

09;12

## Сверхвысокочастотный спин-волновой нелинейный направленный ответвитель

© М.А. Тимофеева, А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина)  
E-mail: spinlab@eltech.ru

Поступило в Редакцию 7 июня 2006 г.

Впервые предложен и исследован сверхвысокочастотный (СВЧ) нелинейный спин-волновой направленный ответвитель. Устройство имеет четыре порта. Каждый из портов может являться как входом, так и выходом для СВЧ-сигнала. В конструкции ответвителя в качестве управляющего элемента используется нелинейный спин-волновой фазовращатель на основе ферромагнитной пленки. Отличительной особенностью нелинейного направленного ответвителя является то, что увеличение мощности входного СВЧ-сигнала приводит к его переключению с одного выходного порта на другой. Это переключение обусловлено изменением фазового набега спиновых волн при увеличении их мощности.

PACS: 84.40.-x

Направленные ответвители широко применяются в сверхвысокочастотной (СВЧ) технике. Это — пассивные линейные приборы, предназначенные для ответвления части СВЧ-сигнала из одного канала в другой. Их рабочие характеристики не зависят от уровня мощности ответвляемого СВЧ-сигнала. В настоящее время разработаны различные конструкции направленных ответвителей [1,2]. Так, например, в спин-волновой микроэлектронике был разработан линейный направленный ответвитель на магнитостатических спиновых волнах, распространяющихся в монокристаллической пленке железо-иттриевого граната [3]. Такой ответвитель обладал частотно-селективными фильтрующими свойствами. Значение переходного ослабления сигнала регулировалось при помощи изменения магнитного поля, прикладываемого к пленке.

Целью настоящей работы являлись разработка и исследование СВЧ нелинейного направленного ответвителя на спиновых волнах,

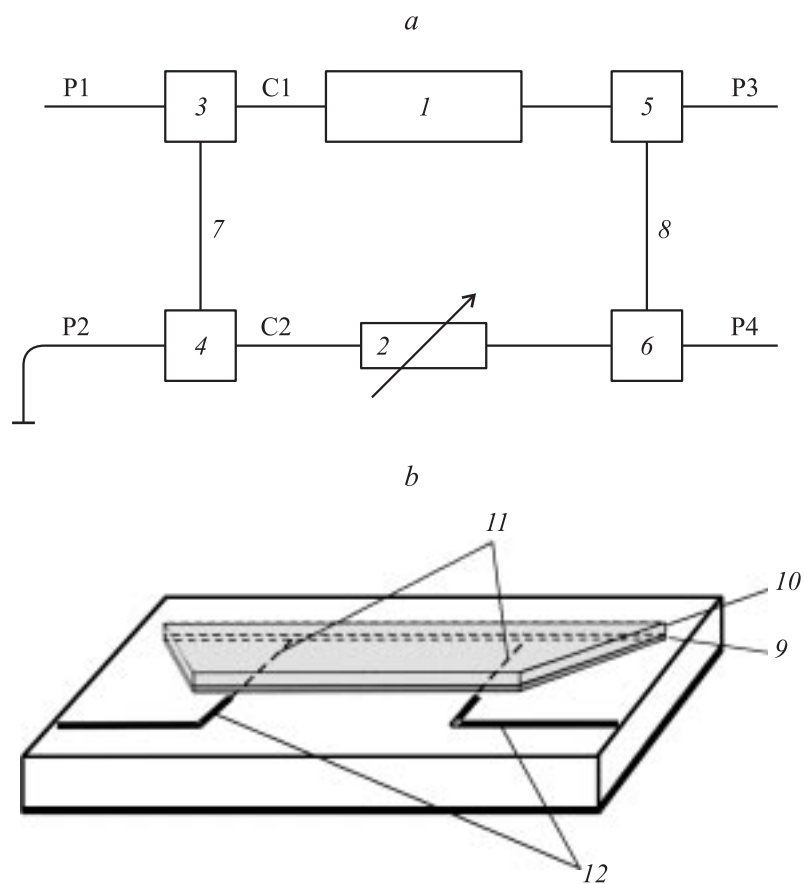
переходное ослабление сигнала в котором меняется при изменении уровня мощности ответвляемого сигнала.

Блок-схема экспериментального макета нелинейного направленного ответвителя представлена на рис. 1. Устройство было выполнено в виде СВЧ шлейфного квадратного моста с четырьмя портами P1, P2, P3 и P4. Оно состояло из нелинейного спин-волнового фазовращателя 1, переменного аттенюатора 2, четырех элементов 3–5 и 6, служивших для разделения и сложения СВЧ-сигналов, а также СВЧ-линий передачи 7 и 8. Нелинейный фазовращатель был включен в первый канал С1 направленного ответвителя. Во второй канал С2 был включен переменный аттенюатор. Эти каналы были соединены СВЧ-линиями передачи 7 и 8 при помощи элементов 3–5 и 6.

