

09;12

## **Подавление импульсных сверхвысокочастотных сигналов в нелинейном спин-волновом интерферометре**

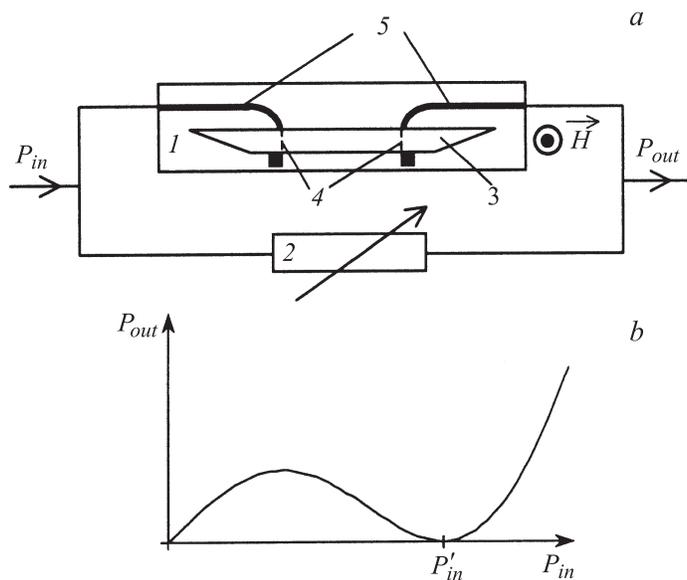
© А.Б. Устинов, Б.А. Калиникос

С.-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“  
E-mail: eivt@eltech.ru

*Поступило в Редакцию 7 февраля 2003 г.*

Впервые исследовано подавление импульсных радиосигналов десятисантиметрового диапазона сверхвысоких частот в нелинейном спин-волновом интерферометре, который содержал в качестве нелинейного элемента спин-волновой фазовращатель, изготовленный на основе пленки железо-иттриевого граната. Показано, что сигнал, имеющий вид периодической последовательности прямоугольных сверхвысокочастотных импульсов мощностью до 2.5 мВт, проходит через нелинейный интерферометр без искажения формы, а увеличение мощности импульсов до 13.8 мВт приводит к практически полному их подавлению.

На протяжении целого ряда последних лет существует устойчивый интерес к исследованию волноводных интегрально-оптических интерферометров Маха–Цендера и к их применению для обработки как аналоговых, так и цифровых оптических сигналов (см., например, [1,2]). Такие интерферометры имеют вид двухплечевой схемы и выполняются на основе Y-образных разветвителей и соединителей канальных или полосковых оптических волноводов, а также элементов, с помощью которых можно управлять фазовыми набегами волн в плечах интерферометра. Вместе с тем только недавно был проявлен интерес к разработке сверхвысокочастотных (СВЧ) интерферометров, имеющих подобную схему [3,4]. В работе [3] был описан линейный СВЧ интерферометр на магнитостатических спиновых волнах, который благодаря наличию цепи внешней обратной связи обладал бистабильными передаточными характеристиками. В работе [4] нами была продемонстрирована возможность создания нелинейных СВЧ интерферометров



**Рис. 1.** Блок-схема нелинейного спин-волнового интерферометра (а) и его передаточная характеристика (b).

с применением магнитоэлектрических спиновых волн, а также приведены результаты исследования их передаточных характеристик, измеренных при непрерывном входном СВЧ сигнале.

В основе работы нелинейного спин-волнового интерферометра (рис. 1, а) лежат явления нелинейного сдвига собственных волновых чисел и интерференции интенсивных спиновых волн, происходящие с увеличением их амплитуды. Сверхвысокочастотный сигнал, подающийся на вход устройства, делится на два сигнала. Эти сигналы проходят разные плечи нелинейного интерферометра, приобретают разные фазовые набег, а затем складываются и интерферируют. Приобретаемые фазовые набег при увеличении мощности входного сигнала изменяются, и, следовательно, изменяется разность фаз интерферирующих сигналов, которая определяет уровень выходного сигнала нелинейного интерферометра. Потому передаточные характеристики нелинейного спин-волнового интерферометра для непрерывного вход-

ного СВЧ сигнала имеют вид, представленный на рис. 1, *b*. Из рисунка видно, что непрерывный СВЧ сигнал в нелинейном интерферометре полностью подавляется, когда его мощность достигает определенного значения  $P'_{in}$ , при котором разность фаз сигналов, прошедших разные плечи интерферометра, становится равной  $180^\circ$ .

