

09

## **Амплитудно-частотная характеристика нелинейного спин-волнового интерферометра в квазинелинейном режиме работы**

© А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет „ЛЭТИ“  
E-mail: spinlab@eltech.ru

*Поступило в Редакцию 7 декабря 2005 г.*

Экспериментально исследован нелинейный пленочный сверхвысокочастотный интерферометр на спиновых волнах. Впервые введено понятие квазинелинейного режима работы интерферометра. Экспериментально установлены границы квазинелинейного динамического диапазона устройства. Показано, что для нелинейного интерферометра в квазинелинейном режиме работы, как и для линейных приборов, применимо понятие амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Однако в отличие от линейных приборов увеличение уровня мощности на входе нелинейного интерферометра в пределах квазинелинейного динамического диапазона приводит к частотному смещению АЧХ устройства. По величине смещения АЧХ установлено, что изменение разности фаз интерферирующих сигналов на 180 градусов на каждой выделенной частоте достигается при увеличении входной мощности в пределах квазинелинейного динамического диапазона. Это показывает возможность практического применения нелинейного интерферометра для обработки СВЧ сигналов без нежелательного искажения их формы.

PACS: 84.40.-x

Устройства обработки сигналов, в основе принципа действия которых лежит явление интерференции волн, получили достаточно широкое распространение в интегральной оптике. Одним из таких устройств является интерферометр Маха–Цендера [1,2]. Он имеет конструкцию в виде мостовой схемы, состоящей из двух плеч. Одно плечо или оба плеча интерферометра содержат элементы, управляющие фазовыми набегам сигнала. Если характеристики этих элементов не зависят от

мощности обрабатываемого сигнала, а фазовый набег сигнала изменяется за счет приложения внешнего воздействия к элементу, то такой интерферометр называют линейным. Если же фазовый набег сигнала изменяется при изменении мощности этого сигнала без приложения внешнего воздействия к элементу, то такой интерферометр называют нелинейным.

Сравнительно недавно было показано, что устройства, подобные интерферометру Маха–Цендера, можно создать и в сверхвысокочастотной (СВЧ) технике. Так, линейный СВЧ интерферометр на магнитостатических спиновых волнах был описан в работе [3]. На его основе была сконструирована бистабильная система, которая могла находиться в одном из двух устойчивых состояний, отличающихся уровнем поглощенной мощности. Еще один линейный интерферометр был описан в работе [4]. Он был использован в качестве устройства для экспериментального определения дисперсии спиновых волн, распространяющихся в ферромагнитных пленках.

Динамический диапазон линейного спин-волнового интерферометра сверху ограничен мощностью, при которой возникают параметрические нелинейные процессы — трехволновые и четырехволновые. Трехволновые процессы имеют более низкий порог возникновения по сравнению с четырехволновыми процессами. Однако трехволновые процессы могут быть запрещены законами сохранения энергии и импульса. В этом случае в работе интерферометра определяющую роль играют нелинейные четырехволновые процессы.

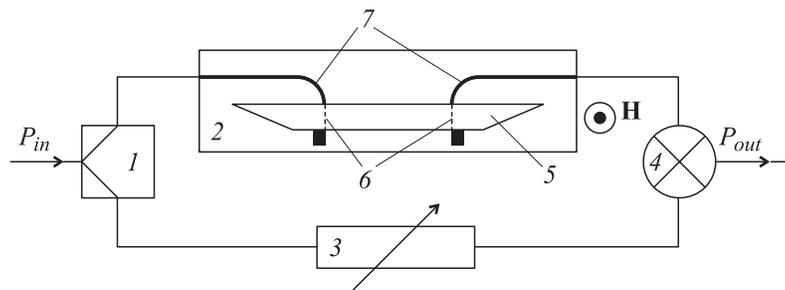
Нелинейные четырехволновые процессы, возникающие при распространении спиновых волн в ферромагнитных пленках, можно разделить на две группы. К первой группе относятся такие процессы, при которых не возникает обогащения спектра СВЧ сигнала, переносимого спиновой волной. К таким процессам относятся нелинейное затухание спиновых волн [5] и нелинейный сдвиг собственных частот (волновых чисел) спиновых волн [6]. Ко второй группе относятся такие четырехволновые процессы, при которых возникает обогащение спектра СВЧ сигнала, переносимого спиновыми волнами. Типичным примером такого процесса является модуляционная неустойчивость спиновых волн [7]. Модуляционная неустойчивость может проявляться, например, следующим образом. Если на вход спин-волнового прибора подавать СВЧ сигнал постоянной амплитуды, то сигнал на его выходе оказывается промодулированным по амплитуде.

