

05:09;12

Взаимодействие сверхвысокочастотных сигналов в резонансной линии передачи на магнитостатических волнах

© С.В. Гришин, Ю.П. Шараевский

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия
e-mail: grishfam@sgu.ru; sharaevskyy@info.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 19 октября 2005 г.)

Экспериментально исследовано взаимодействие двух регулярных СВЧ-сигналов (малого и большого) при их одновременном прохождении через резонансную линию передачи на обратных объемных магнитостатических волнах в различных частотных областях. Установлено, что поведение амплитудно-частотных характеристик малого сигнала вблизи частоты большого зависит от частоты последнего и обусловлено обратным влиянием на амплитуду малого сигнала спин-волновых пакетов, параметрически возбуждаемых магнитостатической и электромагнитной накачками.

PACS: 84.40.Az

Введение

Известно, что микрополосковая линия передачи, нагруженная ферромагнитной пленкой, в которой при определенных значениях внешнего постоянного магнитного поля возбуждается магнитостатическая волна (МСВ), обладает уникальной особенностью, связанной с избирательным ослаблением проходящих через нее СВЧ-сигналов [1–5]. СВЧ-сигнал с уровнем мощности ниже некоторого порогового значения, проходя через такую линию передачи в полосе частот возбуждения МСВ, ослабляется сильнее, чем СВЧ-сигнал, уровень мощности которого выше порога. Данный эффект приводит к увеличению отношения мощности большого к мощности малого сигнала или шума на выходе линии по сравнению с их отношением на входе. В связи с этим СВЧ-устройство, выполненное на основе такой нелинейной линии передачи, получило название „усилитель отношения сигнал/шум“ или „шумоподавитель“ [4–8]. Наличие указанного эффекта обусловлено нелинейным затуханием МСВ в ферромагнитной пленке, что связано с параметрическим возбуждением в последней пакета спиновых волн на частотах, вдвое меньших частоты сигнала накачки.

Экспериментально также было установлено (см., например, [1–5,7,8]), что при одновременном прохождении двух СВЧ-сигналов (большого и малого) через рассматриваемую линию передачи на МСВ максимальный уровень подавления малого сигнала относительно большого наблюдается лишь при определенной величине отстройки между сигналами $\Delta f \geq \Delta f_{\text{crit}}$, где $\Delta f = |f_{\text{sm}} - f_{\text{lg}}|$, f_{sm} , f_{lg} — частоты малого и большого сигналов соответственно. Величина Δf_{crit} для пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) характеризуется значениями от единиц до нескольких десятков мегагерц, зависит от параметров пленки [9,10], уровня мощности большого сигнала [1–5,7–9] и определяет частотную избирательность данной нелинейной линии передачи на МСВ.

Для осуществления более эффективного подавления малого сигнала относительно большого в указанной выше конфигурации нелинейной линии передачи на МСВ авторами настоящей работы было предложено заменить согласованный отрезок микрополосковой линии микрополосковым резонатором [11,12]. Такая линия передачи может использоваться в качестве шумоподавителя [13], и она была названа нами резонансной линией передачи на МСВ, в отличие от рассмотренных ранее [1–8], которые ниже мы условно будем называть согласованными линиями передачи на МСВ.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования частотных характеристик резонансной линии передачи на МСВ при подаче на ее вход как одного СВЧ-сигнала различного уровня мощности (одночастотный режим), так и двух (большого и малого), отстроенных друг относительно друга по частоте (двухчастотный режим). В последнем случае особое внимание уделяется изучению эффектов, связанных с влиянием большого сигнала на амплитудные характеристики малого в широкой области изменения частоты большого сигнала, включая и диапазон частот, выходящий за пределы теоретически рассчитанной полосы возбуждения МСВ.

Одночастотный режим

Экспериментальный макет исследуемой линии передачи (рис. 1) представлял собой микрополосковый полуволновой резонатор проходного типа, вдоль поперечной оси симметрии которого располагалась пленка ЖИГ. Резонатор был выполнен методом тонкопленочной фотолитографии на диэлектрической подложке с $\epsilon = 9.6$ и толщиной $h = 0.5$ mm. Микрополосковый проводник имел ширину $w = 0.5$ mm. Основным видом колебания микрополоскового резонатора характеризовался резонансной частотой $f_0 = 2117$ MHz, нагруженной

добротностью $Q_L = 141$ и ослаблением на резонансной частоте $A_0 = 12.3$ dB. Пленка ЖИГ с размерами $6 \times 10 \times 0.04$ mm характеризовалась намагниченностью насыщения $4\pi M_0 = 1680$ Gs и шириной линии ферромагнитного резонанса $2\Delta H = 0.69$ Oe. Внешнее постоянное магнитное поле H_0 прикладывалось касательно к поверхности исследуемой системы и перпендикулярно микрополосковому проводнику так, что в пленке возбуждалась обратная объемная МСВ (ООМСВ) на частотах основного вида колебания микрополоскового резонатора [11–14].