Для изучения возможностей обработки цифровых СВЧ сигналов представляет интерес исследование нелинейного интерферометра в импульсном режиме работы, в котором радиоимпульсы сравнительно высокой мощности подавляются, а радиоимпульсы низкой мощности проходят через устройство без искажения формы. Целью настоящей работы являлось исследование подавления в нелинейном спин-волновом интерферометре сигналов, представлявших собой последовательность прямоугольных СВЧ импульсов.

Экспериментальный макет нелинейного интерферометра представлял собой мостовую схему, состоявшую из двух плеч (рис. 1, *a*). Одно плечо содержало нелинейный спин-волновой фазовращатель (1), а другое — переменный аттенюатор (2). Нелинейный фазовращатель был изготовлен на основе монокристаллической пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной  $5.7\ \mu\text{m}$  (3), намагниченностью насыщения  $1750\ \text{Gs}$ , эпитаксиально выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната. Для возбуждения спиновых волн в пленке ЖИГ, а также для их приема использовались короткозамкнутые на концах микрополосковые антенны (4) шириной  $50\ \mu\text{m}$  и длиной  $2\ \text{mm}$ , напыленные на поликоровую подложку толщиной  $0.5\ \text{mm}$ . Расстояние между антеннами составляло  $6\ \text{mm}$ . Подвод СВЧ мощности к антеннам спиновых волн осуществлялся микрополосковыми линиями передачи (5) с волновым сопротивлением  $50\ \Omega$ . Пленка ЖИГ была расположена над антеннами спиновых волн и находилась в непосредственном контакте с ними. Фазовращатель находился в постоянном поле электромагнитной напряженностью  $2963\ \text{Oe}$ , которое было направлено перпендикулярно плоскости пленки. Такая ориентация поля соответствовала возбуждению в пленке ЖИГ прямых объемных спиновых волн, которые обладают наибольшей чувствительностью их фазового набегу к величине входного сигнала по сравнению с обратными объемными и поверхностными спиновыми волнами. Ослабление переменного аттенюатора выбирали таким, чтобы интерферирующие сигналы имели одинаковые амплитуды.

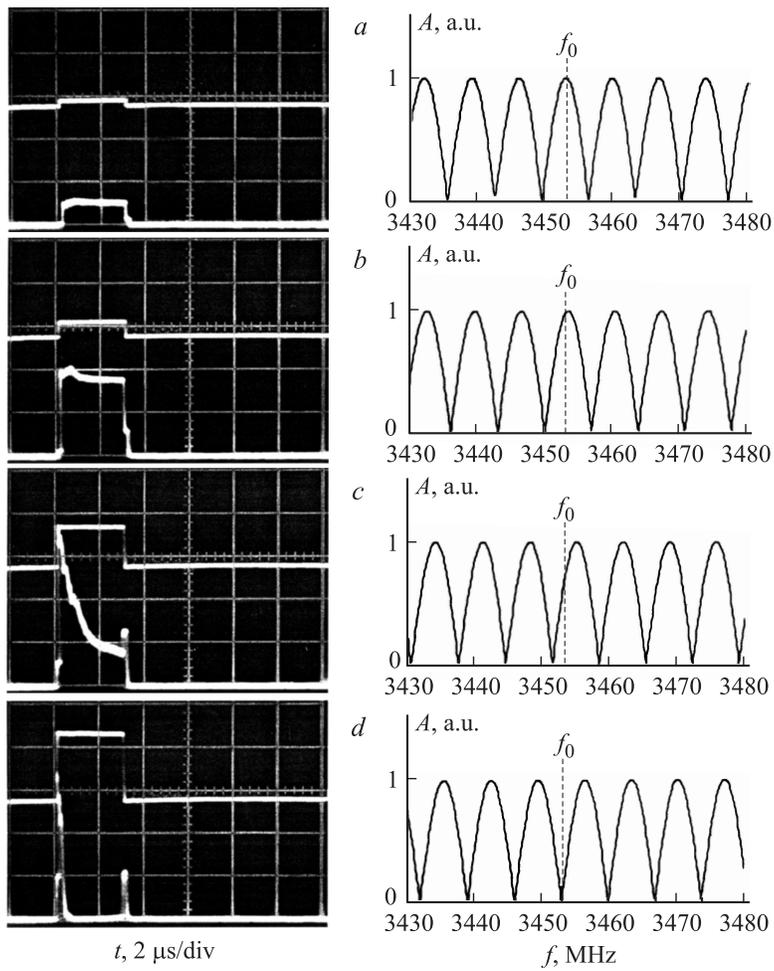
Сигнал в виде периодической последовательности прямоугольных СВЧ импульсов на несущей частоте  $f_0 = 3453\ \text{MHz}$  подавался на

вход нелинейного интерферометра. Период следования импульсов был равен  $100 \mu\text{s}$ . Часть мощности входного сигнала ответвлялась направленным ответвителем (с величиной ослабления 20 dB) и после детектирования подавалась на первый канал осциллографа. На второй канал осциллографа подавался детектированный сигнал с выхода нелинейного интерферометра. Описанная экспериментальная установка позволяла легко наблюдать за изменениями формы огибающей выходных СВЧ импульсов при изменении мощности входных СВЧ импульсов.