Из проведенных нами ранее исследований [8–10] следует, что четырехволновые нелинейные процессы, относящиеся к первой группе, возникают при более низких уровнях мощности СВЧ сигнала, чем процессы второй группы. Спиновые волны, имеющие мощность, при которой наблюдаются процессы первой группы, часто называют интенсивными. Спиновые волны, имеющие мощность, при которой наблюдаются процессы второй группы, часто называют нелинейными. Таким образом, интенсивные спиновые волны по уровню мощности занимают промежуточное положение между линейными и нелинейными волнами.

Из вышесказанного ясно, что увеличение мощности на входе спин-волнового интерферометра приводит к тому, что устройство сначала переходит в режим работы, которому мы дали название „квазинелинейный“. При дальнейшем увеличении входной мощности устройство переходит в нестабильный нелинейный режим работы. В таком режиме обрабатываемый сигнал может приобретать нежелательные искажения. Термин „квазинелинейный режим“ работы был выбран нами потому, что при таком режиме нелинейный процесс (которым является нелинейный сдвиг волновых чисел спиновых волн) уже существует, а обогащения спектра сигнала еще не происходит. Для описания нелинейного прибора, работающего в таком режиме, можно использовать те же понятия и характеристики, что и для линейных приборов.

Целью настоящей работы являлось определение квазинелинейного динамического диапазона нелинейного СВЧ интерферометра, а также исследование амплитудно-частотных характеристик устройства при различных уровнях входного сигнала, лежащих в пределах квазинелинейного динамического диапазона.

Экспериментальные исследования были проведены на макете нелинейного интерферометра, схема которого представлена на рис. 1. Макет состоял из делителя мощности 1, нелинейного спин-волнового фазовращателя 2, переменного аттенюатора 3 и сумматора 4. Нелинейный фазовращатель был изготовлен на основе монокристаллической пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) 5 толщиной  $5.7\ \mu\text{m}$ , эпитаксиально выращенной на подложке гадолиний-галлиевого граната толщиной  $500\ \mu\text{m}$ . Намагниченность насыщения пленки ЖИГ составляла  $1750\ \text{Gs}$ . Для возбуждения и приема спиновых волн использовались входная и выходная микрополосковые антенны 6 шириной  $50\ \mu\text{m}$  и длиной  $2\ \text{mm}$ . Один из концов каждой антенны был заземлен. Расстояние между