Измерения амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) резонансной линии передачи на ООМСВ при подаче на ее вход гармонического сигнала с разным уровнем мощности выполнялись с помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи Р4-23. Для увеличения уровня мощности входного СВЧ-сигнала к выходу генератора, входящего в состав измерителя, был подключен транзисторный усилитель мощности с коэффициентом усиления ~ 30 dB и выходной мощностью насыщения 200–250 mW. Уровень средней мощности падающей волны \tilde{P}_{in} на входе резонансной линии передачи на ООМСВ контролировался с помощью измерителя мощности М3-51 и поддерживался постоянным в широкой полосе частот. Измерения значений комплексного коэффициента передачи при каждом уровне мощности выполнялись в режиме ручной установки частоты с шагом 10 MHz. Измеритель Р4-23 калибровался на каждой частоте и при каждом значении \tilde{P}_{in} .

На рис. 2 представлены АЧХ резонансной линии передачи на ООМСВ, измеренные в линейном режиме ($\tilde{P}_{in} = 1 \mu\text{W}$ — уровень мощности, соответствующий малому входному сигналу) и в режиме насы-

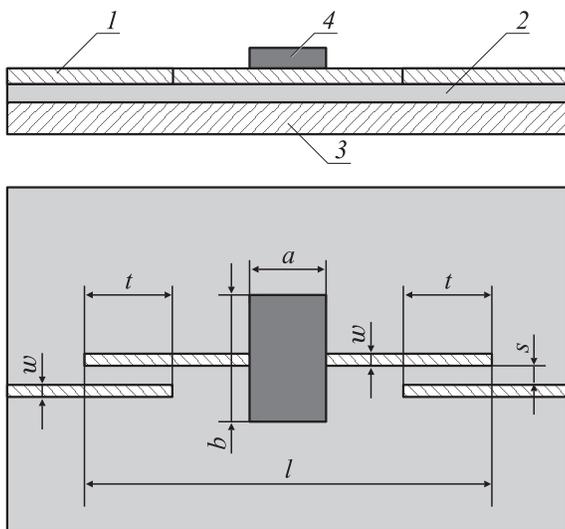


Рис. 1. Схематическое изображение резонансной линии передачи на ООМСВ: 1 — микрополосковый проводник, 2 — диэлектрическая подложка, 3 — проводящий экран, 4 — пленка ЖИГ; $l = 26.5$, $w = 0.5$, $t = 6$, $s = 0.6$, $a = 6$, $b = 10$ mm.

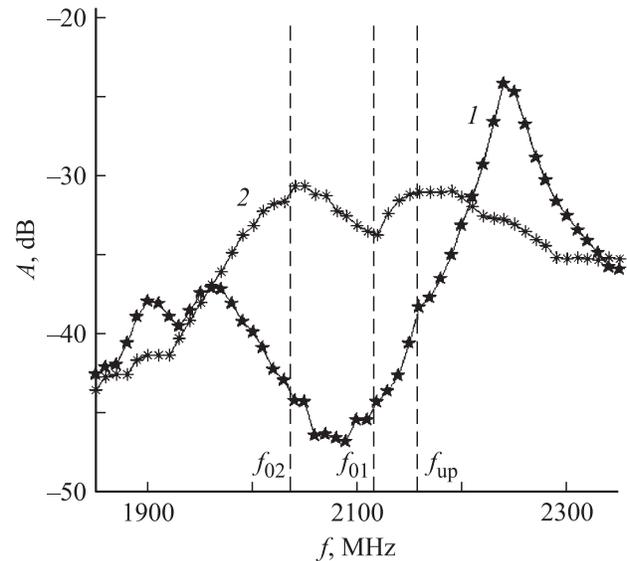


Рис. 2. Измеренные значения модуля коэффициента передачи A резонансной линии передачи на ООМСВ от частоты входного сигнала f в линейном режиме (кривая 1) и в режиме насыщения (кривая 2).

щения ($\tilde{P}_{in} = 128$ mW — уровень мощности, соответствующий большому входному сигналу). Режим насыщения по мощности нелинейной линии передачи на МСВ соответствовал случаю, когда дальнейшее увеличение \tilde{P}_{in} не приводило к заметному изменению АЧХ линии. Представленные на рис. 2 кривые были получены при величине внешнего постоянного магнитного поля $H_0 \cong 300$ Oe. При таком значении H_0 верхняя частотная граница теоретически рассчитанной полосы возбуждения ООМСВ составляла величину $f_{up} = \sqrt{f_H(f_H + f_M)} = 2158$ MHz ($f_H = \gamma H_0$ — частота ферромагнитного резонанса, γ — гиромагнитное отношение, равное 2.8 MHz/Oe; $f_M = 4\pi\gamma M_0$), а нижняя частотная граница имела значение $f_H = 840$ MHz [5].

Из представленных на рис. 2 результатов видно, что АЧХ исследуемой линии передачи в линейном режиме характеризуется наличием двух максимумов, один из которых (высокочастотный) находится выше, а другой (низкочастотный) ниже частоты f_0 .¹ Такой вид АЧХ резонансной линии передачи на ООМСВ, как показано в [12,14], соответствует АЧХ системы двух связанных колебательных контуров, где в качестве первого колебательного контура выступает микрополосковый резонатор с резонансной частотой $f_{01} = f_0$, а в качестве второго — пленка ЖИГ при возбуждении в ней ООМСВ с резонансной частотой f_{02} . Как показано в [12], резонансная частота f_{02} при данном значении H_0 имеет величину $f_{02} \cong 2036$ MHz и находится ниже резонансной частоты f_{01} , располагаясь внутри области частот

¹ Изрезанность низкочастотного максимума, обусловленную перетражением ООМСВ от краев пленки, можно исключить путем нанесения на края пленки поглощаемого материала [2].

