

05;09;12

## Нелинейный спин-волновой сверхвысокочастотный интерферометр

© А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос

С.-Петербургский государственный электротехнический университет  
"ЛЭТИ"

E-mail: eivt@eltech.ru

*Поступило в Редакцию 26 декабря 2000 г.*

Впервые экспериментально исследованы характеристики сверхвысокочастотного нелинейного спин-волнового интерферометра. Интерферометр представлял собой мостовую схему, в одном из плеч которой содержался нелинейный спин-волновой фазовращатель, изготовленный на основе пленки железо-иттриевого граната. Обнаружено, что наибольшая чувствительность нелинейного интерферометра к уровню входного сигнала достигается в случае применения фазовращателя на прямых объемных спиновых волнах. При этом на частотах гигагерцового диапазона при увеличении входной сверхвысокочастотной мощности до единиц милливатт происходит изменение разности фаз сигналов более чем на  $180^\circ$ .

Линейные и нелинейные эффекты, возникающие при распространении сверхвысокочастотных (СВЧ) спиновых волн в ферромагнитных пленках, исследованы как с фундаментальных, так и с прикладных позиций. Несмотря на многообразие уже разработанных пленочных спин-волновых приборов (см., например, [1,2]), возможности создания новых устройств обработки СВЧ сигналов с помощью спиновых волн далеко не исчерпаны. Так, например, представляет технический интерес разработка спин-волнового СВЧ интерферометра, принцип действия которого подобен интегрально-оптическому интерферометру типа Маха-Цендера, использующемуся для создания широкого круга устройств интегральной оптики [3]. Применение линейного спин-волнового интерферометра для создания бистабильного СВЧ устройства было описано в работе [4]. Однако для расширения возможностей обработки сигналов непосредственно в диапазоне СВЧ представляется перспективным создание нелинейного спин-волнового интерферометра.

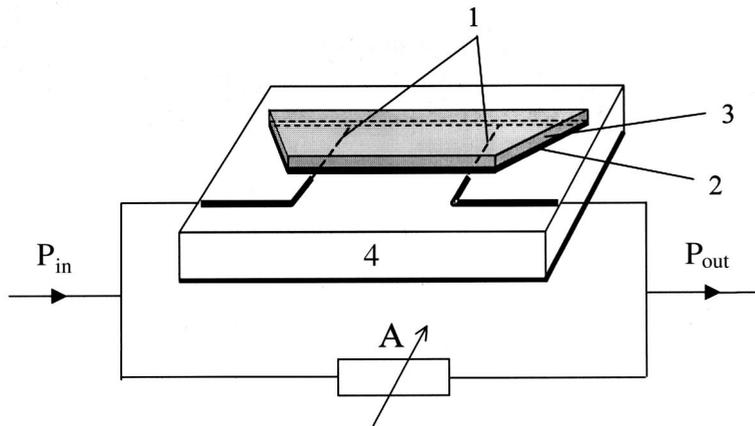


Рис. 1. Блок-схема нелинейного интерферометра.

Целью данной работы являлось исследование характеристик нелинейного спин-волнового пленочного СВЧ интерферометра, содержащего в качестве нелинейного элемента пленочный спин-волновой фазовращатель.

Блок-схема экспериментального макета нелинейного интерферометра изображена на рис. 1. Устройство представляло собой мостовую схему, состоящую из двух плеч. В первом плече интерферометра содержался спин-волновой фазовращатель, набег фазы СВЧ сигнала на выходе которого зависел от его амплитуды. Во втором плече, называемом опорным, содержался переменный аттенуатор. Экспериментальный макет имел конструкцию, в которой была реализована возможность использования фазовращателей, работающих на различных типах спиновых волн.

Каждый нелинейный фазовращатель имел вид, показанный на рис. 1. Для возбуждения спиновых волн использовались микрополосковые антенны (1) длиной 2 mm и шириной 50  $\mu\text{m}$ , нанесенные на подложку из поликора толщиной 0.5 mm. Антенны питались от подводящих микрополосковых линий, имевших волновое сопротивление 50 Ohm. В фазовращателях (4) использовались пленки железо-иттриевого граната (2), эпитаксиально выращенные на подложках из гадолиний-

