

05:09

Прохождение двухчастотных сигналов в полосе брэгговского резонанса одномерного магنونного кристалла

© С.В. Гришин, Е.Н. Бегинин, Ю.В. Дулин,
С.А. Никитов, Ю.П. Шараевский

Саратовский государственный университет
Институт радиотехники и электроники РАН, Москва
E-mail: grishfam@sgu.ru

Поступило в Редакцию 28 февраля 2012 г.

Приведены результаты экспериментального исследования прохождения двухчастотного сигнала (большого и малого уровней мощности) через спин-волновую линию передачи с одномерной периодической микроструктурой, сформированной на поверхности ферромагнитной пленки. Эксперименты проводились в условиях трехволновой параметрической неустойчивости спиновых волн. Показано, что вблизи центральной частоты первого брэгговского резонанса при определенных уровнях мощности большого и малого сигналов нелинейная спин-волновая линия передачи может работать либо как ограничитель мощности, либо как усилитель отношения сигнал/шум.

В настоящее время большой интерес вызывают исследования свойств периодических микроструктур на основе ферромагнитных пленок, которые получили название „магنونные кристаллы“ [1–6]. Основной особенностью таких микроструктур является наличие запрещенных зон в полосе возбуждения магнитостатических волн (МСВ), обусловленных брэгговскими резонансами [1]. Спин-волновая линия передачи, выполненная на основе магنونного кристалла, обладает на частотах запрещенной зоны свойствами узкополосного режекторного фильтра, характеристики которого зависят от уровня мощности входного сигнала [3–5]. Кроме того, в [3] было показано, что в условиях четырехволновой параметрической неустойчивости спин-волновая линия передачи на основе магنونного кристалла на разных частотах, находящихся в полосе частот запрещенной зоны, может выполнять функции ограничителя мощности [6,7], усилителя отношения сигнал/шум [7,8], подавителя сильных СВЧ-сигналов и нелинейного фазовращателя [7,9]. В [4,5] при

использовании спин-волновой линии передачи на основе магнетонного кристалла в кольцевой автоколебательной системе для генерации СВЧ-импульсов было показано, что в условиях существования трехволновой параметрической неустойчивости на центральной частоте первой запрещенной зоны зависимость выходной мощности от входной имеет сложный вид. При одних уровнях мощности указанная линия передачи может выполнять функции ограничителя мощности, а при других — усилителя отношения сигнал/шум. Однако представленные в [3–5] результаты были получены в одночастотном режиме.

В то же время для использования нелинейных устройств на МСВ в системах обработки и передачи информации большой интерес представляют исследования, направленные на изучение прохождения через такие устройства сложно модулированных СВЧ-сигналов [10], в том числе и шумовых [11]. В многочастотном режиме нелинейные устройства на МСВ обладают частотной избирательностью, которая связана с влиянием сигнала большого уровня мощности на амплитуду сигнала малого уровня мощности, начиная с некоторой отстройки между сигналами [6–8,10,11]. Величина этой отстройки зависит от уровня мощности большого сигнала, ширины линии спиновых волн и имеет значение порядка десятка мегагерц, что сравнимо с шириной полосы частот запрещенной зоны магнетонного кристалла [3–5].

В данном сообщении приводятся результаты экспериментального исследования амплитудных характеристик нелинейной спин-волновой линии передачи, выполненной на основе одномерного (1D) магнетонного кристалла, в одночастотном и двухчастотном режимах при уровнях мощности СВЧ-сигналов, значительно превышающих порог трехволновой параметрической неустойчивости.

В качестве 1D магнетонного кристалла использовалась пленка железо-иттриевого граната (ЖИГ) с намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 1680$ Gs, шириной 3.5 mm, длиной 10 mm и толщиной 22 μm . На поверхности пленки вдоль ее короткой стороны была вырезана микроструктура в виде параллельных канавок, имеющих длину 3.5 mm, ширину 2.8 μm , глубину 0.2 μm и угол при вершине канавки $\alpha \sim 130^\circ$ [4,5]. Скрайбирование осуществлялось с помощью полуавтомата резки высокопрочных материалов ЭМ-225М, который позволял формировать канавки различной глубины и ширины. Период микроструктуры имел значение 200 μm , а длина всей периодической структуры была 6.2 mm. Для изучения поверхности пленки ЖИГ использовался сканирующий