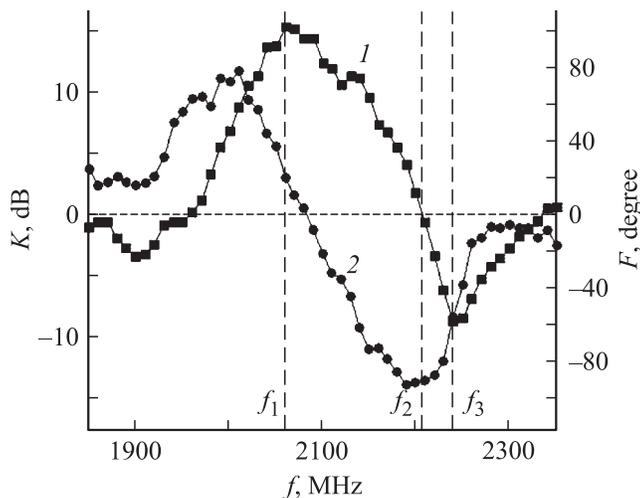


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента K (кривая 1) и величины F (кривая 2), полученные для резонансной линии передачи на ООМСВ в одночастотном режиме. Нулевые уровни зависимостей K и F совмещены и обозначены пунктирной линией.

$2f_H < f_{02} < \sqrt{f_H(f_H + f_M)}$, в которой параметрические процессы первого порядка для ООМСВ разрешены [2,5]. Частоты, на которых наблюдаются максимумы АЧХ исследуемой линии передачи (кривая 1), соответствуют частотам связи двухконтурной системы при величине связи больше критической [14]. При этом одна из них лежит ниже частоты f_{02} , а другая — выше частоты f_{01} . В случае входного сигнала большого уровня мощности (см. кривую 2) происходит сближение частот, соответствующих обоим максимумам на АЧХ линии, и выравнивание уровней ослабления на этих частотах.²

Сравнив кривые 1 и 2 на рис. 2, можно выделить частотную область, в которой малый сигнал ослабляется сильнее большого (кривая 1 проходит ниже кривой 2), и частотные области, в которых большой сигнал ослабляется сильнее малого (одна из них находится в области низкочастотного максимума, а другая — в области высокочастотного максимума кривой 1). При этом отметим, что высокочастотная область находится за пределами теоретически рассчитанной полосы возбуждения ООМСВ (выше частоты f_{up}).

На рис. 3 приведены частотные зависимости величины $K = 20 \lg(A_{lg}/A_{sm})$, характеризующей изменение отношения амплитуды большого сигнала к амплитуде малого на выходе линии передачи по сравнению со входом, и величины $F = \Delta\phi_{lg} - \Delta\phi_{sm}$, определяющей разность набега фаз между большим и малым сигналами, где A_{lg} , $\Delta\phi_{lg}$ — значение модуля коэффициента передачи и набега фазы в линии в режиме большого сигнала ($\tilde{P}_{in} = 128 \text{ mW}$); A_{sm} , $\Delta\phi_{sm}$ — аналогичные значения в режиме малого сигнала ($\tilde{P}_{in} = 1 \mu\text{W}$). Из представлен-

² Механизм трансформации АЧХ резонансной линии передачи на ООМСВ с увеличением уровня \tilde{P}_{in} был подробно описан в [12].

ных на рис. 3 результатов видно, что кривая 1 характеризуется областью частот, в которой $K > 0$ (максимальное значение $K \cong 15 \text{ dB}$ в этой области соответствует частоте $f_1 = 2060 \text{ MHz}$), и областями частот, в которых $K < 0$ (минимальное значение $K \cong -9 \text{ dB}$ соответствует частоте $f_3 = 2240 \text{ MHz}$). При $K > 0$ исследуемая линия передачи может использоваться как шумоподавитель [13], а при $K < 0$ — как ограничитель мощности.³

Из рассмотрения результатов, представленных на рис. 3 для величины F , следует, что с увеличением уровня мощности входного сигнала в исследуемой линии передачи происходит также изменение величины набега фазы сигнала. Следовательно, резонансная линия передачи на ООМСВ в определенных частотных областях может использоваться и как нелинейный фазовращатель.⁴ В связи с этим на рис. 3 выделена еще одна характерная частота $f_2 = 2210 \text{ MHz}$, на которой сдвиг фазы между большим и малым сигналами максимален ($F \sim 90^\circ$), а $K = 0$. В этом случае резонансная линия передачи на частоте f_2 может использоваться в качестве эффективного нелинейного фазовращателя, в котором фаза входного сигнала зависит от уровня входной мощности, а амплитуда сигнала остается постоянной. Отметим, что на частоте f_1 , где усиление K максимально, $F \sim 0$. Необходимо подчеркнуть, что частота f_1 для исследуемого макета резонансной линии передачи находится в пределах рассчитанной полосы возбуждения ООМСВ и практически совпадает с f_{02} , а f_2 и f_3 находятся за пределами этой полосы.