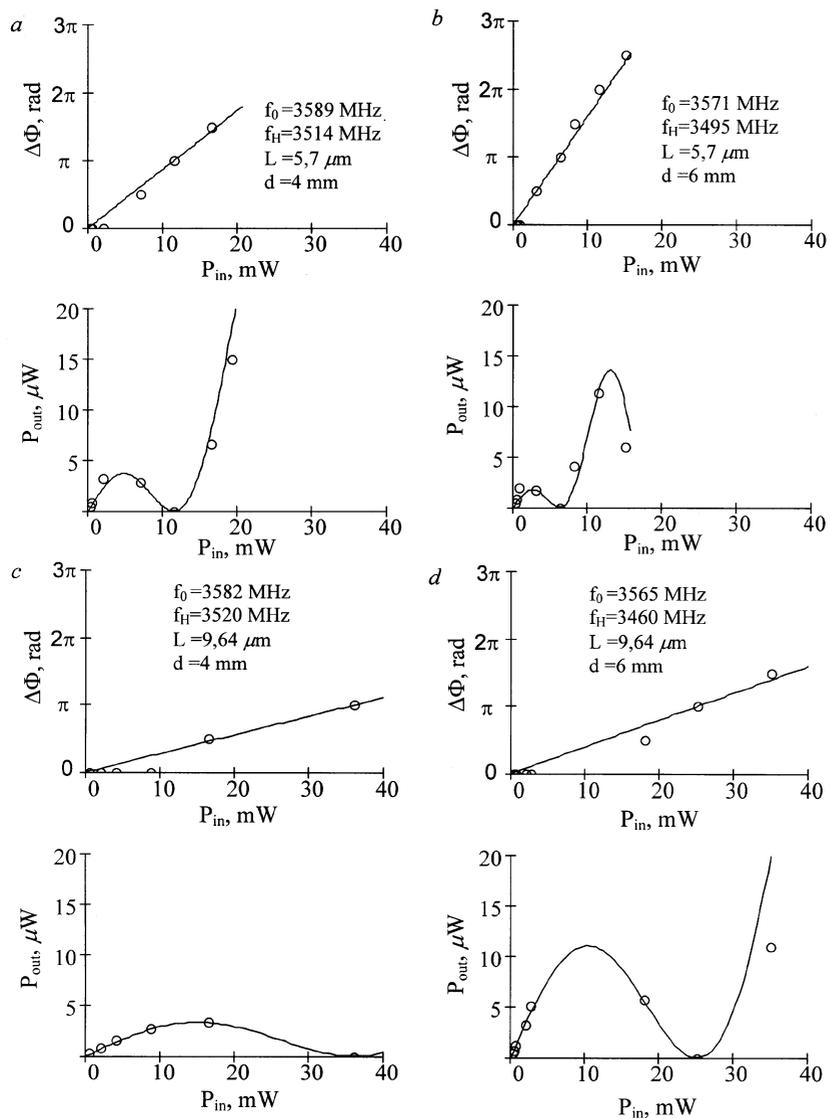
галлиевого граната (3). Пленки железо-иттриевого граната помещались непосредственно на микрополосковые антенны спиновых волн и фиксировались. Фазовращатели находились в постоянном магнитном поле электромагнита. Направление поля можно было изменять.

В эксперименте использовались фазовращатели с расстояниями между антеннами спиновых волн  $d$ , равными 4 и 6 мм, изготовленные на основе двух монокристаллических пленок железо-иттриевого граната с толщинами  $L$ , равными 5.7 и 9.64  $\mu\text{m}$ . Измерения проводились для трех наиболее часто используемых на практике типов спиновых волн: прямых объемных, обратных объемных и поверхностных.

В основе работы нелинейного интерферометра лежат процессы интерференции и нелинейного сдвига собственных частот интенсивных спиновых волн при изменении их амплитуды. Нелинейный сдвиг собственных частот происходит за счет уменьшения постоянной составляющей намагниченности при увеличении переменной составляющей. При работе на определенной частоте вызываемое уменьшением постоянной намагниченности смещение дисперсионной кривой ведет к изменению волнового числа спиновой волны, а следовательно, и ее фазы на выходе фазовращателя. Таким образом, изменение уровня входной мощности приводит к изменению разности фаз сигналов, прошедших разные плечи нелинейного интерферометра.

При помощи переменного аттенюатора легко изменять соотношение амплитуд сигналов, приходящих с обоих плеч на выход интерферометра. Если величину ослабления аттенюатора выбрать такой, при которой сигналы с обоих плеч приходят на выход с одинаковыми амплитудами, то в случае сложения этих колебаний в противофазе на выходе интерферометра можно получить нулевой сигнал.