Линии передачи 7 и 8 имели такую длину, чтобы СВЧ-сигнал рабочей частоты приобретал в них фазовый набег, близкий к 90 градусам. Элементы 3–5 и 6 были сконструированы из стандартных коммерческих делителей (сумматоров) СВЧ-мощности и аттенюаторов так, чтобы складывающиеся в них сигналы, прошедшие через разные каналы ответвителя, имели одинаковую мощность. Канал С2 между элементами 4 и 6 имел такую длину, чтобы фазовый набег СВЧ-сигнала в нем был равен приблизительно 90 градусов.

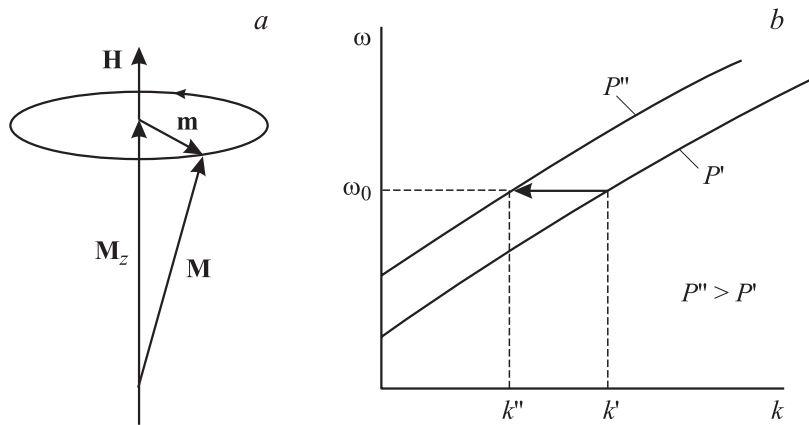
Нелинейный спин-волновой фазовращатель (см. рис. 1, *b*) был изготовлен на основе монокристаллической пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) 9 толщиной  $L = 5.2 \mu\text{m}$ , выращенной методом жидкофазной эпитаксии на подложке галлий-гадолиниевого граната 10 толщиной 0.5 mm. Пленка имела намагниченность насыщения  $M_s = 1750 \text{Gs}$ . Возбуждение и прием спиновых волн осуществлялись с помощью микрополосковых антенн 11 шириной  $50 \mu\text{m}$  и длиной 2 mm, расположенных на расстоянии 5 mm друг от друга. Пленка ЖИГ находилась на микрополосковых антеннах и была в непосредственном контакте с ними. Для подвода СВЧ-мощности к возбуждающей антенне, а также для отвода СВЧ-мощности от приемной антенны использовались микрополосковые линии 12 с волновым сопротивлением  $50 \Omega$ . Нелинейный фазовращатель размещался между полюсами постоянного магнита в однородном магнитном поле напряженностью  $H_e = 2911 \text{Oe}$ , которое было направлено по нормали к плоскости пленки. Такая ориентация поля обеспечивала возбуждение в пленке ЖИГ прямых объемных спиновых волн.

В основе работы нелинейного направленного ответвителя лежат явления интерференции и нелинейного фазового сдвига интенсивных



**Рис. 1.** Блок-схема нелинейного спин-волнового направленного ответвителя (а) и нелинейного спин-волнового фазовращателя (b).

спиновых волн. Явление нелинейного фазового сдвига интенсивных спиновых волн объясняется следующим образом. На рис. 2, а изображена модель прецессии намагниченности [4]. Из рисунка ясно, что при увеличении динамической компоненты намагниченности  $m$  происходит уменьшение статической компоненты намагниченности  $M_z$ . Уменьше-



**Рис. 2.** Модель прецессии вектора намагниченности (а) и нелинейный сдвиг дисперсионной кривой спиновых волн при увеличении их мощности (b).

ние  $M_z$  приближенно описывается следующей формулой:

$$M_z \approx M_s \left( 1 - \frac{m^2}{2M_s^2} \right). \quad (1)$$

Статическая намагниченность  $M_z$  входит в качестве параметра в закон дисперсии спиновых волн. В нелинейном спин-волновом направленном ответителе в качестве рабочей волны использовалась прямая объемная волна низшего типа. Ее закон дисперсии имеет вид [5]:

$$\omega(k) \cong \sqrt{\omega_H^2 + \omega_H \omega_M - \frac{\omega_H \omega_M}{kL} [1 - \exp(-kL)]}, \quad (2)$$

где  $\omega_H = 2\pi|\gamma|(H_e - M_z)$ ,  $\omega_M = 2\pi|\gamma|M_z$ .