Двухчастотный режим

Изменения АЧХ резонансной линии передачи на ООМСВ в режиме малого входного сигнала при наличии большого на фиксированной частоте f_{lg} проводились с помощью анализатора спектра С4-60, который позволял оценить изменение амплитуды малого сигнала при перестройке его частоты f_{sm} вблизи f_{lg} . При перестройке частоты f_{sm} анализатор спектра работал в режиме запоминания. Гармонические СВЧ-сигналы подавались на вход линии от двух развязанных между собой ферритовым вентилем СВЧ-генераторов Г4-79, к выходу одного из которых был подключен транзисторный усилитель мощности. Уровни мощности СВЧ-сигналов на входе резонансной линии передачи на ООМСВ контролировались с помощью измерителя мощности МЗ-51, включенного в СВЧ-тракт через направленный ответвитель. При этом входная мощность малого сигнала

³ Необходимо отметить, что, в отличие от рассматриваемой резонансной линии передачи на ООМСВ, наличие у согласованной линии передачи на ООМСВ областей частот, в которых большой сигнал ослабляется сильнее малого, не наблюдалось (см., например, [6,11]). Последняя может использоваться в качестве ограничителя мощности в случае, когда частота СВЧ-сигнала вдвое превышает частоту возбуждения МСВ [16].

⁴ Зависимость набега фазы СВЧ-сигнала от его амплитуды наблюдалась экспериментально в линии задержки на МСВ [17] и использовалась при создании нелинейного спин-волнового интерферометра [18].

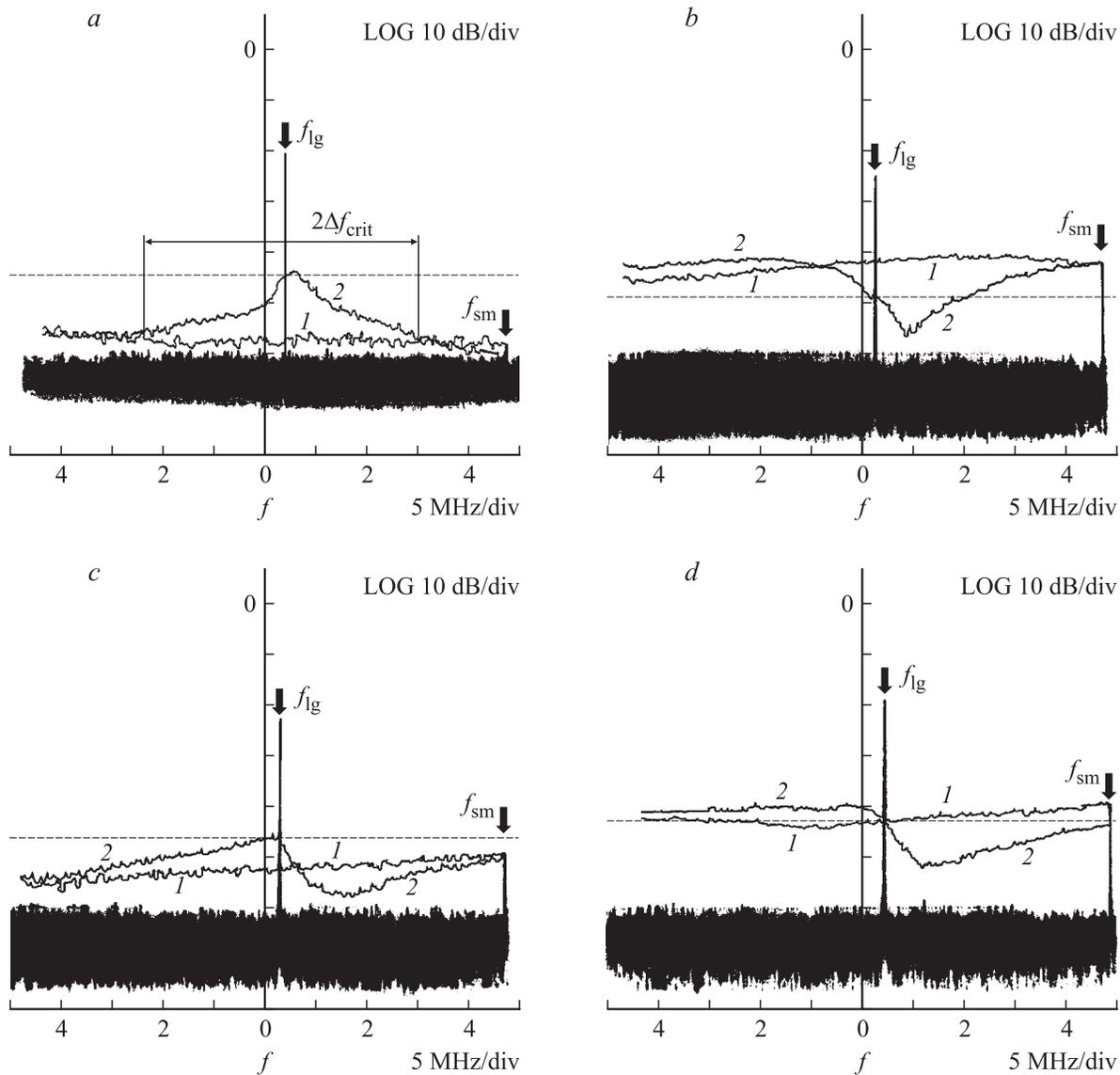


Рис. 4. АЧХ малого сигнала, проходящего через резонансную линию передачи на ООМСВ в отсутствие (кривая 1) и в присутствии (кривая 2) большого сигнала при различных частотах большого сигнала: *a* — $f_{lg} = 2060$, *b* — 2240, *c* — 2170, *d* — 2210 МГц. Пунктирной линией обозначен уровень, соответствующий значению $K = 0$.