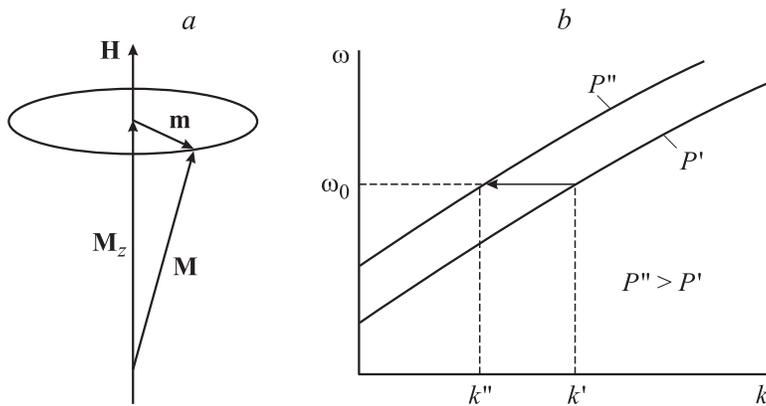


**Рис. 1.** Блок-схема нелинейного интерферометра на спиновых волнах.

антеннами составляло 6 mm. Подвод СВЧ мощности к входной антенне, а также отвод СВЧ мощности от выходной антенны осуществлялись микрополосковыми линиями передачи 7 с волновым сопротивлением 50  $\Omega$ . Описанная микрополосковая структура была напылена на подложку из поликора толщиной 500  $\mu\text{m}$ . Пленка ЖИГ располагалась на антеннах спиновых волн, находясь в непосредственном контакте с ними, как показано на рис. 1. Фазовращатель был помещен между полюсами электромагнита в однородном магнитном поле напряженностью 2953 Oe. Это поле подмагничивания было направлено по нормали к плоскости пленки. При такой ориентации магнитного поля в пленке распространялись так называемые прямые объемные спиновые волны. Как известно, фазовый набег этих волн обладает наибольшей чувствительностью к величине переносимой мощности по сравнению с другими типами спиновых волн. Величину ослабления СВЧ сигнала в переменном аттенуаторе 3 устанавливали такой, чтобы интерферирующие сигналы имели практически равные амплитуды.

Принцип действия интерферометра в квазинелинейном режиме работы основан на явлениях интерференции и нелинейного сдвига волнового числа спиновой волны (рис. 1). Последнее явление возникает при увеличении мощности спиновой волны, распространяющейся в пленочном фазовращателе.

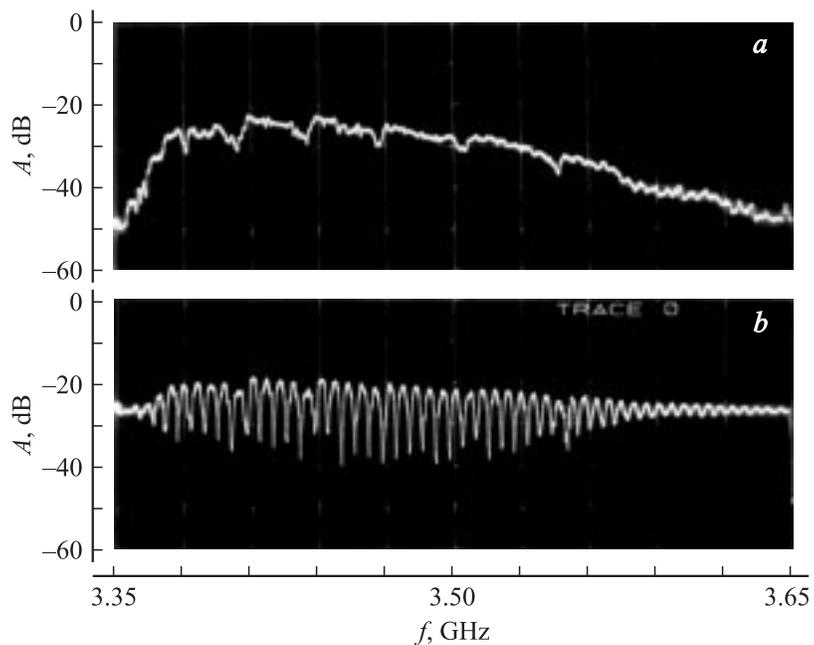
Как известно [6], увеличение мощности спиновой волны, которая пропорциональна квадрату ее амплитуды  $m$ , приводит к уменьшению постоянной составляющей намагниченности пленки  $M_z$ . Этот эффект качественно показан на рис. 2, *a*. Уменьшение  $M_z$  вызывает смещение дисперсионной кривой спиновых волн (рис. 2, *b*). При работе на



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

фиксированной частоте смещение дисперсионной кривой приводит к возникновению нелинейного сдвига волнового числа спиновой волны, а следовательно, и ее фазового набега.