Исследования показали, что, как и следует из простых физических соображений, наибольшую чувствительность к величине мощности входного сигнала имел нелинейный интерферометр, в котором использовался фазовращатель на прямых объемных спиновых волнах. На верхних графиках рисунков 2,  $a-d$  изображены зависимости изменения разности фаз сигналов  $\Delta\Phi$  от мощности входного СВЧ сигнала интерферометра  $P_{in}$ , а на нижних — зависимости выходной мощности интерферометра  $P_{out}$  от входной мощности  $P_{in}$ . Точками показаны результаты эксперимента, а линиями — результаты численного моделирования. Моделирование теоретических характеристик проводилось с помощью закона дисперсии прямых объемных спиновых волн [2], из которого



**Рис. 2.** Характеристики нелинейного интерферометра. Экспериментальные результаты показаны точками, теоретические — линиями.

было получено выражение, описывающее изменение волнового числа спиновой волны  $\Delta k$  при увеличении ее амплитуды. Используя это выражение, рассчитывали зависимость  $\Delta\Phi$  от квадрата нормированной амплитуды спиновой волны, который пропорционален СВЧ мощности. В расчетах было учтено, что по мере распространения спиновой волны вследствие релаксации уменьшается ее амплитуда и, следовательно, величина результирующего сдвига фазы  $\Delta\Phi$  является интегральной характеристикой.

Для сопоставления теории с экспериментом были введены два подгоночных параметра. В качестве таких параметров использовались коэффициенты пропорциональности между СВЧ мощностью и квадратом нормированной амплитуды спиновой волны на входе и на выходе интерферометра. Названные параметры (ниже они обозначены соответственно  $\zeta$  и  $\xi$ ) оказались равными:  $\zeta = 2.6$  и  $\xi = 8.7 \cdot 10^{-3}$  для эксперимента рис. 2, *a*;  $\zeta = 1.6$  и  $\xi = 10.9 \cdot 10^{-3}$  для эксперимента рис. 2, *b*;  $\zeta = 6.2$  и  $\xi = 2.9 \cdot 10^{-3}$  для эксперимента рис. 2, *c*;  $\zeta = 5.4$  и  $\xi = 21.5 \cdot 10^{-3}$  для эксперимента рис. 2, *d*. Как видно из рисунков, для названных величин подгоночных параметров результаты эксперимента и теоретического расчета находятся в хорошем соответствии. При этом входная СВЧ мощность, для которой достигается изменение разности фаз на  $180^\circ$ , варьируется от единиц до десятков милливольт в зависимости от конструктивных параметров нелинейного интерферометра.

Анализ полученных характеристик показывает, что при увеличении толщины пленки наклон характеристики  $\Delta\Phi(P_{in})$  уменьшается. Это объясняется тем, что спиновые волны, распространяющиеся в более толстых пленках, имеют более высокую групповую скорость. Поэтому при одинаковом нелинейном сдвиге частоты волновой вектор спиновой волны в толстой пленке претерпевает меньшее изменение, чем в тонкой. При увеличении расстояния между преобразователями наклон характеристики изменения разности фаз в зависимости от входной мощности  $\Delta\Phi(P_{in})$  увеличивается. Это легко понять, так как в пренебрежении затуханием изменение фазового набега спиновой волны равно  $\Delta\Phi = d \cdot \Delta k$ . Графики, приведенные на рис. 2, показывают, что при величине входного СВЧ сигнала, соответствующей изменению фазового набега на  $180^\circ$ , величина СВЧ сигнала на выходе интерферометра равна нулю. Иными словами, в этом случае происходит полное подавление входного сигнала интерферометра.

Из проведенного исследования следует, что, выбирая рабочую точку и подбирая конструктивные параметры спин-волнового фазовращателя, нетрудно получать различные типы передаточных характеристик. Таким образом, нелинейный спин-волновой интерферометр может найти различные области применения. В качестве примеров можно назвать ограничитель мощности, а также шумоподавитель.

## Список литературы

- [1] *Adam J.D., Back D.M., Bandara K.M.S.V.* et al. Physics of thin films. Thin films for advanced electronics devices. Academic Press Inc., 1991.
- [2] *Баруздин С.А., Егоров Ю.В., Калиникос Б.А.* и др. Функциональные устройства обработки сигналов (основы теории и алгоритмы). М.: Радио и связь. 1997. 288 с.
- [3] *Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В.* Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.
- [4] *Fetisov Y.K., Patton C.E.* // IEEE Trans. on Magnetics. 1999. V. 35. N 2. P. 1024–1036.