составляла величину $\tilde{P}_{in}^{sm} = 0.5 \text{ mW}$ и поддерживалась постоянной,⁵ а мощность большого сигнала имела значение $\tilde{P}_{in}^{lg} = 128 \text{ mW}$. Таким образом, отношение уровня мощности большого сигнала к уровню малого на входе линии передачи составляло $\sim 24 \text{ dB}$.

На рис. 4 приведены АЧХ малого сигнала, измеренные при одновременном прохождении большого и малого сигналов через резонансную линию передачи на ООМСВ, когда частота f_{sm} перестраивалась вблизи f_{lg} в пределах $\Delta f = \pm 25 \text{ MHz}$. На рис. 4, *a, b, d* частота f_{lg} соответствует значениям характерных частот f_1

(рис. 4, *a*), f_3 (рис. 4, *b*), f_2 (рис. 4, *d*), указанных на рис. 3. На рис. 4, *c* приведены экспериментальные результаты для случая, когда частота большого сигнала лежит в интервале частот $f_1 < f_{lg} < f_2$ и находится вблизи рассчитанной верхней частотной границы полосы возбуждения ООМСВ ($f_{lg} \sim f_{up}$).

Из представленных на рис. 4 результатов следует, что начиная с некоторой величины отстройки между малым и большим сигналами малый сигнал испытывает заметное влияние со стороны большого сигнала, приводящее к изменению амплитуды первого, причем в зависимости от значения частоты f_{lg} это влияние различно. При $f_{lg} = f_1$ (рис. 4, *a*), когда частота большого сигнала находится в области частот, где в соответствии с рис. 3 значение $K > 0$ максимально, наблюдается увеличение

⁵ Данный уровень мощности СВЧ-сигнала еще соответствовал линейному режиму работы резонансной линии передачи на ООМСВ и одновременно обеспечивал уверенную индикацию выходного сигнала на фоне собственных шумов анализатора спектра.

амплитуды малого сигнала вблизи большого (см. кривую 2) по сравнению со случаем отсутствия в линии большого сигнала (см. кривую 1). Это увеличение имеет резонансный характер и приводит к уменьшению значения K вблизи частоты f_{lg} (на частоте $f_{sm} = f_{lg}$ $K = 0$). Отметим, что амплитуда малого сигнала достигает своего максимального значения на частоте, несколько большей частоты f_{lg} (примерно на величину ~ 1 МГц). При значениях $\Delta f \geq \Delta f_{crit} \approx 15$ МГц большой сигнал практически не влияет на амплитуду малого. Если оценить добротность резонансной кривой, то она в этом случае составляет величину $Q_{f_1}^{max} \cong 665$. Резонансное усиление амплитуды малого сигнала вблизи частоты большого наблюдалось и в шумоподавителях, выполненных на согласованных линиях передачи на МСВ [1–5,8,11].

При $f_{lg} = f_3$ (частота большого сигнала находится в области частот, где в соответствии с результатами рис. 3 $K < 0$ и минимально) наблюдается резонансное уменьшение амплитуды малого сигнала вблизи большого (см. кривую 2 на рис. 4, *b*) по сравнению со случаем отсутствия в линии большого сигнала (см. кривую 1 на рис. 4, *b*), что приводит к увеличению значения K (на частоте $f_{sm} = f_{lg}$ $K = 0$). При этом минимальное значение амплитуды малого сигнала достигается на частоте, отстроенной вверх от f_{lg} на величину ~ 3.1 МГц, а добротность резонансной кривой в этом случае $Q_{f_3}^{min} \cong 935$.

На рис. 4, *c*, *d* приведены экспериментальные результаты, полученные при значениях частоты f_{lg} , лежащих в интервале $f_1 < f_{lg} < f_3$ и соответствующим двум случаям: $f_{lg} \sim f_{up}$ (рис. 4, *c*) и $f_{lg} = f_2$ (рис. 4, *d*). АЧХ малого сигнала в присутствии большого на этих рисунках, в отличие от АЧХ, представленных на рис. 4, *a*, *b*, характеризуются наличием двух экстремумов (максимума и минимума), разнесенных друг относительно друга по частоте на величину более 5 МГц. Ниже дается качественное объяснение приведенных на рис. 4 экспериментальных результатов.

Обсуждение результатов

Выявленные выше особенности в поведении амплитуды малого сигнала вблизи частоты большого можно объяснить на основе параметрических механизмов возбуждения большим сигналом (сигнал накачки) тепловых спиновых волн (СВ) в ферромагнитной пленке (параметрические процессы первого порядка) с учетом обратного влияния СВ на частотные характеристики малых сигналов, находящихся вблизи частоты сигнала накачки [15].

Известно, что в качестве сигнала накачки может выступать либо магнитостатическая волна, распространяющаяся в ферромагнитной пленке (см., например, [1–3]), либо электромагнитная волна, распространяющаяся по микрополосковой линии [16]. В общем случае к параметрической неустойчивости СВ могут приводить обе

указанные волны, поэтому при проведении эксперимента, в частности, с нелинейной линией передачи на МСВ, выполненной в виде линии задержки, возникали определенные трудности в правильной идентификации параметрических эффектов, связанных с тем или иным видом накачки [19]. Однако для исследуемой нами резонансной линии передачи на МСВ указанная трудность легко разрешается, так как характер изменения (увеличение и уменьшение) амплитуды малого сигнала вблизи частоты большого, как будет показано ниже, определяется возбужденным спин-волновым пакетом на частотах $\sim f_{lg}/2$ под действием того или иного вида накачки (МСВ или электромагнитный сигнал).

