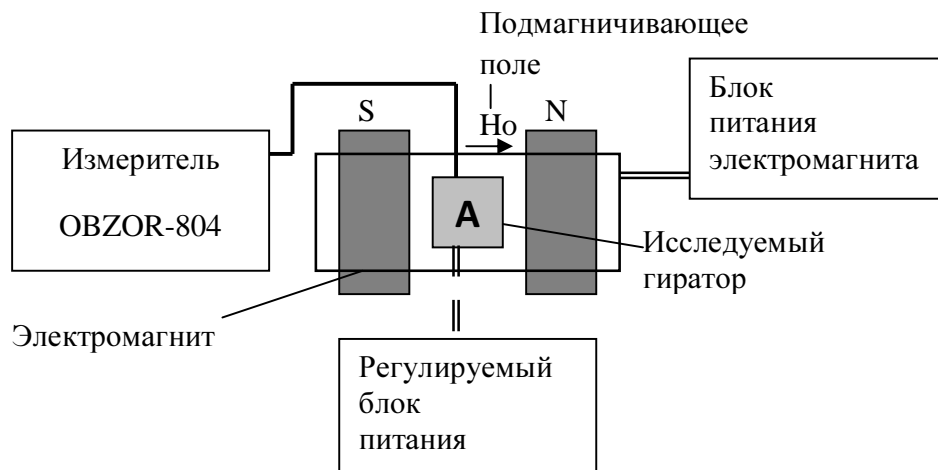


Рисунок 4. Схема измерительной установки для измерения параметров гириатора.

Мощность сигнала на выходе анализатора была установлена равной 10 мВт.

Данные измерений

Измерения проводились в частотном диапазоне около 4,14 ГГц. На МЭ-элемент подавалось постоянное магнитное поле в диапазоне от 0 до 1000 Э, был найден оптимум по изменению характеристик при подмагничивающем поле в 830 Э. Оптимум находится вблизи частоты ФМР в плёнке ЖИГ, при потерях, вносимых гириатором, не превышающих 0,6 дБ. Постоянное магнитное поле, действующее на МЭ-элемент, было установлено в 830 Э. Постоянное электрическое напряжение, подаваемое на МЭ-гириатор, было в диапазоне от 0 до 100 В.

Теоретический расчёт резонансной частоты для пластины, намагниченной в плоскости для ИЖГ, показывает удовлетворительное совпадение по величине подмагничивающего поля (830 Э) линии ФМР с найденным опытным путём значением частоты резонанса около 4,12 ГГц. Используемая формула для собственной частоты прецессии МЭ-гириатора с намагниченным ферритом в плоскости образца имеет вид [7]:

$$f_{\text{пл}} = \gamma(H_0(H_0 + 4\pi M_0))^{1/2}, \quad (3)$$

где $f_{\text{пл}}$ – частота однородной прецессии намагниченности МЭ-гириатора;

γ – гиромагнитное отношение;

H_0 – подмагничивающее поле;

$4\pi M_0$ – намагниченность насыщения.

Исходные данные для расчёта: γ равно 2,8 МГц/Гс; для ИЖГ намагниченность насыщения равна 1780 Гс; при подмагничивающем поле величиной в 830 Э получаем частоту резонанса $f_{\text{пл}}$ равную 4,12 ГГц.

Потери в изучаемом частотном диапазоне обусловлены в основном потерями в макете устройства, так на частоте 4,14 ГГц потери в разъёмах и линии передач составили 1,8 дБ. Изменение коэффициента прохождения S_{21} на частотах в районе 4,14 ГГц, при

подмагничивающем поле 830 Э и при подаче напряжения на МЭ-элемент 0 В и 100 В, составило не более 0,6 дБ, что свидетельствует о незначительности вносимых гиратором потерь в линию передачи.

Заметно изменялся при подмагничивающем поле 830 Э и при подаче напряжения на МЭ-элемент 100 В коэффициент отражения S_{11} . Коэффициент отражения составил при 0 В: -20,3 дБ, при 100 В: -16,4 дБ.

Активная составляющая волнового сопротивления устройства при подмагничивающем поле 830 Э составляла 47 Ом и при подаче напряжения на МЭ-элемент 100 В изменялась на 2 Ом, достигая 49 Ом. Реактивная составляющая волнового сопротивления устройства при подмагничивающем поле 830 Э составляла -25 Ом и при подаче напряжения на МЭ-элемент 100 В изменялась на 2 Ом, достигая -23 Ом.

Полученные экспериментальные данные для гиратора совпадают с расчётными, полученными по формуле (3). Сравнение полученных экспериментальных результатов с расчетными формулами коэффициента передачи и эквивалентного сопротивления (1) и (2) приводит к удовлетворительному соответствию.

Заключение

Полученные экспериментальные данные подтверждают возможность использования СВЧ-гираторов для конструирования интегральных устройств. Устройство позволяет регулировать активное сопротивление линии передачи на частоте 4,14 ГГц на 2 Ом, реактивное на 2 Ом при постоянном подмагничивающем поле 830 Э и приложенном постоянном электрическом поле 100 В. В перспективе совершенствование технологий изготовления МЭ-элементов позволит перейти к низковольтному электронному способу управления гиратором, что позволит использовать это устройство в интегральных схемах СВЧ. Полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с теоретическими. В дальнейшем предполагается экспериментальное изучение СВЧ-гиратора, в котором использован магнитоэлектрический эффект в области магнитоакустического резонанса (МАР) [5; 6] – случай, когда постоянное магнитное поле настроено на ФМР, а размеры образца удовлетворяют условию электромеханического резонанса и происходит экстремальное увеличение МЭ-коэффициента в области совпадения частот электромеханического резонанса и ФМР.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Tellegen B.D.H. The gyrator, a new electric network element / Philips Res. Rep. – 3, 81 (1948).
2. Петров Р.В., Аверкин С.В., Филиппов А.В. Исследование эффекта гирации в магнитоэлектрическом резонаторе // Вестн. Новг. гос. ун-та. Сер. «Техн. науки». – 2010. – № 60. – С. 85–89.
3. Junyi Zhai, Jiefang Li, Shuxiang Dong, Viehland D., Bichurin M.I. A quasi (unidirectional) Tellegen gyrator : JAP 100, 124509 (2006).
4. Junyi Zhai, Jiefang Li, Viehland D., Bichurin M.I. Large magnetoelectric susceptibility: The fundamental property of piezoelectric and magnetostrictive laminated composites : JAP 101, 014102 (2007).
5. Bichurin M.I., Petrov V.M., Ryabkov O.V., Averkin S.V., Srinivasan G. Theory of magnetoelectric effects at magnetoacoustic resonance in single-crystal ferromagnetic-ferroelectric heterostructures / Phys. Rev. B 72, 060408(R) (2005).
6. Бичурин М.И., Петров Р.В., Филиппов А.В. Гиратор СВЧ магнитоэлектрический : Патент 2357356, Н03Н011/42 (2009).
7. Гуревич А.Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. – М. : ФизМатЛит, 1960. – 408 с.

Рецензенты:

Захаров А.Ю., д.ф.-м.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород.
Корнышев Н.П., д.т.н., ведущий научный сотрудник, НИИ ПТ «РАСТР», г. Великий Новгород.