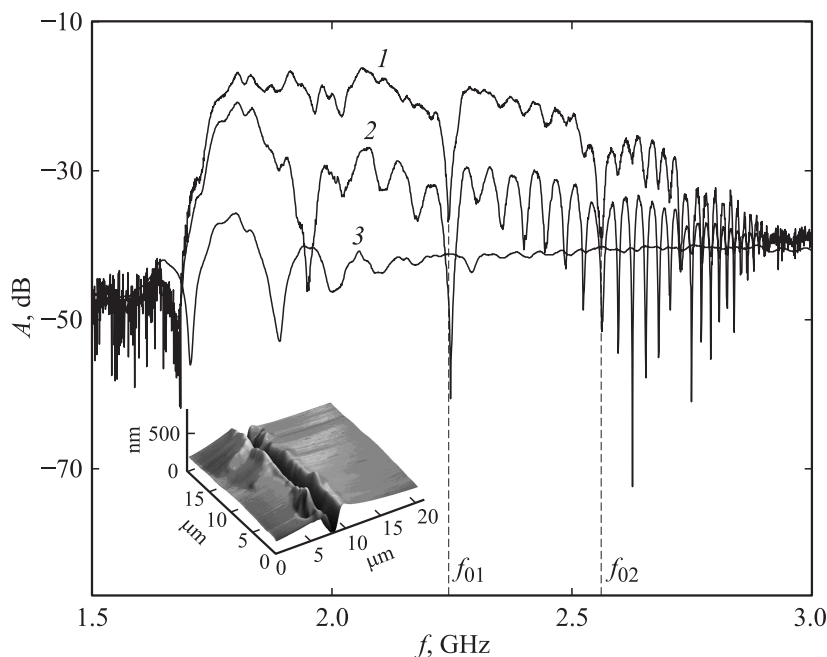


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики спин-волновой линии передачи на основе 1D магнитного кристалла, измеренные при разном уровне мощности входного сигнала P_{in} : -30 dBm (1), -11 dBm (2), $+10$ dBm (3). На вставке показано изображение одиночной канавки на поверхности пленки ЖИГ.

зондовый микроскоп Solver P47 NT-MDT. Изображение канавки на поверхности пленки ЖИГ, полученное на воздухе в контактном режиме, представлено на вставке к рис. 1. Использование скрайбирования привело к образованию канавок треугольной формы и „бортиков“ на краях канавок, что обуславливало нарушение кристаллической структуры пленки ЖИГ вблизи краев канавок (сколы поверхности, микротрещины). Однако такие краевые дефекты не оказывали существенного влияния на затухание МСВ в периодической структуре.

Экспериментальный макет спин-волновой линии передачи состоял из входного и выходного микрополосковых преобразователей шириной $30 \mu\text{m}$, закороченных с одного конца и расположенных на расстоянии

4 mm друг относительно друга, и 1D магнетонного кристалла, который накладывался поверх микрополосковых преобразователей. При внешнем постоянном магнитном поле $H_0 = 185$ Oe в пленке возбуждалась поверхностная МСВ (ПМСВ) в диапазоне частот $f = 1.7-2.8$ GHz, в котором трехволновые процессы взаимодействия были разрешены.

Результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента передачи $A = 10 \lg(P_{out}/P_{in})$ (где P_{out} — мощность на выходе линии, P_{in} — мощность на входе) спин-волновой линии передачи, выполненной на основе 1D магнетонного кристалла, от частоты при различных уровнях P_{in} приведены на рис. 1. Из рис. 1 следует, что на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) линии можно уверенно идентифицировать две запрещенные зоны. В линейном режиме (кривая 1) центральная частота первой запрещенной зоны f_{01} имеет значение $f_{01} = 2244.6$ MHz, коэффициент передачи на данной частоте равен $A_{01} = -38.2$ dB. Центральная частота второй запрещенной зоны — $f_{02} = 2561$ MHz, коэффициент передачи — $A_{02} = -40.6$ dB. С увеличением мощности входного сигнала (кривая 2) центральная частота первой запрещенной зоны сдвигается вверх по частоте на величину ~ 4.2 MHz. Как показано в [12], рост нелинейного затухания, которое в нашем случае обусловлено трехволновым взаимодействием, приводит к сдвигу запрещенной зоны вверх по частоте и к уменьшению ее относительной глубины. При больших уровнях мощности (кривая 3) запрещенная зона полностью исчезает.