Подавление в нелинейном интерферометре импульсного СВЧ сигнала при увеличении его мощности иллюстрируют осциллограммы, приведенные на рисунках 2, *a–d* слева. На каждом из рисунков верхняя осциллограмма соответствует огибающей входного СВЧ сигнала, а нижняя — огибающей выходного СВЧ сигнала. Отметим, что усиление в каналах двухлучевого осциллографа, с экрана которого были сняты осциллограммы, было разным: для нижней осциллограммы оно было больше, чем для верхней. Из осциллограмм видно, что входные СВЧ импульсы низкой мощности (приблизительно до 2.5 mW) проходили на выход интерферометра практически без искажения своей формы (рис. 2, *a* и *b*). Увеличение мощности входных СВЧ импульсов приводило к возникновению нелинейного сдвига волновых чисел несущих спиновых волн, вследствие чего выходные импульсы частично подавлялись (рис. 2, *c*). При достижении мощности входных СВЧ импульсов значения 13.8 mW выходные импульсы подавлялись практически полностью (рис. 2, *d*).

Наблюдавшееся подавление СВЧ импульсов при увеличении их мощности достаточно просто объяснить, если рассмотреть амплитудно-частотную характеристику исследованного нелинейного интерферометра. Эта характеристика была численно промоделирована с использованием формулы сложения двух колебаний, закона дисперсии прямых объемных спиновых волн, а также формулы для расчета нелинейного фазового набега спиновых волн. Отметим, что нелинейный фазовый набег рассчитывался с учетом затухания спиновых волн при их распространении в пленке ЖИГ.

Амплитудно-частотные характеристики, численно рассчитанные для разных мощностей входных СВЧ импульсов, изображены на рис. 2, *a–d* справа. Они имеют вид последовательно чередующихся максимумов и минимумов на тех частотах, на которых соответственно происходит синфазное и противофазное сложение интерферирующих сигналов. Как видно из рис. 2, *a*, максимум амплитудно-частотной характеристики



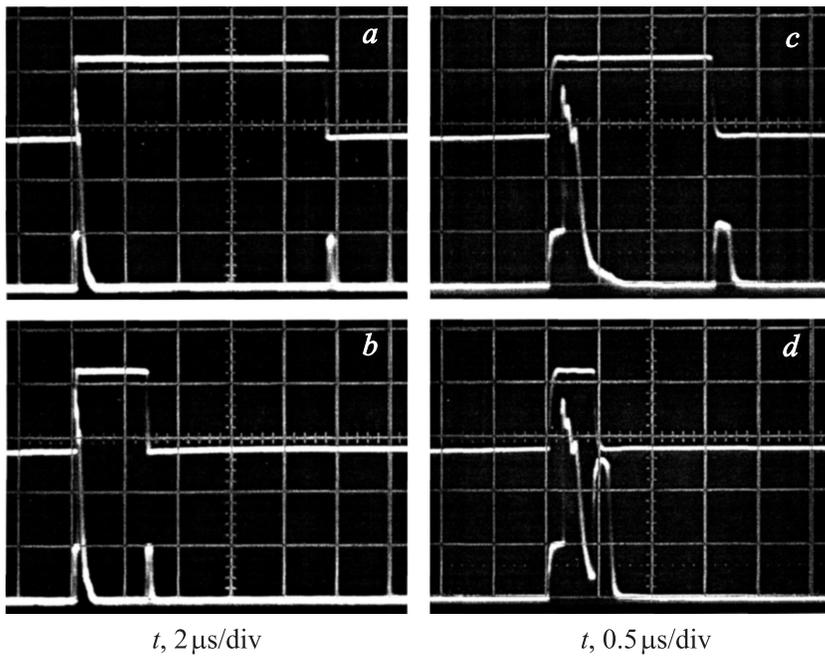
**Рис. 2.** Огибающие импульсного сигнала на входе (верхние осциллограммы) и выходе (нижние осциллограммы) экспериментального макета нелинейного интерферометра. Слева показаны осциллограммы, снятые при мощностях входных импульсов, равных 0.7 мВт (а), 2.6 мВт (б), 8 мВт (в), 13.8 мВт (д); справа показаны теоретически рассчитанные амплитудно-частотные характеристики нелинейного интерферометра, которые он имеет при перечисленных мощностях.