Первая серия экспериментов была проведена при низком уровне мощности СВЧ сигнала ( $-10$  dBm), подававшегося на вход интерферометра. При такой входной мощности спиновые волны в фазовращателе распространялись в линейном режиме. На начальном этапе экспериментов были проведены измерения амплитудно-частотной характеристики плеча интерферометра, которое содержало нелинейный фазовращатель (рис. 3, а). Измерения проводились при разорванном другом плече интерферометра. Чтобы избежать отражения СВЧ сигнала, к краям разорванного плеча присоединялись согласованные нагрузки. Из рис. 3, а видно, что ослабление СВЧ сигнала в плече с фазовращателем зависело от частоты. На приведенной амплитудно-частотной характеристике можно выделить интервал частот от 3.38 до 3.53 GHz, в котором ослабление СВЧ сигнала отличалось менее чем на  $\pm 3$  dB от среднего значения ослабления, которое составляло приблизительно  $-27$  dB. Поэтому в названном частотном интервале представлялось возможным получение наиболее ярко выраженной интерференции СВЧ сигналов, прошедших разные плечи интерферометра. На следующем этапе экспериментов разорванное плечо интерферометра замыкалось переменным аттенюатором. Ослабление СВЧ сигнала в аттенюаторе настраивалось



**Рис. 3.** Амплитудно-частотная характеристика плеча интерферометра, содержащего нелинейный фазовращатель (*a*). Амплитудно-частотная характеристика интерферометра (*b*).

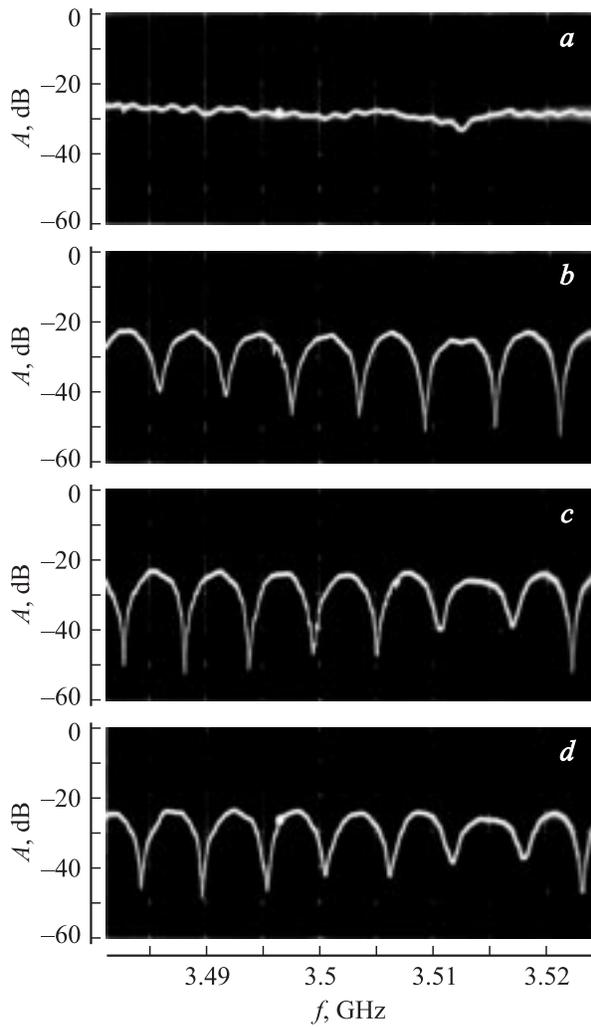
на уровень приблизительно  $-27$  dB, чтобы интерферирующие сигналы в названном частотном диапазоне имели примерно одинаковую мощность. При этом наблюдаемая АЧХ нелинейного интерферометра приобретала вид, показанный на рис. 3, *b*.

Формирование АЧХ спин-волнового интерферометра можно объяснить следующим образом. Фазовый набег СВЧ сигнала в плече с фазовращателем определяется в основном фазовым набегом спиновых волн в пленке ЖИГ и поэтому зависит от частоты. Зависимостью фазового набега СВЧ сигнала в плече с переменным аттенуатором можно пренебречь. Таким образом, при изменении частоты входного сигнала изменяется разность фаз  $\Delta\varphi$  интерферирующих сигналов, что приводит к АЧХ в виде последовательно чередующихся максимумов и минимумов.