Наблюдаемую на рис. 4 трансформацию АЧХ малого сигнала вблизи частоты большого можно качественно пояснить с помощью приведенных на рис. 5 диаграмм. Допустим, что на частоте $f_{lg} = f_1$ в роли сигнала накачки будет выступать в основном магнитостатическая волна, так как эта частота практически совпадает с резонансной частотой второго колебательного контура ($f_1 \sim f_{02}$), описывающего поведение пленки ЖИГ при возбуждении в ней ООМСВ, и соответствует максимальному значению подавления малого сигнала относительно большого (см. кривую 1 на рис. 3). В этом случае магнитостатическая волна большой амплитуды, являясь волной накачки, возбуждает спин-волновой пакет на половинной частоте, ограничиваясь при этом по амплитуде (см. верхнюю диаграмму на рис. 5, *a*). Если при этом вблизи частоты накачки оказывается МСВ малой амплитуды, то последняя, попав в область обратного влияния со стороны спин-волнового пакета, также ограничивается по амплитуде [15]. Однако информация об изменении амплитуды МСВ в пленке ЖИГ передается на выход исследуемой линии с помощью электромагнитных СВЧ-сигналов (большой и малой амплитуды), проходящих через микрополосковый резонатор. В связи с этим на выходе резонансной линии передачи на ООМСВ (см. нижнюю диаграмму на рис. 5, *a*) мы увидим усиление амплитуды малого СВЧ-сигнала в той области частот, где в пленке ЖИГ будет происходить ограничение МСВ малой амплитуды. Таким образом, увеличение амплитуды малого СВЧ-сигнала вблизи частоты большого свидетельствует о том, что спин-волновой пакет в пленке ЖИГ возбуждается магнитостатической волной накачки.

Известно, что ширина линии спин-волнового резонанса на половинной частоте сигнала накачки определяется величиной потерь спиновых волн ΔH_k , которая может быть рассчитана по экспериментальным данным с использованием следующего выражения:

$$\Delta f_{3dB} = 2\gamma\Delta H_k, \quad (1)$$

где Δf_{3dB} — ширина огибающей амплитуды малого сигнала по уровню 3 dB от ее экстремального значения. Параметр ΔH_k , рассчитанный по формуле (1) с учетом экспериментальных данных рис. 4, *a*, имеет величину $\Delta H_k \cong 0.55$ Ое, что совпадает с результатами, приведенными, например, в работах [9,16].