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента передачи A_{01} от входной мощности P_{in} . Из представленных на рис. 2 результатов следует, что на данной зависимости можно выделить шесть характерных областей. Первая область (область I) наблюдается при $P_{in} < P_{th1} = -22$ dBm и соответствует линейному режиму, когда величина A_{01} не зависит от уровня P_{in} и остается постоянной. При $P_{in} \geq P_{th1}$ возникают трехволновые параметрические процессы, которые при $P_{th1} \leq P_{in} \leq P_{th2} = -19$ dBm приводят к увеличению коэффициента передачи (область II) [8], при $P_{th2} < P_{in} \leq P_{th3} = -17$ dBm к его уменьшению относительно максимального значения (область III), а при $P_{th3} < P_{in} \leq P_{th4} = -11$ dBm к его уменьшению относительно значения в линейном режиме. При $P_{th4} < P_{in} \leq P_{th5} = -0.5$ dBm наблюдается увеличение A_{01} , что соответствует области V. При $P_{in} > P_{th5}$ (область VI) коэффициент передачи становится постоянным, но остается меньшим по величине, чем в линейном режиме.

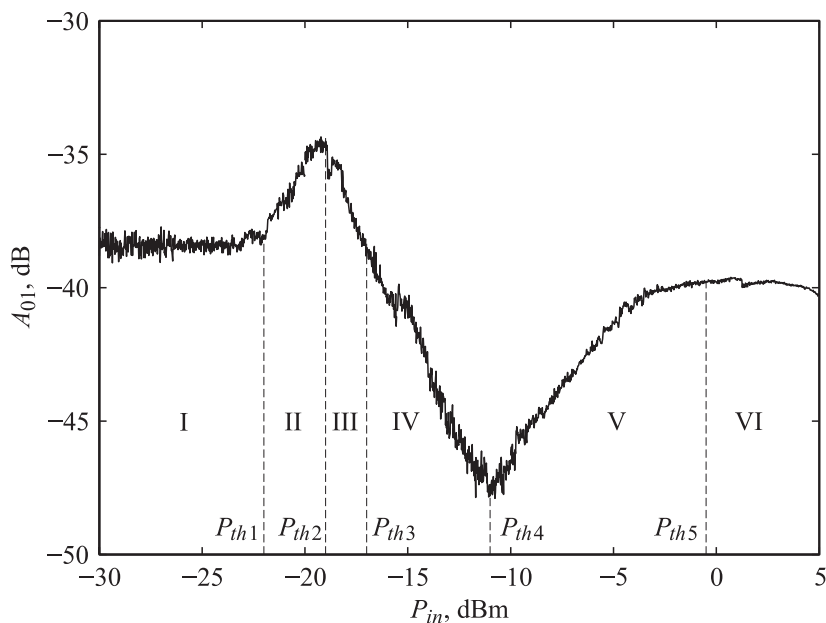


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи A_{01} от входной мощности P_{in} , измеренная на частоте $f_{01} = 2244.6$ MHz.

Известно [6,8], что при одновременном прохождении двух гармонических сигналов разного уровня мощности (большого и малого) через ограничитель мощности или усилитель отношения сигнал/шум, выполненных на основе однородной ферромагнитной пленки, наблюдается изменение амплитуды малого сигнала вблизи частоты большого, начиная с некоторой отстройки между сигналами $\Delta f_{crit} = |f_{lg} - f_{sm}|$, где f_{lg} — частота большого сигнала, f_{sm} — частота малого сигнала. У ограничителя мощности на МСВ амплитуда малого сигнала уменьшается при $\Delta f < \Delta f_{crit}$ [6], а у усилителя отношения сигнал/шум, наоборот, увеличивается [8]. В обоих случаях при $\Delta f \sim 0$ отношение большой сигнал/малый сигнал на выходе устройства практически равно отношению на входе.