Вторая серия экспериментов по исследованию АЧХ нелинейного спин-волнового интерферометра проводилась при последовательном увеличении уровня мощности входного СВЧ сигнала до тех пор, пока не возникала модуляционная неустойчивость спиновых волн. Иными словами, амплитудно-частотные характеристики устройства сначала измерялись при уровнях мощности входного СВЧ сигнала, соответствовавших линейному режиму работы интерферометра (в этом случае в пленке ЖИГ распространялись линейные спиновые волны), а потом — при уровнях мощности, соответствовавших квазинелинейному режиму работы интерферометра (в этом случае в пленке ЖИГ распространялись сравнительно интенсивные спиновые волны).

Проведенные измерения показали, что при мощностях входного сигнала, лежащих в пределах от  $-10$  до  $-2$  dBm, АЧХ нелинейного интерферометра сохраняла неизменный вид. Следовательно, такой диапазон мощностей соответствовал линейному режиму работы устройства. Дальнейшее увеличение мощности входного сигнала приводило к смещению АЧХ нелинейного интерферометра в сторону возрастания частоты. Иными словами, при мощностях выше  $-2$  dBm интерферометр начинал работать в квазинелинейном режиме. При достижении входной мощностью значения около  $+6$  dBm минимумы АЧХ интерферометра смещались так, что занимали частотные положения максимумов, наблюдавшихся при низком уровне мощности. Это означало, что разность фаз интерферирующих сигналов изменилась на  $180^\circ$ . Модуляционная неустойчивость спиновых волн возникала при величине входной мощности, равной  $+8$  dBm. Такая мощность соответствовала верхней границе квазинелинейного динамического диапазона нелинейного интерферометра.

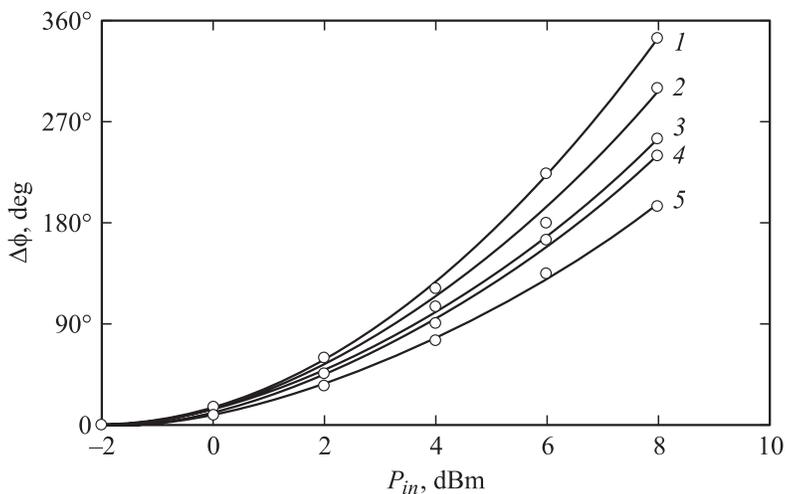
Смещение АЧХ нелинейного интерферометра при увеличении входной мощности объясняется следующим образом. Как было описано выше, увеличение мощности спиновых волн вызывает уменьшение постоянной составляющей намагниченности ферромагнитной пленки и нелинейный сдвиг волновых чисел спиновых волн (рис. 2). Изменение фазового набега интенсивных спиновых волн в фазовращателе приводит к тому, что разность фаз интерферирующих сигналов на каждой частоте зависит от входной мощности нелинейного интерферометра. Следовательно, при увеличении мощности входного сигнала интерферометра смещаются частоты, на которых происходит синфазное и противфазное сложение СВЧ сигналов, прошедших разные его плечи.



**Рис. 4.** Фрагмент амплитудно-частотной характеристики плеча интерферометра, содержащего нелинейный фазовращатель, измеренный при входной мощности  $-5$  dBm (*a*). Фрагменты амплитудно-частотных характеристик нелинейного интерферометра, измеренные при входных мощностях  $-5$  dBm (*b*),  $+5$  dBm (*c*) и  $+6$  dBm (*d*).