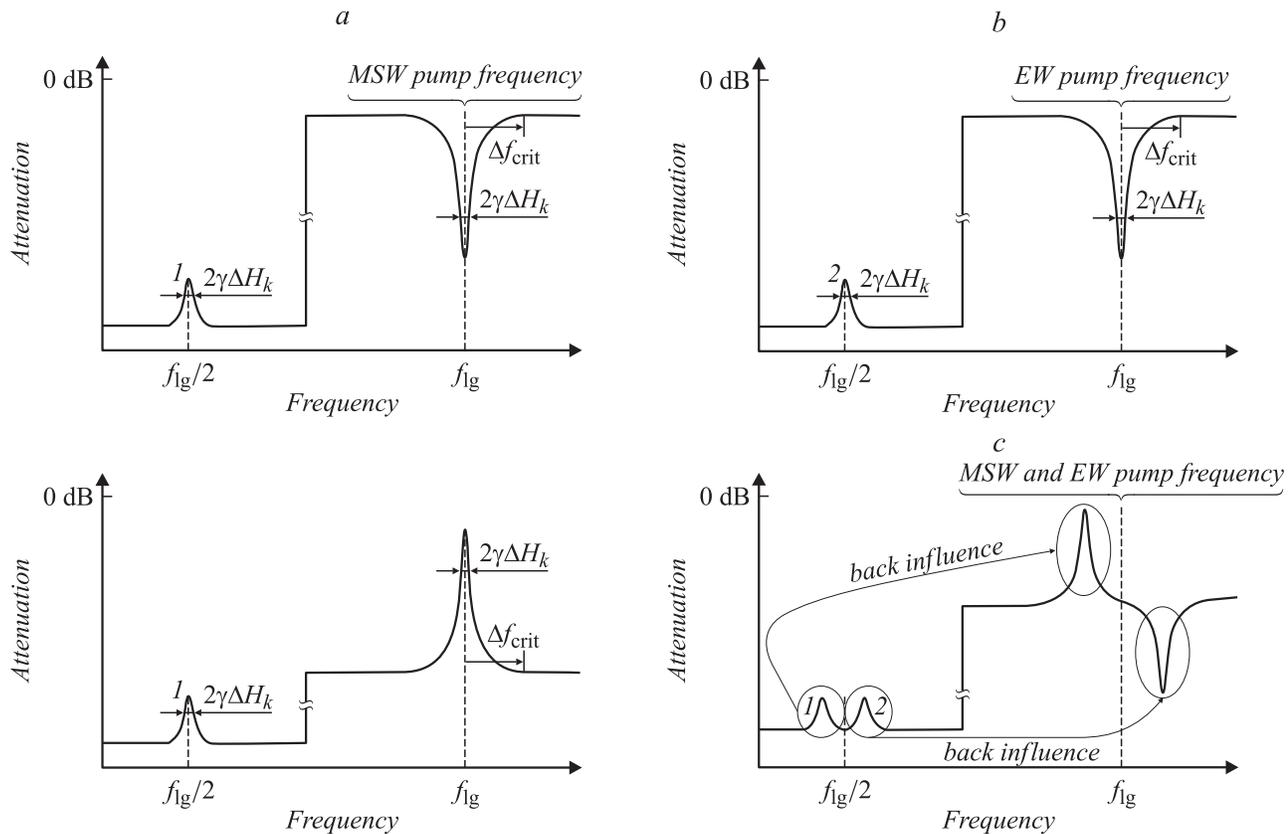


Рис. 5. Качественная иллюстрация эффекта параметрического взаимодействия волн, наблюдаемого в резонансной линии передачи на МСВ: *a* — при магнитостатической; *b* — при электромагнитной накачке; *c* — при обеих накачках одновременно. 1 и 2 — спин-волновые пакеты, возбуждаемые МСВ и электромагнитной волной накачки соответственно.

Для пояснения наблюдаемого на рис. 4, *b* эффекта уменьшения амплитуды малого сигнала вблизи частоты большого воспользуемся диаграммой, приведенной на рис. 5, *b*. Так как частота f_{lg} в данном случае находится далеко за пределами верхней частотной границы полосы возбуждения ООМСВ ($f_{lg} > f_{up}$) и соответствует частоте, на которой в односигнальном режиме наблюдается максимальное ограничение большого сигнала относительно малого (кривая 1 на рис. 3), можно предположить, что при $f_{lg} = f_3$ в роли сигнала накачки будет выступать в основном электромагнитная волна. Возбуждая спин-волновой пакет на частотах $\sim f_{lg}/2$, электромагнитная волна накачки ограничивается по амплитуде (рис. 5, *b*). В этом случае электромагнитный сигнал малой амплитуды, попав в область обратного влияния спин-волнового пакета, также ограничивается по амплитуде. Однако в отличие от рассмотренного выше случая магнитостатической накачки информация о параметрической неустойчивости электромагнитной волны переносится на выход линии самой электромагнитной волной, поэтому на экране анализатора спектра регистрируется минимум на АЧХ малого сигнала вблизи частоты большого.

Параметр потерь спиновых волн, рассчитанный с учетом экспериментальных данных по соотношению (1)

для случая электромагнитной накачки, $\Delta H_k \cong 0.43$ Ое. Таким образом, спин-волновые пакеты, возбуждаемые магнитостатической и электромагнитной волнами, имеют один порядок величины ΔH_k . Получаемые при этом небольшие отличия в значениях ΔH_k могут свидетельствовать, на наш взгляд, о ее частотной зависимости, приводящей к уменьшению значения ΔH_k с ростом частоты.

Наблюдаемое на АЧХ малого сигнала вблизи частоты большого (рис. 4, *c, d*) присутствие двух резонансных экстремумов (максимума и минимума) соответствует, по-видимому, случаю, когда в качестве накачки одновременно выступают как магнитостатическая волна в пленке, так и электромагнитная в резонаторе. Обратимся к приведенной на рис. 5, *c* диаграмме. В случае, когда в роли накачки выступают обе эти волны, в области частот $\sim f_{lg}/2$ одновременно возбуждаются два спин-волновых пакета (рис. 5, *c*). Взаимодействие пакетов приводит к их расталкиванию относительно частоты $f_{lg}/2$, что расширяет частотную область обратного влияния пакетов на амплитуду малого сигнала. Принадлежность того или иного пакета к одному из видов накачки может быть легко установлена по изменению амплитуды малого сигнала вблизи частоты накачки — максимум на АЧХ малого сигнала соответствует обратному

влиянию спин-волнового пакета, возбуждаемого МСВ, минимум — влиянию пакета, возбуждаемого электромагнитной волной.

Как следует из представленных на рис. 4 экспериментальных результатов, местоположение частот экстремумов на АЧХ малого сигнала относительно частоты f_{lg} зависит от добротности образующих их резонансных кривых. Так, в случае, когда на АЧХ малого сигнала присутствует резонансная кривая, образующая либо максимум (рис. 4, *a*), либо минимум (рис. 4, *b*) и имеющая максимальное значение добротности ($Q_{f_1^{\max}} \cong 665$ или $Q_{f_3^{\min}} \cong 935$), частота экстремума имеет минимальную величину отстройки от частоты f_{lg} (порядка 1 в первом случае и 3 МГц во втором). При одновременном присутствии двух экстремумов (максимума и минимума) на АЧХ малого сигнала (рис. 4, *c, d*) добротности исходных резонансных кривых, образующих экстремумы, уменьшаются, а частоты экстремумов удаляются от частоты f_{lg} .

Таким образом, можно предположить, что чем эффективнее возбуждение того или иного спин-волнового пакета, тем выше его добротность и тем ближе его центральная частота находится к частоте $f_{lg}/2$, вследствие чего частота экстремума на АЧХ малого сигнала приближается к f_{lg} . И, наоборот, с уменьшением эффективности возбуждения спин-волнового пакета добротность падает, а его центральная частота удаляется от $f_{lg}/2$, что приводит к отстройке частоты экстремума на АЧХ малого сигнала от f_{lg} .