В приведенных формулах  $|\gamma|$  — гиромагнитное отношение, которое равно 2.8 МГц/Ое,  $\omega$  — циклическая частота спиновой волны, а  $k$  — ее волновое число.

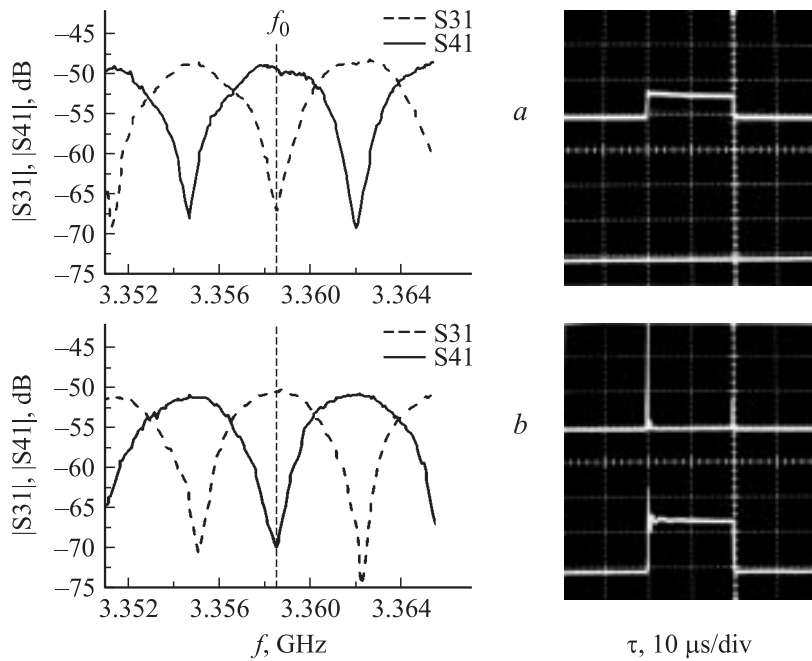
Как ясно из формул (1) и (2), увеличение величины  $m$  вызывает смещение дисперсионной кривой спиновых волн, которое качественно показано на рис. 2, b. Смещение дисперсионной кривой, в свою очередь, вызывает изменение волнового числа  $k$  бегущей спиновой волны,

возбуждаемой на фиксированной рабочей частоте  $\omega_0$ . Изменение  $k$  приводит к изменению фазового набега спиновых волн рабочей частоты. Отметим, что величина динамической намагниченности (амплитуда спиновой волны) пропорциональна квадратному корню от мощности СВЧ-сигнала, переносимого спиновой волной.

Описанный нелинейный фазовый сдвиг возникает в нелинейном спин-волновом фазовращателе. Проведенные численные расчеты и экспериментальные измерения показали, что при увеличении уровня мощности фазовый набег СВЧ-сигнала в нелинейном фазовращателе может изменяться более чем на 180 градусов [6]. Следовательно, при сравнительно низком уровне мощности фазовый набег СВЧ-сигнала в канале С1 может быть равен  $90 + 360 \cdot n$  градусов (где  $n = 0.1.2, \dots$ ), а при сравнительно высоком уровне мощности он может стать равным  $270 + 360 \cdot n$  градусов. Во всех остальных линиях передачи нелинейного направленного ответвителя фазовый набег СВЧ-сигнала не зависит от его мощности. Поэтому схема нелинейного направленного ответвителя была сконструирована таким образом, чтобы на некоторых выбранных частотах в элементе б реализовывалась синфазная интерференция сигналов, а в элементе 5 реализовывалась противофазная интерференция сигналов. При проведении экспериментальных исследований к порту Р2 ответвителя была подключена согласованная нагрузка. На порт Р1 подавались СВЧ-сигналы различного уровня мощности.

На рис. 3, а слева приведены частотные зависимости коэффициентов передачи СВЧ-сигнала от порта Р1 к порту Р3 (S31) и от порта Р1 к порту Р4 (S41), измеренные при мощности непрерывного входного СВЧ-сигнала, равной 8 dBm. Этот уровень мощности определял верхнюю границу линейного динамического диапазона устройства. Полученные зависимости имели вид чередующихся максимумов и минимумов. Наблюдаемая форма АЧХ была обусловлена тем, что фазовый набег СВЧ-сигнала в нелинейном фазовращателе изменяется с частотой намного быстрее, чем в других элементах нелинейного направленного ответвителя. Поэтому сигналы, прошедшие разные каналы ответвителя, на одних частотах интерферируют синфазно, а на других противофазно.