Фрагменты амплитудно-частотных характеристик нелинейного интерферометра, измеренные при уровнях мощности  $-5$ ,  $+5$  и  $+6$  dBm, приведены на рис. 4. На том же рисунке показана АЧХ плеча с фазовращателем. Анализ характеристик показывает, что непостоянство ослабления сигнала в фазовращателе приводит к тому, что провалы на АЧХ интерферометра имеют разную глубину. Также необходимо отметить то, что при увеличении мощности наблюдались изменения глубины провалов на АЧХ интерферометра. Очевидно, что эти изменения были связаны с возникновением нелинейного затухания спиновых волн в пленке ЖИГ [5], которое приводило к увеличению ослабления СВЧ сигнала в нелинейном фазовращателе.

На основе полученных экспериментальных данных были построены графики зависимости изменения разности фаз  $\Delta\varphi$  интерферирующих сигналов от мощности входного СВЧ сигнала нелинейного интерферометра, которые приведены на рис. 5. На графиках экспериментальные данные показаны точками, а результат их аппроксимации методом наименьших квадратов показан линиями. Из графиков ясно, что ква-



**Рис. 5.** Зависимости изменения разности фаз интерферирующих сигналов от мощности входного СВЧ сигнала нелинейного интерферометра, полученные на следующих частотах: 1 — 3491.75 МГц, 2 — 3497.5 МГц, 3 — 3503.5 МГц, 4 — 3509.25 МГц, 5 — 3521 МГц.

зигнелинейный динамический диапазон исследованного интерферометра лежал в пределах от  $-2$  до  $+8$  dBm. Кроме того, в пределах этого диапазона разность фаз  $\Delta\varphi$  возрастала с увеличением мощности и достигала значений более 180 градусов.

Обращает на себя внимание то, что  $\Delta\varphi$  зависит от частоты (волнового числа) СВЧ сигнала. На характеристиках, приведенных на рис. 4, это проявляется в том, что минимумы АЧХ нелинейного интерферометра смещаются на разное расстояние по частоте. С позиций физики это означает, что величина нелинейного фазового сдвига интенсивных спиновых волн зависит от частоты.

В заключение сформулируем основные результаты работы.

1. Квазинелинейный динамический диапазон исследованного нелинейного спин-волнового интерферометра лежит в пределах от  $-2$  до  $+8$  dBm. При превышении этой мощности возникает модуляционная неустойчивость спиновых волн, которая может приводить к паразитному искажению формы огибающей обрабатываемого сигнала.

2. В пределах квазинелинейного динамического диапазона нелинейного интерферометра увеличение мощности входного сигнала приводит к смещению вверх по частоте его амплитудно-частотной характеристики, имеющей вид чередующихся максимумов и минимумов. При этом минимумы занимают частотные положения максимумов при входных мощностях около 6 dBm. Это означает, что в таком режиме функционирования нелинейный интерферометр может использоваться для обработки непрерывных или импульсных СВЧ сигналов без нежелательного искажения их формы.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 05-02-17714), Министерства образования Российской Федерации (проект 1292), Международного научно-технического центра (проект 2616), научной программы „Университеты России“ (проект УР.01.01.360) и Metamorphose Network of Excellence project (The 6th Framework Programme).

## Список литературы

- [1] Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.
- [2] Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics. San Diego: Academic Press, 1995. P. 592.

- [3] *Fetisov Y.K., Patton C.E.* // IEEE Trans. on Magnetics. 1999. V. 35. N 2. P. 1024–1036.
- [4] *Огрин Ю.Ф., Луговской А.В., Темирязов А.Г.* // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 8. С. 1664–1666.
- [5] *Scott M.M., Patton C.E., Kostylev M.P., Kalinikos B.A.* // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. N 11. P. 6294–6301.
- [6] *Tsankov M.A., Chen M., Patton C.E.* // J. Appl. Phys. 1996. V. 79. P. 1595–1604.
- [7] *Калиникос Б.А., Ковшиков Н.С., Славин А.Н.* // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. В. 2. С. 159–176.
- [8] *Устинов А.Б., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 10. С. 20–25.
- [9] *Устинов А.Б., Калиникос Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 14. С. 66–73.
- [10] *Ustinov A.B.* // Abstracts of the 2003 IEEE INTERMAG Conference. Boston (Massachusetts), 2003. P. HD-10.