Одновременное существование двух механизмов параметрического взаимодействия волн в рассматриваемой линии передач приводит к возбуждению и взаимодействию между собой двух спин-волновых пакетов и их влиянию на малый сигнал вблизи частоты большого. Именно это совместное влияние обуславливает дополнительное увеличение (или уменьшение) величины K , либо смену знака этой величины по сравнению с одночастотным режимом. В частности, из результатов, представленных на рис. 4, *c*, следует, что на частотах минимума АЧХ малого сигнала (двухчастотный режим) образуется область, в которой ослабление малого сигнала увеличивается по сравнению с одночастотным случаем: если в одночастотном режиме K на данных частотах имеет величину $\sim 5-7$, то в двухчастотном — $\sim 9-12$ dB. Аналогичный эффект наблюдался в работе [8] при исследовании нелинейной согласованной линии передачи на поверхностной МСВ (эффект „аномального“ подавления малого сигнала).

На рис. 4, *d* вследствие взаимодействия спин-волновых пакетов на половинной частоте экстремумы на АЧХ малого сигнала оказываются разнесенными по разные стороны от f_{lg} , на которой $K = 0$ как в одночастотном, так и в двухчастотном режимах. При этом увеличение амплитуды малого сигнала в двухчастотном режиме относительно ее уровня в одночастотном режиме наблюдается слева, а уменьшение — справа от частоты f_{lg} . Та-

ким образом, на частотах, где в одночастотном режиме $K > 0$, в двухчастотном в узкой полосе частот $K < 0$ и, наоборот, где в одночастотном режиме $K < 0$ — в двухчастотном режиме $K > 0$. Максимальное увеличение K в последнем случае достигает уровня ~ 8 dB.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований изучены основные особенности взаимодействия малого и большого СВЧ-сигналов в резонансной линии передачи на ООМСВ при перестройке частоты последнего из области частот, где малый сигнал ослабляется сильнее большого, в область частот, где большой сигнал ослабляется сильнее малого. Наблюдаемая трансформация АЧХ малого сигнала вблизи частоты большого объясняется обратным влиянием на амплитуду малого сигнала взаимодействующих спин-волновых пакетов, возбуждаемых параметрически магнитостатической и электромагнитной волнами на частотах, вдвое меньших частоты сигнала накачки. Исследованные в настоящей работе эффекты, возникающие в результате обратного влияния на амплитуду малого сигнала взаимодействующих между собой спин-волновых пакетов и приводящие в ряде случаев как к дополнительному увеличению отношения амплитуды большого сигнала к амплитуде малого на выходе линии по сравнению со входом, так и к образованию новых частотных областей, в которых наблюдается увеличение этого отношения, могут быть полезны при создании шумоподавителей на основе подобных линий передачи.

Работа выполнена в рамках научной программы Федерального агентства по образованию „Развитие научного потенциала высшей школы“ (гранты № 372 и 333), при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (№ НШ-4167.2006.2, № 2006-РП-19.0/001/053), а также при поддержке РФФИ (грант № 04-02-16296).

Список литературы

- [1] Adam J.D., Stitzer S.N. // J. Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36. N 6. P. 485–487.
- [2] Adam J.D. // IEEE Trans. on Magn. 1980. Vol. MAG-16. N 5. P. 1168–1170.
- [3] Stitzer S.N., Goldie H., Adam J.D., Emtage P.R. // IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest, USA. 1980. P. 238–240.
- [4] Гурзо В.В., Прокушкин В.Н., Рейхель В.В., Шараевский Ю.П. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1986. Т. 29. № 9. С. 95–96.
- [5] Ваишковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ, 1993. 320 с.
- [6] Зубков В.И., Кильдишев В.Н. // РиЭ. 1988. Т. 33. № 5. С. 1839–1845.
- [7] Соловей Д.В., Шараевский Ю.П. // Изв. вузов. ПНД. 1995. Т. 3. № 1. С. 11–19.

- [8] Шараевский Ю.П., Гришин В.С., Гурзо В.В. и др. // РИЭ. 1995. Т. 40. № 7. С. 1064–1068.
- [9] Emtage P.R., Stitzer S.N. // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 1977. Vol. MTT-25. N 3. P. 210–213.
- [10] Nomoto T., Matsushita Y. // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 1993. Vol. 41. N 8. P. 1316–1322.
- [11] Гришин С.В., Шараевский Ю.П. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 2. С. 77–83.
- [12] Гришин С.В., Гришин В.С., Шараевский Ю.П. // РИЭ. 2005. Т. 50. № 8.
- [13] Шараевский Ю.П., Гришин С.В., Гурзо В.В. Шумоподаватель. Патент № 41550. М.: ФИПС. 2004. № 30. С. 542.
- [14] Гришин С.В., Гришин В.С., Гурзо В.В., Шараевский Ю.П. // РИЭ. 2003. Т. 48. № 6. С. 724–730.
- [15] Казаков Г.Т., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А. // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 1. С. 318–332.
- [16] Stitzer S.N. // IEEE Trans. on Magn. 1983. Vol. MAG-19. N 5. P. 1874–1876.
- [17] Мясоедов А.Н., Маряхин А.В., Нам Б.П., Фетисов Ю.К. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 1. С. 118–123.
- [18] Устинов А.Б., Калинин Б.А. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 10. С. 20–25.
- [19] Вашковский А.В., Локк Э.К. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. № 7. С. 545–548.