Как было описано выше, нелинейный направленный ответвитель имел такую конструкцию, чтобы сигналы сравнительно низкого уровня мощности на элементе 5 складывались противофазно, а на элементе б — синфазно. Как видно из рис. 3, а, такая ситуация реализовывалась на частоте  $f_0 = 3.3583$  GHz. На этой частоте коэффициент передачи S31



**Рис. 3.** Частотные зависимости коэффициентов передачи S31 и S41 нелинейного направленного ответвителя (слева) и осциллограммы выходных сигналов, появившихся на портах P4 (верхние треки) и P3 (нижние треки). Измерения сделаны при мощностях входного сигнала 8 (a) и 21 dBm (b). Осциллограммы приведены для несущей частоты периодической последовательности СВЧ-импульсов 3.3583 GHz с длительностью 20  $\mu$ s и периодом 500  $\mu$ s.

имел минимальное значение, а коэффициент передачи S41 — максимальное значение. Это приводило к тому, что сигнал, поданный на этой частоте на порт P1, распределялся в нелинейном направленном ответвителе так, что сигнал, появившийся на порте P4, имел мощность приблизительно на 20 dBm большую, чем сигнал, появившийся на порте P3. Иными словами, сигнал, подававшийся на порт P1, появлялся на порте P4. Данный факт подтверждают осциллограммы выходных сигналов нелинейного направленного ответвителя, приведенные на рис. 3, a справа. Такие осциллограммы наблюдались при подаче на

порт P1 периодической последовательности прямоугольных импульсов на несущей частоте  $f_0 = 3.3583$  GHz. На осциллограммах верхний трек соответствует сигналу, появлявшемуся на порте P4, а нижний трек соответствует сигналу, появлявшемуся на порте P3.

Увеличение мощности входного сигнала приводило к смещению частотных зависимостей коэффициентов передачи S31 и S41 вверх по частоте. Этот эффект был вызван изменением фазового набега СВЧ-сигнала в нелинейном фазовращателе. Когда входная мощность достигала значения 21 dBm, фазовый набег изменялся на 180 градусов. При этом характеристики S31 и S41 принимали вид, показанный на рис. 3, b слева. Как видно из рисунка, теперь на частоте  $f_0$  наблюдался максимум характеристики S31 и минимум характеристики S41. В этом случае сигнал, подававшийся на порт P1, появлялся на порте P3. Осциллограммы импульсных сигналов приведены на рис. 3, b справа.

Необходимо отметить, что потери, вносимые в СВЧ-тракт исследованным нами нелинейным направленным ответвителем, были большими из-за того, что при его макетировании в элементах 3–5 и 6 использовались аттенюаторы. Вносимые потери можно значительно уменьшить, если предлагаемую конструкцию реализовать в микрополосковом исполнении.

Таким образом, в настоящей работе был разработан и исследован СВЧ нелинейный направленный ответвитель на спиновых волнах. В исследованной конструкции переключение входного СВЧ-сигнала с одного выходного порта ответвителя на другой порт происходило при увеличении мощности этого сигнала от 8 до 21 dBm. Прибор с подобным принципом действия может найти различные технические применения. В качестве возможных применений разработанного прибора можно назвать переключатель каналов, мультиплексор и демультимплексор.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-02-17714), Федерального агентства по образованию РФ (проект РНП/2.1.1382), Федерального агентства по науке и инновациям и Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-8860.2006.2), Metamorphose Network of Excellence project (The 6th Framework Programme), гранта для молодых кандидатов наук Санкт-Петербурга (шифр PD 06-1.2-8) и гранта для студентов и аспирантов Санкт-Петербурга (шифр МО6-3.9Д-11).

## Список литературы

- [1] *Веселов Г.И., Егоров Е.Н., Алехин Ю.Н.* и др. // Микроэлектронные устройства СВЧ. М.: Высш. школа, 1988. 280 с.
- [2] *Harlan H.J.* // *Microwave Journal*. 2005. V. 49. N 11. P. 22–34.
- [3] *Castera J.P., Hartemann P.* // *Electronics Letters*. V. 16. N 5. P. 195–196.
- [4] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
- [5] *Дмитриев В.Ф., Калиникос Б.А.* // *Изв. вузов. Физика*. 1988. № 11. С. 24–53.
- [6] *Ustinov A.B.* // *Proc. 49<sup>th</sup> Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials*. Jacksonville, Florida, 2004. P. BQ-07.