нелинейного интерферометра при низкой мощности входных СВЧ импульсов находится на частоте  $f_0$  — несущей частоте импульсов. Увеличение мощности входных СВЧ импульсов приводит к смещению амплитудно-частотной характеристики в сторону возрастания частоты за счет явления нелинейного сдвига спектра спиновых волн  $\omega(k)$ , возникающего при увеличении их амплитуды. При достижении мощности входных СВЧ импульсов значения 13.8 mW амплитудно-частотная характеристика смещается так, что на частоте  $f_0$  ее значение становится равным нулю (рис. 2, *d*). В этой ситуации входные СВЧ импульсы практически полностью подавляются.

С помощью рис. 2, *d* нетрудно сделать вывод о возможностях подавления импульсных СВЧ сигналов в нелинейном интерферометре: если ширина основного лепестка частотного спектра импульсного СВЧ сигнала меньше, чем разность частот между соседними максимумами амплитудно-частотной характеристики, то такие сигналы в нелинейном интерферометре эффективно подавляются. На осциллограммах рис. 2 длительность СВЧ импульсов равна  $3 \mu\text{s}$ . Следовательно, ширина основного лепестка спектра сигнала была много меньше разности частот между максимумами амплитудно-частотной характеристики нелинейного интерферометра, составлявшей около 7 МГц. Поэтому, как показано на рис. 2, *d*, входной импульс такой длительности практически полностью подавлялся.

На краях подавленных СВЧ импульсов наблюдались короткие пики. Формирование как переднего, так и заднего пиков было обусловлено разным временем распространения сигналов в различных плечах интерферометра. Это подтвердил численный расчет времени задержки сигнала в нелинейном спин-волновом фазовращателе. В формирование переднего пика дополнительный вклад вносил процесс развития нелинейности спиновых волн, что выражалось в дополнительном всплеске мощности первого пика. Отсутствие влияния на формирование этих пиков дисперсионного расплывания входных СВЧ импульсов подтвердили эксперименты по подавлению СВЧ импульсов различных длительностей, результаты которых приведены на рис. 3, *a–d*. Как видно из этих рисунков, форма и длительность пиков на краях подавленных импульсов оставались неизменными при изменении длительностей входных СВЧ импульсов от 10 до  $0.5 \mu\text{s}$ .

Из рис. 3, *d* видно, что при уменьшении длительности входных импульсов до  $0.5 \mu\text{s}$  передний и задний пики начинали сливаться.



**Рис. 3.** Подавление СВЧ импульсов различной длительности.

Дальнейшее уменьшение длительности входных импульсов приводило к ситуации, когда на выходе интерферометра наблюдалась последовательность, состоявшая из двух отдельных импульсов, следующих друг за другом с интервалом времени, равным времени задержки сигнала в нелинейном фазовращателе. Таким образом, ситуация, при которой ширина первого лепестка частотного спектра входного сигнала была бы больше, чем разность между соседними максимумами амплитудно-частотной характеристики исследуемого нелинейного интерферометра, была недостижима.

Результаты экспериментов по подавлению импульсов различных длительностей, приведенные на рис. 3, позволили также сделать физически важный вывод о том, что наблюдавшееся подавление СВЧ импульсов в нелинейном интерферометре было обусловлено именно

собственной нелинейностью спиновых волн, распространявшихся в пленке ЖИГ, а не нагревом пленки из-за поглощения СВЧ мощности. Об этом свидетельствует неизменность формы пиков при уменьшении длительности входных импульсов от  $10\ \mu\text{s}$  (которая составляет 0.1 от периода следования импульсов) до  $0.5\ \mu\text{s}$  (которая составляет 0.005 от периода следования импульсов).

Из проведенного исследования следует, что нелинейный спиноволновой пленочный интерферометр обладает способностью эффективно подавлять СВЧ импульсы длительностью более одной микросекунды, мощность которых достигает десятка милливатт, и пропускать СВЧ импульсы, мощность которых менее нескольких милливатт. Таким образом, этот прибор может найти применение, например, во входных цепях радиосистем для подавления сильных импульсных помех.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 02-02-16485 и № 02-02-06771), международной ассоциации ИНТАС (грант INTAS № 99-1812) и Министерства образования Российской Федерации (проект 304.14.52).

## 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] Устинов А.Б., Калиничос Б.А. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 10. С. 20–25.