Проанализируем представленные на рис. 2 результаты применительно к двухчастотному воздействию, когда имеются два сигнала —

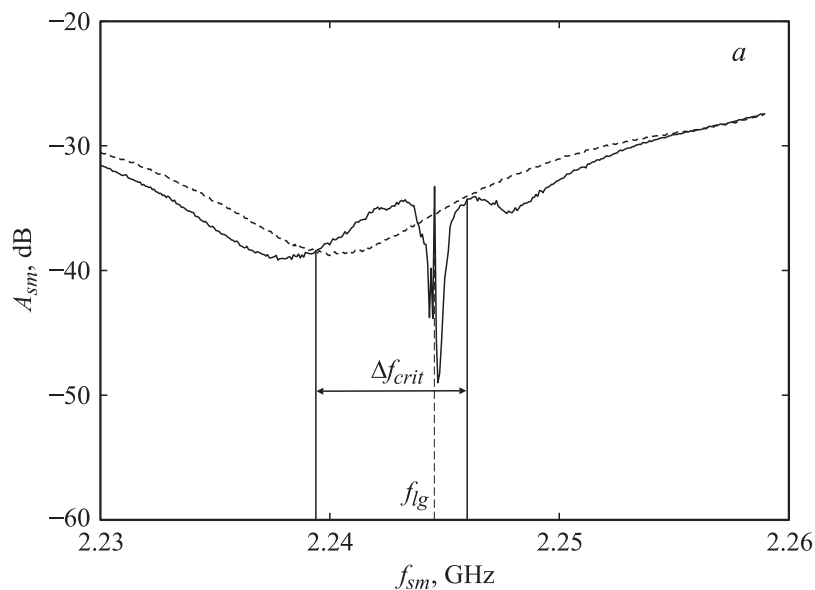


Рис. 3. Зависимости коэффициента передачи A_{sm} от частоты f_{sm} , измеренные в режиме малого входного сигнала в отсутствие большого сигнала (пунктирные линии) и в его присутствии (сплошные линии) при различных уровнях мощности большого сигнала P_{lg} и малого сигнала P_{sm} : *a* — $P_{lg} = -10$ dBm, $P_{sm} = -30$ dBm; *b* — $P_{lg} = 0$ dBm, $P_{sm} = -10$ dBm. Штрихпунктирной линией показана частота f_{lg} .

большого и малого уровня мощности с частотами, практически соответствующими частоте f_{01} . Взаимным влиянием сигналов друг на друга будем пренебрегать. Если мощность малого сигнала P_{sm} соответствует области I, а мощность большого сигнала P_{lg} соответствует областям II или III, то в этом случае отношение большой сигнал/малый сигнал на выходе линии будет больше, чем на входе, а сама линия передачи выполняет функцию усилителя отношения сигнал/шум. Если мощность P_{lg} соответствует областям IV–VI, то в этом случае линия передачи выполняет функцию ограничителя мощности. Однако мощность P_{sm} может соответствовать и другим областям на рис. 2. Так, например, если мощность P_{sm} соответствует области V, а мощность P_{lg} — областям V

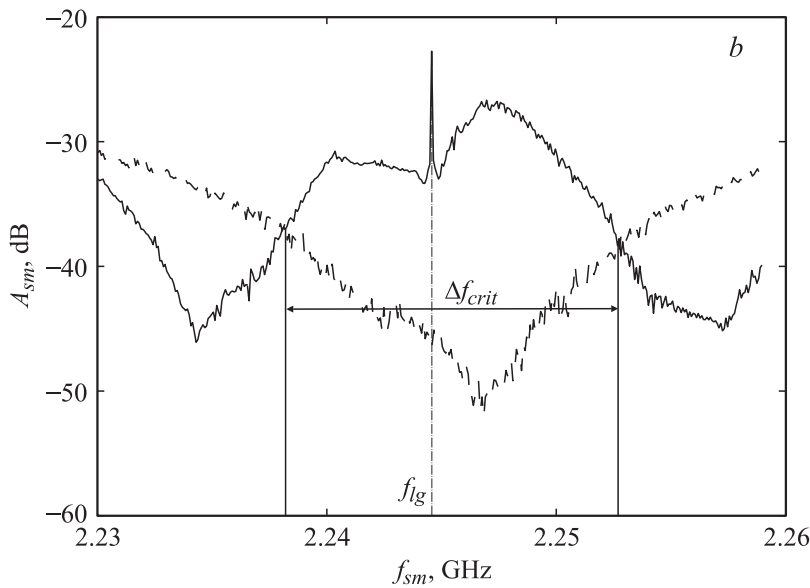


Рис. 3 (продолжение).

или VI, причем $P_{lg} > P_{sm}$, то в этом случае линия передачи выполняет функцию усилителя отношения сигнал/шум.

На рис. 3 приведены измеренные зависимости коэффициента передачи $A_{sm} = 10 \lg(P_{out}/P_{in})_{sm}$ от частоты малого сигнала f_{sm} , перестраиваемой вблизи фиксированной частоты большого сигнала $f_{lg} \cong f_{01} = \text{const}$. В случае, когда уровень мощности большого сигнала соответствует области V, а уровень мощности малого сигнала — области I, наблюдается увеличение ослабления малого сигнала вблизи частоты f_{lg} , причем в низкочастотной области это увеличение начинается при $\Delta f < 0.75$ MHz, а в высокочастотной — при $\Delta f < 1.42$ MHz (рис. 3, a). При $\Delta f_{crit} = 2.17$ MHz отношение большой сигнал/малый сигнал становится минимальным. Однако в низкочастотной области при $\Delta f > 0.75$ MHz возникает аномальное усиление малого сигнала, которое приводит к еще большему уменьшению отношения большой сигнал/малый сигнал. Дальнейшее увеличение Δf приводит к аномальному ослаблению малого сигнала, которое наблюдается в низкочастотной области при $\Delta f > 5.2$ MHz и в высокочастотной области

при $\Delta f > 1.42$ МГц. В случае, когда уровень мощности малого соответствует области V, а уровень мощности большого сигнала области VI (рис. 3, b), наблюдается уменьшение ослабления малого сигнала вблизи f_{lg} . В низкочастотной области это уменьшение начинается при $\Delta f = 6.36$ МГц, а в высокочастотной — при $\Delta f = 8.08$ МГц. При $\Delta f_{crit} = 14.44$ МГц отношение большой сигнал/малый сигнал становится максимальным. При $\Delta f > \Delta f_{crit}$ как в низкочастотной, так и в высокочастотной областях наблюдается аномальное ослабление малого сигнала, что наблюдалось ранее в [7,11].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в многочастотном режиме спин-волновая линия передачи на основе 1D магнетонного кристалла в условиях трехволновой параметрической неустойчивости на центральной частоте запрещенной зоны в зависимости от уровней большого и малого сигналов может работать либо как ограничитель мощности, либо как усилитель отношения сигнал/шум. Последнее обстоятельство позволяет использовать такую линию передачи для обработки сложно-модулированных сигналов в информационно-телекоммуникационных системах.

Авторы выражают благодарность А.В. Кожевникову за помощь в получении изображений периодической микроструктуры на поверхности пленки ЖИГ.

Работа выполнена при поддержке гранта правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (проект № 11.G34.31.0030) и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (проект № 14.740.11.0612).

Список литературы

- [1] Гуляев Ю.В., Никитов С.А. // ДАН. 2001. Т. 380. № 4. С. 469–471.
- [2] Высоцкий С.Л., Кожевников А.В., Казаков Г.Т. и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15. № 3. С. 58–72.
- [3] Ustinov A.B., Drozdovskii A.V., Kalinikos B.A. // Appl. Phys. 2010. V. 96. P. 142 513.
- [4] Grishin S.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A., Beginin E.N., Sheshukova S.E. // IEEE Trans. on Magn. 2011. V. 47. N 10. P. 3716–3719.

- [5] *Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Никитов С.А., Шараевский Ю.П., Шешукова С.Е.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 22. С. 50–60.
- [6] *Adam J.D., Stitzer S.N.* // IEEE Trans. on Magn. 1983. V. MAG-19. N 5. P. 1874–1876.
- [7] *Гришин С.В., Давоян А.Р., Шараевский Ю.П.* // РиЭ. 2010. Т. 55. № 1. С. 95–104.
- [8] *Adam J.D., Stitzer S.N.* // J. Appl. Phys. Lett. 1980. V. 36. N 6. P. 485–487.
- [9] *Устинов А.Б., Калиникоз Б.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 10. С. 20–25.
- [10] *Nototo T., Matsushita Y.* // IEEE Trans. Microwave Theory & Tech. 1993. V. 41. N 8. P. 1316–1322.
- [11] *Шараевский Ю.П., Гришин В.С., Гурзо В.В. и др.* // РиЭ. 1995. Т. 40. № 7. С. 1064–1068.
- [12] *Дроздовский А.В.* Автореф. дис. . . . канд. физ.-мат. наук. С.-Петербургский гос. электротех. ун-т. „ЛЭТИ“. Санкт-Петербург, 2011. 18 с.